

Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute

**Evaluation de l'évapotranspiration réelle, de ses
composantes et de sa régulation dans un
peuplement composé de hêtre et de douglas :
analyse comparative de l'effet espèce et des
méthodes d'évaluation.**

**Par Rémy Soubie
Juin 2014**

**Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en
Sciences Agronomiques et Ingénierie Biologique**

Ecole doctorale Sciences, Technologies et Gestion de l'Environnement

Promotrice:

**Prof. Caroline Vincke, Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute
- Environmental Sciences - Laboratory of forest research and engineering**

Membres du Jury:

Président:

**Prof. Marnik Vanclooster, Université catholique de Louvain, Earth and Life
Institute - Environmental Sciences**

Lecteurs:

**Prof. Marc Aubinet, Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, Unité de
Physique des Biosystèmes**

Dr. André Granier, INRA Nancy, UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestières

**Prof. Charles De Cannière, Université Libre de Bruxelles, Ecologie du Paysage et
Systèmes de Production Végétale**

Secrétaire:

**Prof. Xavier Draye, Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute –
Agronomy**

Année Académique 2013-2014

Soubie, R., 2014. Evaluation de l'évapotranspiration réelle, de ses composantes et de sa régulation dans un peuplement composé de hêtre et de douglas : analyse comparative de l'effet espèce et des méthodes d'évaluation. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain (FRIA, Région Wallonne).

Remerciements

Enfin un paragraphe sans correction et que tout le monde lira en plus ! En tous cas j'espère, car ces remerciements vous les méritez bien et je suis fier de pouvoir enfin les rédiger au bout de ces cinq années et demie de thèse. Cette expérience du doctorat a été aussi synonyme pour moi d'une « nouvelle » vie, puisque je quittais de nouveau mon Béarn natal pour venir m'installer dans le grand nord, à Louvain la Neuve...en Belgique. J'y ai découvert au travers de mes relations professionnelles et privées, qui se sont bien souvent mélangées, des gens accueillants, chaleureux et qui heureusement pour moi, aimaient tout particulièrement mon accent aux airs de vacances.

Je commence tout naturellement par te remercier toi, Caroline. Tu m'as permis en me faisant et en me donnant confiance, d'arriver au bout de ce doctorat, dont la réalisation me tenait à cœur. Cette confiance était mutuelle et je suis heureux qu'une de mes premières expériences professionnelles ait pu se dérouler dans ces conditions. Tu as su m'encadrer en orientant mes choix et mes idées, parfois un peu rêveuses, tout en sachant rester à l'écoute et me laissant une liberté d'action importante, m'ayant permise au fil du temps de m'affirmer professionnellement. Tu as su également lire et corriger ces interminables phrases sans virgules tournées à l'envers que je suis malheureusement capable d'écrire et je t'en remercie.

Je voudrais remercier les membres de mon comité d'accompagnement et de jury de thèse, qui m'ont permis par leurs corrections, d'améliorer mon travail et de pousser la réflexion toujours plus loin. Je remercie tout particulièrement Marc Aubinet, Bernard Heinesch, André Granier et Charles De Cannière qui ont joué un rôle important tout au long de ce doctorat, de par leurs précieux conseils, toujours enrichissants, leur aide sur le terrain et leur accessibilité.

Bien entendu, je remercie toutes les institutions et personnes qui ont permis la réalisation financière de ce doctorat. Cette étude a pu être réalisée grâce aux financements de l'Université catholique de Louvain, du Fonds de la Recherche Scientifique (FNRS-FRIA) et de la Région Wallonne. Je remercie également le Département de la Nature et des Forêts (DNF) et ses représentants à Vielsalm, pour nous permettre de mener à bien ces expériences durant tant d'années.

Ah mais que deviendrait la recherche sans tous ces dévoués techniciens à son service ? Réponse...rien ! Un tout tout grand merci Cédric, pour ta motivation, ces bons moments passés à Vielsalm, de jour comme de nuit et les terrains de badminton aussi. Ah le collant pourpre ! Puis ton gout pour les chansons, les jeux de mots et les défis à deux balles, que je partage bien évidemment. Merci à toi Marcelin, maître incontesté de la carotte et d'une précision sans faille. Merci à toi François pour ton aide sur le terrain, faut dire que c'est toujours pratique quand on peut se passer d'une échelle ! Merci Pierre pour l'identification des espèces, c'est à croire que les arbres te parlent. Merci aussi à toi Karine pour ta dextérité à la pelle mécanique et merci aussi à Vincent qui dans le cadre de son mémoire de fin d'étude a mis bien souvent la main à la pâte également. Un grand merci aux techniciens de l'Unité de Physique des Biosystèmes à Gembloux, Michel, Alain, Henri, sans qui, je n'aurais jamais su brancher à temps et correctement tous ces kilomètres de câbles.

Puis il y a aussi les collègues, ces gens avec qui on passe finalement la plupart de notre temps. On ne les a pas choisis, mais malgré tout on doit faire avec ! C'est sans, que je vais avoir du mal à faire désormais, du moins le temps d'en retrouver des tout aussi authentiques. Au sein du bureau C159, variabilité spatiale (Belgique, Algérie, France) et temporelle (on a toujours soupçonné Carlos de venir d'un autre temps) ont été à la source d'une ambiance de confiance, complice, joyeuse et inoubliable, dont nos voisins de cloisons, qui s'avèrent aussi être les responsables d'unité, ont certainement pu profiter maintes fois. Merci Soraya, Raphaële, Steve, Tanguy. Je n'en dirai pas plus, la première règle du C159 c'est de ne jamais dire ce qui se passe au sein du C159 ! Ni en dehors d'ailleurs. Puis il y en a d'autres, heureusement

qu'ils ne sont pas dans le bureau, mais on les aime quand même tout autant. Merci Mr Baudry pour toutes ces bonnes blagues et les coups de main à droite à gauche. Merci Pitchoun pour ton amitié. Tu me prends pour un Basque et tu es en moitié Corse, mais malgré tout on n'a pas eu de « penne » à s'entendre ! Merci Alex, toi tu aurais pu venir dans le bureau par contre, pas comme les deux autres. Puis merci à toi Mathieu pour ton aide, les équations te parlent tellement plus qu'à moi. La liste est encore longue et je vous remercie tous pour l'accueil que j'ai reçu, les services tant professionnels que personnels, l'ambiance quotidienne respectueuse et amicale, les tartes à la pause et les midis sportifs. Je réserve au passage une place pour la prochaine édition de la foire de Libramont avec tous les « Alberts » et pour la finale de volleyball inter-unités !

Merci également à toutes les personnes et équipes de l'UCL ou d'autres institutions qui ont participées au bon déroulement de ce doctorat par le prêt de matériels, de conseils et d'un accueil toujours agréable. Je pense particulièrement à Sylvie La Spina et à Jean-Marc Molenberg et leur unité (LUBIES, ULB), à nos collègues d'ELIE du génie rural, Sébastien Lambot, Frédéric André, Mathieu Javaux, Nicolas Feltz, l'unité de géomatique, ou encore au groupe de physiologie végétale au sein du pôle ELIA.

Mes pensées vont forcément vers mes parents que je tiens en grande partie responsables du fait que ma vie se passe bien depuis toutes ces années. Un merci n'est pas suffisant. Cette réussite c'est à eux que je la dois et pour autant qu'ils soient fiers de moi, ils peuvent être fiers d'eux. Puis je les remercie et au nom de mes amis aussi, pour ces fameux bocaux « made in Assat » qui m'ont permis d'acquérir si facilement les grâces des plus gourmands ! Une pensée également pour mes sœurs, Stéphane et tous mes neveux et nièces, tous plus beaux les uns que les autres et à l'ensemble de ma famille que je prends toujours autant de plaisir à retrouver quand est venu le temps de faire un tour au pays.

Merci à mes amis, ceux qui sont loin mais avec lesquels on ne compte plus les années et qui d'une seule pensée vous donnent le sourire aux lèvres. Olive, Hassna, les Assatois, Nico, Morgane, Annabelle, Clément, Marine, Titia, Mouit, les copains du Mali et tous les autres. La liste est longue également et merci à vous tous qui êtes passé me voir de temps en temps ou que j'ai eu le plaisir de retrouver aux quatre coins de la France. Puis, il y a ceux que j'ai rencontré ici, avec qui j'ai vécu pour la plupart et qui au jour le jour, comme mes collègues, ont su m'apporter un cadre familial, m'intégrer dans leur vie et même me faire penser quelque fois à rester dans le coin et abandonner définitivement mes si belles montagnes. Merci Anne-Mich, Pierre, Lucie, Greg, Amaury et tous les autres, ne vous inquiétez pas je viendrai passer mes vacances en Belgique chez vous !

Merci pour tout P'tit Paulet, c'est le moins que je puisse dire et merci à ta famille. Et enfin merci à toi Manel. J'ai pu compter sur toi sans limite depuis mon arrivée en Belgique. On aimait se dire une famille. Malheureusement tu n'es plus là pour lire ces quelques lignes. Tu as été un exemple de vie pour moi et pour bien d'autres, naturellement et profondément gentille, intelligente, sans préjugé, déterminée, combative et souriante. Tout ce travail je te le dédie de tout mon cœur.

SOMMAIRE

LISTE DES ACRONYMES ET SYMBOLES	1
---------------------------------------	---

INTRODUCTION ET OBJECTIFS	1
---------------------------------	---

Introduction.....	1
Objectifs.....	5

I.BIBLIOGRAPHIE	9
-----------------------	---

I.1. Bilan hydrique et ETR en peuplements forestiers.....	10
I.2. L'évapotranspiration potentielle, ETP	12
I.3. L'eddy covariance	14
I.4. La transpiration des espèces ligneuses	19
I.4.1. Transport de l'eau dans l'arbre	19
I.4.2. Les mesures des flux d'eau dans l'arbre.....	24
I.4.3. La méthode de dissipation thermique : principes, limites et alternatives	26
I.4.3.1. Coefficients de calibration	27
I.4.3.2. Détermination du $\Delta T_{\max}$	28
I.4.3.3. Influence du gradient naturel de chaleur.....	30
I.4.3.4. Intensité et direction des flux	31
I.4.3.5. Extrapolation des mesures à l'échelle de l'arbre et du peuplement	31
I.5. L'interception et les écoulements le long des troncs	32
I.6. L'eau dans le sol : la réserve en eau	36
I.6.1. Réserve utile (RU) du sol et réserve en eau disponible pour les plantes (R_t)	36
I.6.2. Evaluation de la capacité au champ.....	40
I.6.3. La réserve en eau disponible relative (REW)	40
I.6.4. Modèle BILJOU©	41
I.6.5. Le drainage.....	42

I.7.	Les sécheresses : conséquences physiologiques et adaptations ...	43
I.8.	Les espèces ligneuses	47
I.8.1.	Taxonomie et caractères morphologiques	47
I.8.2.	Phénologie	49
I.8.3.	Aires de répartition.....	50
I.8.4.	Sensibilités et changements climatiques	51

II.MATERIELS & METHODES 55

II.1.	Le site d'étude : présentation et contexte scientifique.....	56
II.1.1.	Localisation, caractéristiques du site et des peuplements	56
II.1.2.	Eddy covariance : flux de carbone.....	61
II.1.2.1.	Flux de carbone et discrimination des espèces	61
II.1.3.	Données météorologiques.....	68
II.1.3.1.	Période 1998-2009.....	70
II.1.3.2.	Période 2009-2011.....	73
II.2.	Présentation générale des mesures utilisées dans cette étude.....	76
II.3.	Surface d'aubier et surface foliaire	79
II.3.1.	Surface d'aubier.....	79
II.3.2.	Indice de surface foliaire (LAI) et de végétation (VAI)	80
II.3.2.1.	Capteurs PAR	80
II.3.2.2.	LAI2200	81
II.3.2.3.	Bacs à litière	83
II.4.	La transpiration des espèces ligneuses	83
II.4.1.	Densité de flux de sève	84
II.4.1.1.	Méthodologie	84
II.4.1.2.	Puissance fournie et calibration des capteurs	87
II.4.2.	La transpiration par arbre	94
II.4.2.1.	Profil radial de densité de flux de sève.....	95
II.4.2.2.	Calcul de la transpiration par arbre	97
II.4.3.	Transpiration du peuplement	98

II.5.	L'interception et les écoulements le long des troncs	103
II.5.1.	Pluvioléssivats.....	103
II.5.2.	Écoulements le long des troncs	105
II.5.3.	L'interception.....	105
II.6.	L'eau dans le sol : la réserve en eau utile.....	106
II.6.1.	Profondeur de sol	108
II.6.2.	Profondeur et densité racinaire	109
II.6.3.	Les horizons du sol	110
II.6.4.	Les pF caractéristiques.....	111
II.6.5.	Les teneurs en eau volumique du sol	113
II.6.6.	Évaluation de RU, R_t et REW	118
II.7.	Méthodes d'évaluation de l'ETR	119
II.7.1.	L'eddy covariance	121
II.7.2.	La méthode analytique.....	123
II.7.3.	La méthode du bilan hydrique du sol	125
II.7.3.1.	Le drainage	125
II.7.3.2.	La méthode du bilan hydrique du sol (ETR_{sol}).....	125
II.7.4.	Modèle de bilan hydrique forestier BILJOU©	126
II.7.4.1.	Les entrées du modèle	126
II.7.4.2.	Les paramètres	127
II.7.4.3.	Les sorties du modèle.....	128
II.7.5.	Récapitulatif des grandeurs construites et comparées pour l'évaluation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	130
III.CARACTERISATION DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES RESERVES UTILES DU SOL (RU) ET DES RESERVES EN EAU DISPONIBLE (R_t)		
.....		133
III.1.	Caractéristiques du sol.....	134
III.1.1.	La profondeur de sol	134
III.1.2.	La profondeur racinaire.....	138
III.1.3.	Les teneurs en eau caractéristiques du sol	141
III.1.3.1.	Résultats obtenus en laboratoire : les courbes de rétention en eau	141
III.1.3.2.	Optimisation des résultats	142
III.1.3.3.	Densité du sol et densité racinaire.....	146

III.1.4. La charge caillouteuse.....	147
III.1.5. Les teneurs en eau volumique du sol	147
III.1.5.1. Variabilité spatio-temporelle des mesures de teneur en eau volumique du sol.....	148
III.1.5.2. Teneurs en eau volumique du sol journalières : intégration de la variabilité spatiale sur les mesures en continu	153
III.1.5.3. Capacité au champ	158
III.2. Réserves utiles du sol (R_U), en eau disponible (R_t) et relatives (REW), mesurées et modélisées.....	162
III.2.1. Réserves utiles du sol (R_U)	162
III.2.2. Les réserves en eau disponible (R_t) et les réserves en eau relatives (REW).....	164
III.2.3. Modélisation de la réserve en eau disponible du sol ($B.R_t$) avec le modèle BILJOU©	168
IV. TRANSPIRATION DES ESPECES LIGNEUSES ET VARIABLES ASSOCIEES	177
IV.1. Surface d'aubier et surface foliaire	178
IV.1.1. Surface d'aubier.....	178
IV.1.2. Surface foliaire.....	179
IV.2. Accroissement journalier en circonférence.....	183
IV.3. Mesure des flux transpiratoires	185
IV.3.1. Densités de flux de sève.....	186
IV.3.1.1. Calibration des capteurs saisonniers (UP) et test de la puissance fournie en 2011	186
IV.3.1.2. Calibration des capteurs saisonnier en 2010	193
IV.3.1.3. Densités de flux de sève calibrées.....	194
IV.3.2. La transpiration.....	199
IV.3.2.1. Profil radial de densité de flux de sève chez le douglas ...	199
IV.3.2.2. Transpiration des sous-peuplements	204
IV.4. Modélisation des flux transpiratoires par BILJOU©.....	207
IV.4.1. Période 2010-2011.....	207
IV.4.2. Période 1998-2011	211

V.EVALUATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR)..... 217

V.1.	La méthode par eddy covariance (ET).....	218
V.1.1.	Analyse d'ET : variabilité interannuelle et changement de la tour	219
V.1.2.	Analyse d'ET : distinction de la provenance des flux.....	228
V.2.	La méthode analytique (ETR).....	230
V.2.1.	Pluiolessivats, écoulements le long des troncs et interception de la pluviométrie incidente	231
V.2.2.	L'ETR.....	236
V.3.	La méthode du bilan hydrique du sol (ETR_{SOL}).....	238
V.4.	Inter-validation des méthodes d'estimation de l'ETR.....	240
V.4.1.	Comparaisons sur la période 2010-2011	241
V.4.1.1.	Jours sans pluie.....	242
V.4.1.2.	Tous les jours : prise en compte de l'interception	244
V.4.1.3.	Inter-validation avec l' ETR_{SOL}	245
V.4.1.4.	Flux d'ETR saisonniers	247
V.4.2.	Comparaisons sur la période 1998-2011	250
V.4.3.	Validations d'ET : quelles conditions et quelles périodes ?.....	253

VI.DISCUSION GENERALE ET PERSPECTIVES..... 259

VI.1.	Discussion générale	260
VI.1.1.	Méthodologie : quelle erreur au bout de la chaîne ?	260
VI.1.1.1.	La méthode analytique.....	262
VI.1.1.2.	Le bilan hydrique du sol.....	267
VI.1.1.3.	L'eddy covariance.....	270
VI.1.1.4.	La modélisation	270
VI.1.2.	Quelles différences entre espèces ?	271
VI.1.3.	Vielsalm : un site « épargné » par la sécheresse de 2003 ?	274
VI.1.4.	L'année 2011 : une autre année potentiellement stressante.....	277
VI.1.5.	Des risques de perte de productivité et/ou de dépérissement ? ..	281
VI.2.	Perspectives	283

ANNEXES..... 287

Annexe 1 : Représentativité spatiale des capteurs PAR et du LAI2200 ...	288
Annexe 2 : Les horizons du sol.....	289
Annexe 3 : Images GPR	291
Annexe 4 : Teneurs en eau volumique du sol $\theta.m_H$ et $\theta.m_D$	292
Annexe 5 : Prise en compte de la variabilité spatiale des teneurs en eau du sol pour le calcul de la RU	293
Annexe 6 : Variables climatiques et évapotranspiration potentielle (ETP).....	295
Annexe 7 : Accroissement radial des espèces	303
Annexe 8 : Inter-validations des méthodes de mesures d'accroissement radial	316
Annexe 9 : Calibrations des capteurs de flux de sève en 2010.....	319
Annexe 10 : ETR analytique mensuelle.....	322
Annexe 11 : Inter-validations des méthodes d'estimation de l'ETR	323
Annexe 12 : Relations largeurs de cernes et flux de carbone	327
Annexe 13 : L'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE)	329

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 333

Correspondance entre Dates et DOY pour les années non bissextiles

Janvier	DOY	Fév.	DOY	Mars	DOY	Avril	DOY	Mai	DOY	Juin	DOY
1	1	1	32	1	60	1	91	1	121	1	152
2	2	2	33	2	61	2	92	2	122	2	153
3	3	3	34	3	62	3	93	3	123	3	154
4	4	4	35	4	63	4	94	4	124	4	155
5	5	5	36	5	64	5	95	5	125	5	156
6	6	6	37	6	65	6	96	6	126	6	157
7	7	7	38	7	66	7	97	7	127	7	158
8	8	8	39	8	67	8	98	8	128	8	159
9	9	9	40	9	68	9	99	9	129	9	160
10	10	10	41	10	69	10	100	10	130	10	161
11	11	11	42	11	70	11	101	11	131	11	162
12	12	12	43	12	71	12	102	12	132	12	163
13	13	13	44	13	72	13	103	13	133	13	164
14	14	14	45	14	73	14	104	14	134	14	165
15	15	15	46	15	74	15	105	15	135	15	166
16	16	16	47	16	75	16	106	16	136	16	167
17	17	17	48	17	76	17	107	17	137	17	168
18	18	18	49	18	77	18	108	18	138	18	169
19	19	19	50	19	78	19	109	19	139	19	170
20	20	20	51	20	79	20	110	20	140	20	171
21	21	21	52	21	80	21	111	21	141	21	172
22	22	22	53	22	81	22	112	22	142	22	173
23	23	23	54	23	82	23	113	23	143	23	174
24	24	24	55	24	83	24	114	24	144	24	175
25	25	25	56	25	84	25	115	25	145	25	176
26	26	26	57	26	85	26	116	26	146	26	177
27	27	27	58	27	86	27	117	27	147	27	178
28	28	28	59	28	87	28	118	28	148	28	179
29	29			29	88	29	119	29	149	29	180
30	30			30	89	30	120	30	150	30	181
31	31			31	90			31	151		
Juillet	DOY	Août	DOY	Sept.	DOY	Oct.	DOY	Nov.	DOY	Déc.	DOY
1	182	1	213	1	244	1	274	1	305	1	335
2	183	2	214	2	245	2	275	2	306	2	336
3	184	3	215	3	246	3	276	3	307	3	337
4	185	4	216	4	247	4	277	4	308	4	338
5	186	5	217	5	248	5	278	5	309	5	339
6	187	6	218	6	249	6	279	6	310	6	340
7	188	7	219	7	250	7	280	7	311	7	341
8	189	8	220	8	251	8	281	8	312	8	342
9	190	9	221	9	252	9	282	9	313	9	343
10	191	10	222	10	253	10	283	10	314	10	344
11	192	11	223	11	254	11	284	11	315	11	345
12	193	12	224	12	255	12	285	12	316	12	346
13	194	13	225	13	256	13	286	13	317	13	347
14	195	14	226	14	257	14	287	14	318	14	348
15	196	15	227	15	258	15	288	15	319	15	349
16	197	16	228	16	259	16	289	16	320	16	350
17	198	17	229	17	260	17	290	17	321	17	351
18	199	18	230	18	261	18	291	18	322	18	352
19	200	19	231	19	262	19	292	19	323	19	353
20	201	20	232	20	263	20	293	20	324	20	354
21	202	21	233	21	264	21	294	21	325	21	355
22	203	22	234	22	265	22	295	22	326	22	356
23	204	23	235	23	266	23	296	23	327	23	357
24	205	24	236	24	267	24	297	24	328	24	358
25	206	25	237	25	268	25	298	25	329	25	359
26	207	26	238	26	269	26	299	26	330	26	360
27	208	27	239	27	270	27	300	27	331	27	361
28	209	28	240	28	271	28	301	28	332	28	362
29	210	29	241	29	272	29	302	29	333	29	363
30	211	30	242	30	273	30	303	30	334	30	364
31	212	31	243			31	304			31	365

Correspondance entre Dates et DOY pour les années bissextiles (2000, 2004, 2008)

Janvier	DOY	Fév.	DOY	Mars	DOY	Avril	DOY	Mai	DOY	Juin	DOY
1	1	1	32	1	61	1	92	1	122	1	153
2	2	2	33	2	62	2	93	2	123	2	154
3	3	3	34	3	63	3	94	3	124	3	155
4	4	4	35	4	64	4	95	4	125	4	156
5	5	5	36	5	65	5	96	5	126	5	157
6	6	6	37	6	66	6	97	6	127	6	158
7	7	7	38	7	67	7	98	7	128	7	159
8	8	8	39	8	68	8	99	8	129	8	160
9	9	9	40	9	69	9	100	9	130	9	161
10	10	10	41	10	70	10	101	10	131	10	162
11	11	11	42	11	71	11	102	11	132	11	163
12	12	12	43	12	72	12	103	12	133	12	164
13	13	13	44	13	73	13	104	13	134	13	165
14	14	14	45	14	74	14	105	14	135	14	166
15	15	15	46	15	75	15	106	15	136	15	167
16	16	16	47	16	76	16	107	16	137	16	168
17	17	17	48	17	77	17	108	17	138	17	169
18	18	18	49	18	78	18	109	18	139	18	170
19	19	19	50	19	79	19	110	19	140	19	171
20	20	20	51	20	80	20	111	20	141	20	172
21	21	21	52	21	81	21	112	21	142	21	173
22	22	22	53	22	82	22	113	22	143	22	174
23	23	23	54	23	83	23	114	23	144	23	175
24	24	24	55	24	84	24	115	24	145	24	176
25	25	25	56	25	85	25	116	25	146	25	177
26	26	26	57	26	86	26	117	26	147	26	178
27	27	27	58	27	87	27	118	27	148	27	179
28	28	28	59	28	88	28	119	28	149	28	180
29	29	29	60	29	89	29	120	29	150	29	181
30	30			30	90	30	121	30	151	30	182
31	31			31	91			31	152		
Juillet	DOY	Août	DOY	Sept.	DOY	Oct.	DOY	Nov.	DOY	Déc.	DOY
1	183	1	214	1	245	1	275	1	306	1	336
2	184	2	215	2	246	2	276	2	307	2	337
3	185	3	216	3	247	3	277	3	308	3	338
4	186	4	217	4	248	4	278	4	309	4	339
5	187	5	218	5	249	5	279	5	310	5	340
6	188	6	219	6	250	6	280	6	311	6	341
7	189	7	220	7	251	7	281	7	312	7	342
8	190	8	221	8	252	8	282	8	313	8	343
9	191	9	222	9	253	9	283	9	314	9	344
10	192	10	223	10	254	10	284	10	315	10	345
11	193	11	224	11	255	11	285	11	316	11	346
12	194	12	225	12	256	12	286	12	317	12	347
13	195	13	226	13	257	13	287	13	318	13	348
14	196	14	227	14	258	14	288	14	319	14	349
15	197	15	228	15	259	15	289	15	320	15	350
16	198	16	229	16	260	16	290	16	321	16	351
17	199	17	230	17	261	17	291	17	322	17	352
18	200	18	231	18	262	18	292	18	323	18	353
19	201	19	232	19	263	19	293	19	324	19	354
20	202	20	233	20	264	20	294	20	325	20	355
21	203	21	234	21	265	21	295	21	326	21	356
22	204	22	235	22	266	22	296	22	327	22	357
23	205	23	236	23	267	23	297	23	328	23	358
24	206	24	237	24	268	24	298	24	329	24	359
25	207	25	238	25	269	25	299	25	330	25	360
26	208	26	239	26	270	26	300	26	331	26	361
27	209	27	240	27	271	27	301	27	332	27	362
28	210	28	241	28	272	28	302	28	333	28	363
29	211	29	242	29	273	29	303	29	334	29	364
30	212	30	243	30	274	30	304	30	335	30	365
31	213	31	244			31	305			31	366

LISTE DES ACRONYMES ET SYMBOLES

A : énergie disponible

a et b : coefficients de calibration de l'équation développée par Granier (1985) pour les capteurs TD

B.Dr : drainage modélisé par BILJOU©

B.ETu : évapotranspiration du sol et du sous-bois modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D), pour le calcul de RU moyen

B.ETR.i_H ou _D ou _P : évapotranspiration réelle modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H), les douglas (_D) ou le peuplement mixte (_P; à l'échelle de la parcelle C100), pour le calcul de RU inférieur

B.ETR.m_H ou _D ou _P : évapotranspiration réelle modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H), les douglas (_D) ou le peuplement mixte (_P; à l'échelle de la parcelle C100), pour le calcul de RU moyen

B.ETR.s_H ou _D ou _P : évapotranspiration réelle modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H), les douglas (_D) ou le peuplement mixte (_P; à l'échelle de la parcelle C100), pour le calcul de RU supérieur

B.In.i_H ou _D ou _P : interception modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H), les douglas (_D) ou le peuplement mixte (_P; à l'échelle de la parcelle C100), pour le calcul de RU inférieur

B.In.m_H ou _D ou _P : interception modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H), les douglas (_D) ou le peuplement mixte (_P; à l'échelle de la parcelle C100), pour le calcul de RU moyen

B.In.s_H ou _D ou _P : interception modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H), les douglas (_D) ou le peuplement mixte (_P; à l'échelle de la parcelle C100), pour le calcul de RU supérieur

B.REW : réserve en eau disponible relative du sol modélisée par BILJOU©

B.REW.m_H 1/2 Ps : réserve en eau disponible relative du sol modélisée par BILJOU© pour les hêtres et modifiée pour des périodes données en fixant l'eau drainée à la moitié de la pluviométrie arrivant au sol

B.R_t : réserve en eau disponible du sol modélisée par BILJOU©

B.R_t.m_H 1/2 Ps : réserve en eau disponible du sol modélisée par BILJOU© pour les hêtres et modifiée pour des périodes données en fixant l'eau drainée à la moitié de la pluviométrie arrivant au sol

B.T.i_H ou _D ou _P : transpiration modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H), les douglas (_D) ou le peuplement mixte (_P; à l'échelle de la parcelle C100), pour le calcul de RU inférieur

B.T.m_H ou _D ou _P : transpiration modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H), les douglas (_D) ou le peuplement mixte (_P; à l'échelle de la parcelle C100), pour le calcul de RU moyen

B.T.s_H ou _D ou _P : transpiration modélisée par BILJOU© pour les hêtres (_H), les douglas (_D) ou le peuplement mixte (_P; à l'échelle de la parcelle C100), pour le calcul de RU supérieur

C130 : circonférence des arbres à 1m30

Capteur mobile : capteur TD installé ponctuellement pour la mesure du profil radial de densité de flux de sève des douglas

Capteur ref : capteurs TD installés en routine durant la saison

Capteur sud : capteurs TD installés ponctuellement pour la mesure du profil azimutal de densité de flux de sève des douglas

cc : charge caillouteuse du sol

CS615 : capteur de mesure de la teneur en eau du sol de type réflectomètre placé dans les fosses SWC (caractérisation de la variabilité temporelle)

DI : écoulements latéraux

Dr : drainage

eo(T) : pression de vapeur d'eau à saturation à la température de la surface évaporante

ea(T) : pression de vapeur d'eau effective

ET : évapotranspiration mesurée par eddy covariance correspondant à LE

ETu : évapotranspiration du sol et du sous-bois

ET corrigée : ET mesurée par eddy covariance corrigée pour les jours pluvieux

ETP : évapotranspiration potentielle

ETR : évapotranspiration réelle

ETR_D : évapotranspiration réelle mesurée par la méthode analytique pour les douglas

ETR_H : évapotranspiration réelle mesurée par la méthode analytique pour les hêtres

Acronymes et symboles

ETR_{P1} : évapotranspiration réelle mesurée par la méthode analytique pour le peuplement mixte à l'échelle de la Parcelle C100 sans utilisation du modèle de footprint

ETR_{P2} : évapotranspiration réelle mesurée par la méthode analytique pour le peuplement mixte à l'échelle de la Parcelle C100 avec le modèle de footprint

ETR_{SOL} : évapotranspiration réelle mesurée par la méthode du bilan hydrique du sol

ETR_{SOL,D} : évapotranspiration réelle mesurée par la méthode du bilan hydrique du sol pour les douglas

ETR_{SOL,H} : évapotranspiration réelle mesurée par la méthode du bilan hydrique du sol pour les hêtres

Eu : évaporation du sol

FC_{HF} : facteur de correction des mesures d'ET à haute fréquence

G : stockage de chaleur dans le sol

GPP : production primaire brute (Gross Primary Production)

GPR : système de mesure radar (Ground Penetrating Radar)

h : hauteur des horizons

H : flux de chaleur sensible ($W.m^{-2}$)

HFD : méthode de mesure de flux de sève Heat Field Deformation

HPV : méthode de mesure de flux de sève Heat Pulse Velocity

HR : humidité relative de l'air

Hz : horizons pédologiques du sol

IC : indice de croissance

In : interception

In_D : interception mesurée pour les douglas à l'échelle de la Parcelle témoin

In_H : interception mesurée pour les hêtres à l'échelle de la Parcelle témoin

In_P : interception mesurée pour le peuplement mixte à l'échelle de la Parcelle C100

In_{P1} : interception mesurée pour le peuplement mixte à l'échelle de la Parcelle C100 sans utilisation du modèle de footprint

In_{P2} : interception mesurée pour le peuplement mixte à l'échelle de la Parcelle C100 avec le modèle de footprint

In.mod_D : interception journalière moyenne modélisée à partir des mesures pour les douglas

In.mod_H : interception journalière moyenne modélisée à partir des mesures pour les hêtres

INRA (capteur) : capteur TD de fabrication originale fournit par l'INRA

is : indice de stress annuel calculé par BILJOU®

k : coefficient d'extinction de la lumière

K : index de flux

I (I₁ et I₂) : largeur de cerne mesurée sur chaque carotte prélevée

L : largeur de cerne moyenne calculée à partir des 2 carottes prélevées sur chaque arbre

LAI : Index de surface foliaire (Leaf Area Index)

LAI_{max} : Index de surface foliaire maximum

LAI2200 : appareil de mesure du LAI

LE : flux de chaleur latente

Lp : valeurs prédites des largeurs de cernes dans l'étape de standardisation des données

Mh : Masse humide du sol

Ms : Masse sèche du sol

NE : secteur nord-est

NE(2) : secteur sud-ouest pris en compte dans Renchon (2013)

NEE : production nette de l'écosystème instantanée (Net Ecosystem Exchange)

NEP : production nette de l'écosystème (Net Ecosystem Production)

NPP : production primaire nette (Net Primary Production)

p : proportion de la surface d'aubier des arbres de chaque classe par rapport à la surface d'aubier totale du peuplement

PAR : rayonnement photosynthétiquement actif (Photosynthetically Active Radiation)

Parcelle C100 : parcelle délimitant un cercle d'un rayon de 100 m, centré sur la tour d'eddy covariance

Parcelle Témoin : parcelle d'environ 1 ha, rectangulaire, comprenant la tour d'eddy covariance

pF.H : fosse de prélèvement d'échantillons de sol sous les hêtres

Acronymes et symboles

pF.D : fosse de prélèvement d'échantillons de sol sous les douglas

Pi : précipitation incidente

PI : pluviolessivats

PI_D : pluviolessivats moyens du sous-peuplement de douglas

PI_A : pluviolessivats mesurés par le pluviomètre à auget basculant relié à la centrale d'acquisition

PI_H : pluviolessivats moyens du sous-peuplement de hêtres

PI_P : pluviolessivats moyens du peuplement

PLC : pourcentage de perte de conductivité

PLC50% : potentiel hydrique pour lequel la perte de conductivité est de 50 %

PPFD : densité de flux de photons (Photosynthetic Photon Flux Density)

Prob.>Itl : p value associée au résultat du test de Student

Prob.>IZl : p value associée au résultat du test de Wilcoxon

Ps : pluie au sol

Pt : écoulements le long du tronc

R : rapport entre le capteur mobile ou sud et le capteur de référence

Ra : respiration autotrophe

Rac.H1 et H.2 : fosses de comptage racinaire sous les hêtres

Rac.D1 et D2 : fosses de comptage racinaire sous les douglas

REW : réserve en eau disponible relative du sol

REW.m_H ou D : calcul moyen de réserve en eau disponible relative pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D)

REW.i_H ou D : calcul inférieur de réserve en eau disponible relative pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D)

REW.s_H ou D : calcul supérieur de réserve en eau disponible relative pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D)

Rg : rayonnement global

Rn : rayonnement net

RU : réserve utile du sol

R_t : réserve en eau disponible du sol pour les plantes

RU.i_H ou D : calcul inférieur de réserve utile pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D)

R_t.i_H ou D : calcul inférieur de réserve en eau disponible pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D)

RU.m_H ou D : calcul moyen de réserve utile pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D)

R_t.m_H ou D : calcul moyen de réserve en eau disponible pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D)

RU.s_H ou _D : calcul supérieur de réserve utile pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D)

RU_t.s_H ou _D : calcul supérieur de réserve en eau disponible pour les hêtres (_H) ou les douglas (_D)

S : terme regroupant le stockage de chaleur dans l'air (sensible et latente) et dans la biomasse

SA : surface terrière d'aubier des peuplements

SA_c : surface terrière d'aubier corrigée des peuplements en fonction de leur profil radial de densité de flux de sève

S_T : surface terrière des peuplements

SE : secteur sud-est

SFD : densité de flux de sève (Sap Flux Density)

SFD_m : densité de flux sève moyenne par classe de circonférence par espèce ou groupe d'espèces

SHB : méthode de mesure de flux de sève Stem Heat Balance

SLA : surface de feuille spécifique (Specific Leaf Area)

Système PR2 (ou PR2) : capteur de mesure de la teneur en eau du sol de type réflectomètre à partir de tubes répartis sur l'ensemble de la Parcelle témoin (caractérisation de la variabilité spatiale)

SW : secteur sud-ouest

SW(2) : secteur sud-ouest pris en compte dans Renchon (2013)

SWC.H : fosse contenant les réflectomètres CS615 sous les hêtres

SWC.D : fosse contenant les réflectomètres CS615 sous les douglas

SWC.T : fosse contenant les réflectomètres CS615 à la transition des hêtres et des douglas

t : résultat du test statistique de Student

T : transpiration à l'échelle du peuplement mesurée par la méthode de dissipation thermique

T_{CM} : transpiration du sous-peuplement « conifères mixte » calculée à partir de l'inventaire de la Parcelle C100

T_D : transpiration des douglas calculée à partir de l'inventaire de la Parcelle C100

T_H : transpiration des hêtres calculée à partir de l'inventaire de la Parcelle C100

T_P : transpiration du peuplement mixte calculée à partir de l'inventaire de la Parcelle C100

T_{P1} : transpiration du peuplement mixte calculée à partir de l'inventaire de la Parcelle C100 sans utilisation du modèle de footprint

Acronymes et symboles

T_{P2} : transpiration du peuplement mixte calculée à partir de l'inventaire de la Parcelle C100 avec le modèle de footprint

T_a : température de l'air

TD : capteur de flux de sève à dissipation thermique

TDR : Time domain reflectometry

TER : respiration de l'écosystème (Total Ecosystem Respiration)

THB : méthode de mesure de flux de sève Trunk Heat Balance

Tu : transpiration du sous-bois

U₂ : vitesse de vent à 2 m

UP_{saison} : capteurs TD installés en routine durant la saison 2011

UP_{0.26 W} : capteurs TD installés en routine durant la saison 2010 ayant reçus une puissance de 0.26 W

UP_{0.26 W} corrigé : capteurs TD installés ponctuellement durant la saison 2011 ayant reçus une puissance de 0.26 W et corrigés pour correspondre à des capteurs recevant une puissance de 0.2 W

UPB : Unité de Physique des Biosystèmes

VAI : Index de surface de végétation (Vegetation Area Index)

VPD : déficit de saturation en vapeur d'eau (Vapour Pressure Deficit)

VPD_{1...i} : classes de VPD de 1 à i

Vs : Volume de l'échantillon de sol

wd : direction du vent à hauteur de mesure

ws : vitesse du vent horizontale à hauteur de mesure

WUE : efficience d'utilisation de l'eau (Water Use Efficiency)

Xr : rayon moyen des 3 douglas échantillonnés afin de déterminer leur profil de densité de flux de sève

Z : résultat du test statistique de Wilcoxon

ps : masse volumique apparente du sol

pw : masse volumique de l'eau

ρ_{rac} : densité racinaire

θ : teneur en eau volumique

θ_{CS615H} : teneur en eau volumique moyenne pour les hêtres mesurée par les CS615

θ_{cs615_D} : teneur en eau volumique moyenne pour les douglas mesurée par les CS615

θ_{i_H} ou θ_D : calcul inférieur de la teneur en eau volumique pour les hêtres ($_H$) ou les douglas ($_D$)

θ_{m_H} ou θ_D : calcul moyen de la teneur en eau volumique pour les hêtres ($_H$) ou les douglas ($_D$)

θ_{pr2_H} : teneur en eau volumique moyenne pour les hêtres mesurée par le système PR2 tous les 15 jours

θ_{pr2_D} : teneur en eau volumique moyenne pour les douglas mesurée par le système PR2 tous les 15 jours

θ_{s_H} ou θ_D : calcul supérieur de la teneur en eau volumique pour les hêtres ($_H$) ou les douglas ($_D$)

$\theta_{15.i_H}$ ou θ_D : intervalle de confiance inférieur bimensuel calculé à partir des valeurs de θ_{cs615} et θ_{pr2} , pour les hêtres ($_H$) ou les douglas ($_D$)

$\theta_{15.m_H}$ ou θ_D : moyenne bimensuelle calculée à partir des valeurs de θ_{cs615} et θ_{pr2} , pour les hêtres ($_H$) ou les douglas ($_D$)

$\theta_{15.s_H}$ ou θ_D : intervalle de confiance supérieur bimensuel calculé à partir des valeurs de θ_{cs615} et θ_{pr2} , pour les hêtres ($_H$) ou les douglas ($_D$)

θ_{FC} : teneur en eau volumique du sol à la capacité au champ

θ_{WP} : teneur en eau volumique du sol au point de flétrissement permanent

Δ : la pente de la relation de Clausius-Clapeyron

ΔR_t : Variation journalière de la réserve en eau disponible du sol

ΔT_{max} : écart maximum de température enregistré par les capteurs TD en conditions de flux nul

ΔT : écart de température enregistré par les capteurs TD

$\Delta \theta_{cs615_H}$: variation journalière de la teneur en eau volumique moyenne pour les hêtres mesurée par les CS615

$\Delta \theta_{cs615_D}$: variation journalière de la teneur en eau volumique moyenne pour les douglas mesurée par les CS615

γ : constante psychrométrique

λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau

τ : constante de temps

Ψ : potentiel hydrique

Ψ_b : potentiel hydrique de base

INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Introduction

Les forêts¹ occupent sur la planète 31 % de la superficie totale des terres, représentant un peu plus de 4 milliards d'hectares (FAO, 2010). Leurs fonctions au sein des cycles biogéochimiques, en ce compris ceux du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'eau (H₂O), et les « services » aux sociétés humaines qui en découlent, sont essentiels. À l'échelle de la planète, les surfaces forestières régressent de plusieurs millions d'hectares par an (FAO, 2010), sous l'effet de l'expansion des populations humaines et de leurs activités industrielles, agronomiques et sociales. Les changements climatiques globaux induisent par ailleurs de nouvelles incertitudes.

Ces changements climatiques, principalement dus à l'augmentation des gaz à effets de serre dans l'atmosphère, impliquent à la surface du globe des changements simultanés de variables clés pour la croissance végétale (température) et des cycles biogéochimiques (CO₂ et H₂O). Un réchauffement global de la surface terrestre de 0.85 °C est enregistré durant la période 1880-2012 (GIEC, 2013). Les modèles climatiques, même pour les scénarii les plus optimistes, prédisent une augmentation moyenne de 1 à 3.7 °C de la température de l'air à la surface du globe d'ici 2100 en comparaison à la période 1986-2005 (GIEC, 2013). Les concentrations en CO₂ dans l'atmosphère atteignent quant à elles 391 ppm en 2011 et dépassent alors de 40 % celles de 1750 (GIEC, 2013). Par ailleurs, selon les Modèles de Circulation Globale (GCM) le cycle global de l'eau tend vers une intensification générale (Huntington, 2006). Cela implique des changements au niveau des quantités annuelles et de la variabilité spatiale et temporelle des événements pluvieux (extrêmes plus fréquents), et des formes de précipitations (pluie, neige, brouillard, grêle ; GIEC, 2013 ; Min et al., 2011 ; Seneviratne et al., 2010). Des modifications de régimes hydriques sont déjà

¹ Définition selon la FAO (FAO, 2010): Terres occupant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à cinq mètres et un couvert arboré de plus de dix pour cent, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils *in situ*. Sont exclues les terres à vocation agricole ou urbaine prédominante.

observées à l'échelle globale, comme à l'échelle de l'Europe (Brázdil et al., 2010; GIEC, 2013). Sous nos latitudes, les modèles prédisent en particulier une augmentation tant au niveau de la durée que de l'intensité des sécheresses estivales (GIEC, 2013; Lawlor, 1998; Meehl et Tebaldi, 2004; Saxe et al., 2001; Schar et al., 2004).

Outre la disponibilité en lumière et en nutriments, la productivité des écosystèmes terrestres est fortement influencée par la disponibilité en eau du sol (Huxman et al., 2004). L'analyse de l'évènement climatique extrême de 2003 en Europe en a fait la démonstration sur une large gamme de couverts forestiers (Ciais et al., 2005; Granier et al., 2007) : la sécheresse est le principal facteur influençant la productivité et la mortalité des forêts en Europe. Les processus de transpiration et de photosynthèse sont interdépendants et tous deux limités par la régulation stomatique à l'interface feuille-atmosphère. Cette interdépendance peut se caractériser en outre, par l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE pour Water Use Efficiency), utilisée comme indice de productivité des espèces et/ou des écosystèmes et définie comme le rapport entre un gain de carbone et une perte d'eau. Dans un contexte de changement climatique, il est donc essentiel que le bilan hydrique stationnel (Equation 1) soit favorable au développement des peuplements.

$$\frac{dR_t}{dt} = P_i - ETR - D_r - D_l \quad \text{Equation 1}$$

Dans ce bilan, la variable qui reflète l'effet des essences est l'évapotranspiration réelle (ETR, mm). L'ETR représente l'ensemble des sorties d'eau de l'écosystème, du sol vers l'atmosphère, transitant ou non au travers de la végétation (Equation 2).

$$\text{ETR} = T + \text{In} + \text{ETu} \quad \text{Equation 2}$$

L'ETR se compose de la transpiration des espèces végétales (T, mm), des flux d'interception (In, mm) et des flux d'évapotranspiration du sol et du sous-étage (ETu, mm).

Actuellement, la mesure de l'ETR la plus répandue à l'échelle du peuplement est l'eddy covariance (Aubinet et al., 1999; Baldocchi et al., 2001). Cette méthode consiste à installer des tours à flux en forêt, surplombant la canopée, au sommet desquelles les mesures des flux de carbone (NEE, $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), des flux de vapeur d'eau (ET, mm) et d'énergie, ainsi que celles des variables météorologiques sont organisées. Dans le cadre des études sur l'augmentation en CO_2 de l'atmosphère, cette méthode a été mise en place depuis le début des années 1990 à l'échelle mondiale (Baldocchi et al., 2001), formant désormais le réseau global FluxNet. Cette méthode, initialement conçue pour fonctionner sur de grandes surfaces homogènes, a cependant été mise en place au sein de couverts forestiers hétérogènes, tant dans la hauteur du couvert que dans la composition spécifique. Sur l'ensemble des sites équipés de tours à flux, la mesure des flux de carbone et la répartition entre photosynthèse et respiration ont été validées à partir de cette méthode. La mesure des flux de vapeur d'eau, ou évapotranspiration réelle, souffre par contre encore de lacunes vis-à-vis de sa validation (de Ligne et al., 2010) et relativement peu d'études précisent la répartition des flux entre transpiration et évaporation (Ford et al., 2007; Granier et al., 2000; Oishi et al., 2008; Wilson et al., 2001).

L'analyse et l'interprétation de l'ETR mesurée par eddy covariance (ET, mm) est complexe puisqu'il est nécessaire de décomposer le signal entre les différents flux composant l'ETR. ET est une mesure globale des processus d'évapotranspiration au sein du *continuum* sol-végétation-atmosphère. Pour des sites multi-spécifiques et donc hétérogènes cette complexité s'accroît. Comme le précisent van der Molen et al. (2011), les données acquises à partir des tours à flux et les prédictions à partir des modèles de dynamique de végétation (DVM) résultent d'une approche descendante (top-down) de l'écosystème, ne prenant pas en compte les réponses spécifiques des espèces mais décrivant une réponse moyenne. La

prise en compte de l'hétérogénéité des réponses spécifiques est alors essentielle, d'une part à la validation de la mesure d'ET et d'autre part à une bonne prédiction des risques liés aux changements climatiques. Cela implique aussi d'évaluer précisément les caractéristiques hydrodynamiques et la variabilité spatio-temporelle de la réserve en eau utile du sol, afin de correctement estimer le risque de stress hydrique (Granier et al., 2007).

Outre la méthode d'eddy covariance, l'ETR peut être quantifiée de différentes façons :

- La méthode analytique (Granier et al., 2000; Oishi et al., 2008; Wilson et al., 2001) consiste à mesurer chacune de ses composantes (transpiration des arbres, interception de la pluie et évapotranspiration du sol et du sous-bois, cette dernière variable étant souvent négligée ou estimée de façon indirecte selon l'écosystème) ;
- La méthode du bilan hydrique du sol consiste à déduire l'ETR à partir des variations de réserve en eau disponible du sol pour les plantes (R_t , mm), si la pluviométrie incidente (P_i , mm) et le drainage du sol (D_r , mm) sont connus (Ford et al., 2007; Schwärzel et al., 2009; Unsworth et al., 2004). Les variations de R_t (ΔR_t , mm) sont dépendantes des entrées (P_i) et des sorties d'eau (ETR et D_r) ;
- Par modélisation (Bréda et al., 1995; Granier et al., 1999).

Les différentes méthodes apportent des informations complémentaires permettant la résolution du bilan hydrique stationnel. Chaque flux quantifié, associé à l'un ou l'autre des compartiments du *continuum* sol-végétation-atmosphère, possède sa propre variabilité spatiale et temporelle à l'échelle du peuplement. La mise en commun des différentes méthodes d'évaluation de l'ETR nécessite alors des changements d'échelles spatio-temporels indissociables d'erreurs méthodologiques, mais permettant alors d'obtenir une quantification plus réaliste de l'ETR.

Le site de Vielsalm, sous la gestion de l'unité de Physique des Biosystèmes (UPB, ULg-GxABT), est équipé d'une tour à flux depuis 1996 (Aubinet et al., 2001). En 2009, la tour d'une hauteur initiale de 36 m, a été remplacée pour atteindre 52 m. Quelle que soit la période, avant (1996-2009) ou après (2009-2011) le changement de la tour, ET n'a jamais été validée sur

le site. La tour est placée au milieu d'une forêt mixte, fortement hétérogène, constituée principalement de hêtres (*Fagus sylvatica* L.), de douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), de sapins (*Abies alba* Miller) et d'épicéas (*Picea abies* (L.) Karst). La répartition des espèces autour de la tour permet tout de même de distinguer des zones majoritairement feuillues (hêtres), ou résineuses (douglas ou mixte). Selon la direction du vent la mesure par eddy covariance représente majoritairement l'une ou l'autre de ces zones. Les directions du vent dominantes sont par contre représentatives de conditions climatiques différentes. L'interprétation de la mesure d'ET à Vielsalm est donc complexe, étant soumise à de multiples facteurs de variations. Cependant son analyse et sa validation sont essentielles. En effet, même si le fonctionnement physiologique des espèces ligneuses et les rétroactions avec le climat sont de mieux en mieux compris, les scientifiques mettent toujours en évidence la nécessité d'un réseau de surveillance global à long terme afin de pouvoir améliorer la compréhension des processus et les prédictions vis-à-vis des changements climatiques (Allen et al., 2010; Beier et al., 2012; McDowell et al., 2008; van der Molen et al., 2011). L'acquisition de plus de 15 années de mesures de flux de carbone, d'eau et des conditions météorologiques sur un même site regroupant 2 espèces d'intérêt² en Wallonie, forme une base de données unique. La présence de ces espèces sur une même station permet en outre de s'affranchir des sources de variabilité climatique : l'hypothèse que la variabilité du bilan hydrique stationnel est majoritairement dépendante de « l'effet espèce » peut être posée.

Objectifs

L'objectif principal de l'étude consiste à évaluer, sur le site de Vielsalm, **l'évapotranspiration réelle, ses composantes et sa régulation**, de 1998 à 2011, en distinguant les contributions des espèces principales. Cet

² Le hêtre est la deuxième espèce feuillue (42300 ha, soit 7.8 % de la forêt wallonne; Lecomte et al. (2002)). Le douglas quant à lui, est la deuxième espèce de reboisement en conifère et occupe 10800 ha. La région naturelle de l'Ardenne comptabilise 62.7 % des surfaces forestières wallonnes, dont 69 % des hêtraies et 74 % des douglasaies.

objectif inclus implicitement la **validation** de l'évapotranspiration réelle mesurée **par eddy covariance (ET)**, depuis 1998.

Pour atteindre cet objectif, 2 périodes sont considérées : 2010-2011 et 1998-2008.

Sur la période **2010-2011**, l'évapotranspiration réelle est quantifiée selon les quatre méthodes précédemment citées :

$$\begin{array}{ccccccc}
 ET & = & ETR & = & ETR_{SOL} & = & B.ETR \\
 \Downarrow & & \Downarrow & & \Downarrow & & \Downarrow \\
 ET & = & T + In & = & Pi - Dr - \Delta R_t & = & B.T + B.In + B.ETu \\
 \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} \\
 \text{eddy covariance} & & \text{analytique} & & \text{bilan sol} & & \text{Modélisation} \\
 & & & & & & \text{(BILJOU®)}
 \end{array}$$

Pour cela, les étapes suivantes sont nécessaires :

1. La caractérisation de la variabilité spatio-temporelle de R_t ;
2. La caractérisation de l'ETR (composantes et régulation) des espèces principales par la méthode analytique et par la méthode du bilan hydrique du sol ;
3. La validation de ET (eddy covariance) en comparaison à la méthode analytique (ETR) et à la méthode du bilan hydrique du sol (ETR_{SOL}) ;
4. La paramétrisation du modèle de bilan hydrique BILJOU® sur le site.

Pour la période **1998-2008**, n'ayant pas les données nécessaires pour appliquer les méthodes analytique et de bilan hydrique du sol, la validation d'ET est effectuée en comparaison aux sorties du modèle BILJOU®. Celui-ci, paramétré pour le site de Vielsalm en 2010-2011, est utilisé en rétrospectif sur la période 1998-2008.

Afin d'améliorer l'analyse d'éventuels phénomènes de régulation de l'ETR et des conséquences sur les peuplements forestiers, différents indicateurs d'allocation de carbone sont utilisés au travers de l'étude, en fonction des espèces. Il s'agit :

- Des flux de carbone mesurés par eddy covariance (1998-2008) ;
- Des largeurs de cernes déterminées par dendrochronologie (1998-2011) ;
- Des accroissements en circonférences journaliers des espèces ligneuses (2010-2011).

Les Chapitres I et II reprennent respectivement une analyse bibliographique et l'ensemble des matériels et méthodes concernant cette étude.

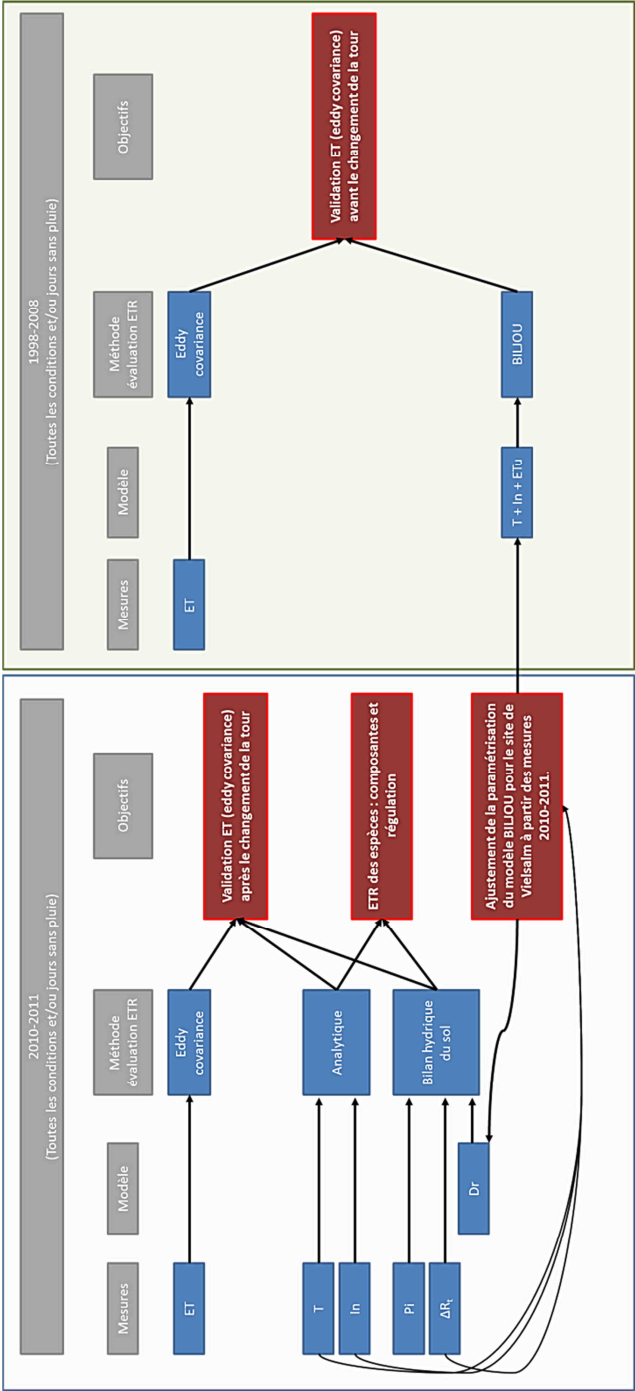
Le Chapitre III caractérise la variabilité spatio-temporelle de la réserve en eau disponible pour les plantes (R_t) du site en 2010-2011. L'ensemble des mesures nécessaires ainsi que les éventuelles différences entre sous-peuplements sont mises en avant. Les mesures sont comparées aux sorties du modèle BILJOU© (Granier et al., 1999).

Au sein du Chapitre IV, à la suite de la caractérisation des variables climatiques et biologiques clés pour le fonctionnement physiologique des espèces durant la période d'étude, les flux transpiratoires mesurés (du capteur au peuplement) sont analysés en fonction de l'espèce et des facteurs environnementaux. Les mesures sont également comparées aux sorties du modèle BILJOU©.

Dans le Chapitre V, l'ETR est évaluée par 3 méthodes fournissant des informations à différentes échelles spatio-temporelles et ces méthodes sont inter-validées pour la période 2010-2011. Les flux de vapeur d'eau par eddy covariance sont par la suite analysés de manière rétrospective depuis 1998 à l'aide des sorties du modèle BILJOU©.

Le Chapitre VI conclut ce document, faisant l'objet d'une discussion générale des résultats et exposant des perspectives de recherche.

Figure 1 : Schéma général des objectifs de l'étude



I. BIBLIOGRAPHIE

I.1. Bilan hydrique et ETR en peuplements forestiers

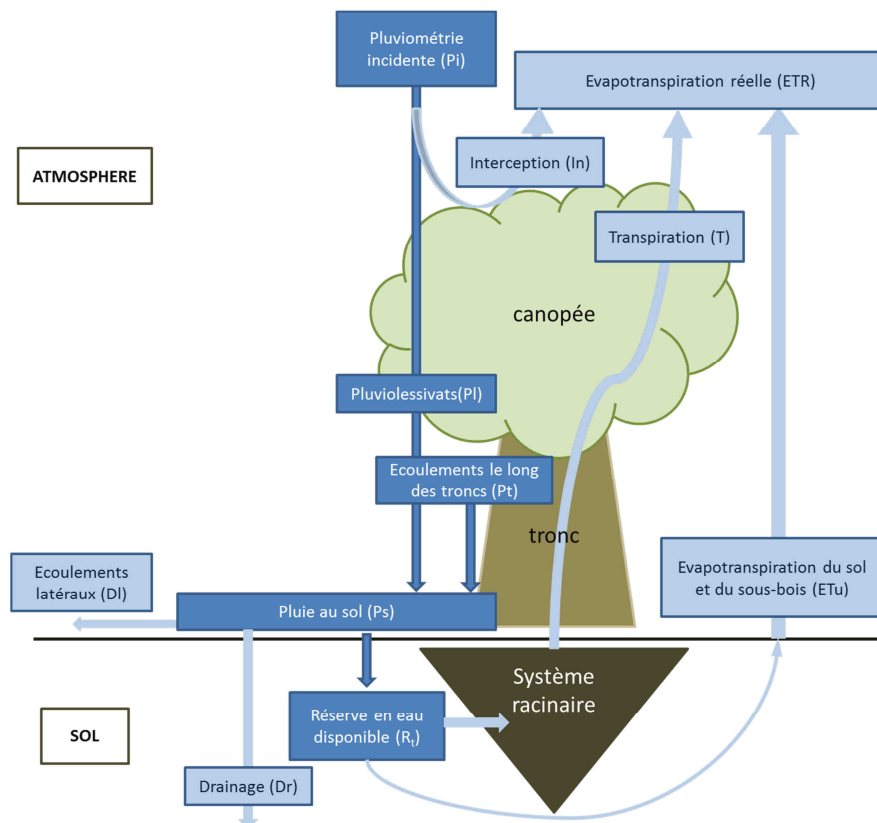


Figure I.1 : Les flux d'eau au sein du continuum sol-végétation-atmosphère.

La principale entrée d'eau correspond à la pluviométrie incidente (P_i , mm ; Figure I.1). Une partie des précipitations arrivant sur les surfaces végétales est directement évaporée dans l'atmosphère. On nomme ce phénomène l'interception (I_n , mm ; Figure I.1). En plus de l'eau arrivant directement au sol, ce dernier est rechargé par l'eau traversant le feuillage (les pluiolessivats, P_l , mm ; Figure I.1), et l'eau s'écoulant le long des troncs (P_t , mm ; Figure I.1). Une partie de l'eau arrivant au sol peut être déviée par des écoulements latéraux en fonction de la pente (D_l ; Figure I.1). L'autre partie s'infiltre dans le sol et peut être soit drainée en profondeur (D_r , mm ; Figure I.1), soit retenue et constituer alors la réserve en eau disponible du sol

(R_t , mm), définissant l'eau disponible pour les plantes. La R_t va donc également varier dans le temps en fonction des sorties d'eau vers l'atmosphère, constituées de la transpiration de la végétation et de l'évaporation du sol (E_u). L'eau utilisée pour la photosynthèse est puisée dans le sol via le système racinaire. Elle est ensuite transportée du sol vers les feuilles selon la théorie de la tension-cohésion (Angelier et al., 2004; Dixon et Joly, 1894). Une petite partie (5 %; Jackson, 2003) est utilisée pour la photosynthèse et le métabolisme de la plante alors que la majorité de l'eau repart dans l'atmosphère via le processus de transpiration (T , mm; Figure 1.1). La somme des flux par évaporation (interception et évaporation du sol) et transpiration (ensemble des strates de végétation) forment l'évapotranspiration réelle, ETR (Figure 1.1 et Equation 2). En négligeant les sources potentielles d'entrée d'eau autres que la pluviométrie incidente (entrées latérales), l'équation du bilan hydrique du sol correspond alors à l'Equation 1.

Les épisodes de sécheresse et de vagues de chaleur impactent la R_t , qui est susceptible de devenir insuffisante pour assurer le bon fonctionnement hydrique des peuplements, induisant alors pour la végétation des stress hydriques édaphiques qui, directement ou indirectement, causent d'éventuelles pertes de productivité et/ou la mortalité de peuplements forestiers, comme cela a pu être observé durant l'année 2003 en Europe (Figure I.2).

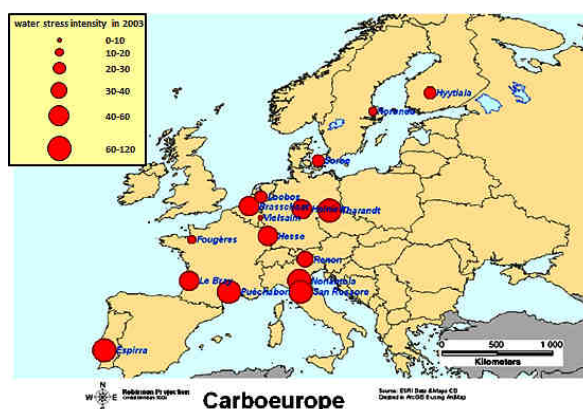


Figure 1.2 : Distribution de l'intensité du stress hydrique en 2003 sur les 16 sites forestiers de CarboEurope analysés par Granier et al. (2007). Issu de (Granier et al., 2007).

Les méthodes de mesures les plus couramment utilisées pour caractériser l'ETR des peuplements forestiers sont 1) l'eddy covariance, 2) les mesures des composantes principales soit T, In et ETu (méthode analytique), 3) la résolution de l'équation du bilan hydrique du sol. Nous le verrons dans la suite du document, les mesures conduisant à l'évaluation de l'ETR par l'équation du bilan hydrique du sol ou par la méthode analytique sont généralement localisées, permettant de travailler à l'échelle de l'espèce. La précision de l'extrapolation des mesures à l'échelle de l'écosystème dépend alors des protocoles de mesures mis en place et de l'hétérogénéité du site. L'eddy covariance permet une évaluation directe de l'ETR à l'échelle de l'écosystème. En contrepartie, la provenance de la source dans le cas de peuplements mixtes est difficilement identifiable et les composantes de l'ETR dans la plupart des cas ne sont pas distinguables.

Dans un peuplement forestier l'ETR est dépendante des conditions climatiques définissant l'évapotranspiration potentielle (ETP, mm), ainsi que du fonctionnement et de la structure de la végétation. Sans limite d'eau, T et ETu sont gouvernées par l'accès à la lumière et chaque espèce de par son fonctionnement hydrique, présente une consommation en eau plus ou moins importante. Chaque espèce par la structure de sa canopée et de son tronc, influence le taux de lumière traversant la canopée, les flux d'interception et les écoulements le long des troncs. Ainsi on constate dans la littérature des taux d'interception de la pluviométrie incidente de l'ordre de 20 à 25 % pour les hêtres et de 35 à 40 % pour les douglas (Aussenac, 1968; Aussenac et Boulangeat, 1980; Granier et al., 2000). A l'âge adulte, les écoulements le long des troncs peuvent être conséquents pour les hêtres, alors qu'ils sont pratiquement nuls chez les douglas (Aussenac et Boulangeat, 1980).

I.2. L'évapotranspiration potentielle, ETP

L'ETP, selon Perrier (1977), correspond à la consommation d'eau d'un gazon couvrant, en phase de croissance active, sans restriction dans son alimentation hydrique. C'est un index climatique permettant de quantifier la demande évapotranspiratoire à l'échelle d'un couvert végétal.

De nombreuses formules ont été développées (Choisnel et al., 1992), soient empiriques (thermiques, radiatives), soient physiques.

Les formules physiques comptent parmi elles celle de Penman (1956), correspondant à un calcul de bilan d'énergie à l'échelle de la canopée, considérée comme homogène (modèle « big leaf »). Le bilan comporte un terme radiatif et un terme convectif. Une modification apportée par Monteith (1965), introduit dans la formule un terme de résistance provenant des surfaces végétales, formule alors communément appelée formule de Penman-Monteith. En forêt cette modification n'apporte cependant pas d'amélioration de l'estimation de l'ETP (forte corrélation des résultats des 2 formules, $R^2 > 0.99$; Source : INRA, <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/index.php?p=forets&c=meteo>). Selon la même source : « pour les forêts l'ETP Penman est l'ETP de référence. Elle est facilement calculable pour toutes les localisations géographiques, tous les climats (données historiques ou projections futures), tous les types de couvert (feuillus / résineux et LAI variés) ». L'ETP Penman est celle utilisée par le modèle BILJOU®, et également utilisée par Météo France et l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM).

La formule de l'ETP Penman (mm.s^{-1}) est présentée Equation I.1 (Choisnel et al., 1992; Ducharne, 2002).

$$ETP = \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{(\Delta + \gamma)} \frac{0.26 * (1 + 0.54 U_2) * (e_o(T) - e_a(T))}{\tau} \quad \text{Equation I.1}$$

Avec :

- R_n : rayonnement net
- Δ : la pente de la relation de Clausius-Clapeyron ($\text{Pa. } ^\circ\text{C}^{-1}$; Choisnel et al., 1992)
- γ : constante psychrométrique ($65 \text{ Pa. } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau ($2.45 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$)
- U_2 : la vitesse de vent à 2 m (m.s^{-1})
- τ : constante de temps (86400 s)
- $e_o(T) - e_a(T)$: déficit de saturation en vapeur d'eau, VPD (hPa)

et

$$e_o(T) = 0,6108 * \exp (17,27 * T_a / (T_a + 237,3)) \quad \text{Equation I.2}$$

$$e_a(T) = e_o(T) * HR \quad \text{Equation I.3}$$

$$U_z = ws_h * (4.87 / \ln (67.8 * h - 5.42)) \quad \text{Equation I.4}$$

Avec : la température de l'air (T_a , °C), l'humidité relative de l'air (HR, %) et la vitesse de vent (ws , $m.s^{-1}$) mesurée à la hauteur h .

Des variantes de cette formule existent, utilisant le rayonnement global (R_g , $W.m^{-2}$ ou $J.cm^{-2}$; modèle BILJOU©), à la place du rayonnement net (variable qui est davantage mesurée en routine).

I.3. L'eddy covariance

Dans l'atmosphère, au sein de la couche limite de surface (CLS; 0-100 m) et de la couche limite atmosphérique (CLA; 100-3000 m), la turbulence est le processus de transport le plus important. Au sein de la CLS, les modifications de l'atmosphère sont principalement dues à un mécanisme thermique (mouvements verticaux) et aux forces de frottements (mouvements horizontaux). Les effets de la rotation de la Terre et de gradients horizontaux de pression deviennent négligeables près de la surface de la Terre. La turbulence est la réponse aux effets induits par la surface à une échelle de temps d'une heure, ou moins. Elle peut être représentée par des tourbillons de taille, de localisation et d'orientation variant constamment (Figure I.3). La turbulence se dissipe continuellement par la viscosité. Cette dissipation de la turbulence se réalise selon un processus nommé cascade de Kolmogorov (Arya, 1988; Kaimal et Finnigan, 1994). Les tourbillons se divisent alors jusqu'à ce que la viscosité puisse convertir leur énergie cinétique en chaleur. Les différents effets créant la turbulence (radiation du sol, hétérogénéité du terrain...) sont quantifiés par la vitesse de friction (u^* , $m.s^{-1}$), représentant la vitesse tangentielle d'un tourbillon circulaire.

La mesure par eddy covariance est réalisable lors de périodes pour lesquelles les flux turbulents sont importants (grands tourbillons). Ces périodes correspondent à des conditions instables de l'atmosphère,

observées durant la journée et d'autant plus instables que les journées sont ensoleillées. La stabilité de la CLA est déterminée à partir de l'indice de stabilité de Monin-Obukhov (Arya, 1988). Si l'indice est négatif l'atmosphère est instable et inversement. Plus l'indice est négatif, plus le caractère instable est affirmé (et inversement).



Figure 1.3 : Représentation de la turbulence (tourbillons) mesurée par le système d'eddy covariance au sommet de la tour en fonction de la direction et de la vitesse du vent (wind). Issu de Burba (2013).

Pour mesurer les densités de flux de traceurs échangés entre les écosystèmes et l'atmosphère (CO_2 , H_2O), le procédé le plus direct et le plus utilisé est la covariance des turbulences (eddy covariance). La densité de flux du traceur est alors estimée comme la covariance de la composante verticale de la vitesse du vent (w , m.s^{-1}) et de la concentration du traceur (ou scalaire ; ρ_s). Basé sur l'équation de conservation de la masse et certaines hypothèses simplificatrices, le taux de production ou d'absorption du scalaire étudié est déterminé selon l'Equation 1.5 (Aubinet et al., 1999).

$$\int_0^{h_m} S \, dz = \overline{w' \rho'_s} \quad \text{Equation 1.5}$$

Avec h_m : hauteur de mesure ; S : taux de production ou d'absorption du scalaire ; w' : fluctuation par rapport à la moyenne de la vitesse du vent vertical ; ρ'_s : fluctuation par rapport à la moyenne de la concentration du scalaire s par unité de volume.

Chapitre I

Dans le cas de la vapeur d'eau, la densité du flux turbulent, F_h ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), est directement déduite de la covariance selon l'Equation I.6 (Aubinet et al., 1999) :

$$F_h = \frac{P_a}{R \cdot T_{\text{son}}} \overline{w' \cdot h'} \quad \text{Equation I.6}$$

Avec P_a : pression atmosphérique ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$); R : constante de gaz équivalente à $8.314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$; h est la concentration de la vapeur d'eau dans l'air (mmol.mol^{-1}); T_{son} : température sonique (K), calculée à partir de la vitesse de déplacement du son dans l'air.

Pour une détermination des flux, les fluctuations à la moyenne de la vitesse du vent verticale et de la concentration du scalaire sont exprimées en fonction de la fréquence à laquelle elles se reproduisent, définissant l'analyse spectrale. Le spectre de la covariance des deux signaux est alors établi (spectre croisé). Le flux est obtenu à partir de l'intégration de la covariance des turbulences sur le domaine spectral. Afin de comparer les co-spectres de différents scalaires (CO_2 , H_2O), les densités co-spectrales sont normalisées.

Une fois enregistré, le signal a besoin d'être traité. Pour les basses fréquences les flux mesurés peuvent résulter de processus ne faisant plus intervenir seulement la turbulence. Pour les hautes fréquences un amortissement du contenu spectral du signal engendre une perte d'information et donc une sous-estimation du flux turbulent. Le filtrage des hautes fréquences provient d'un problème matériel, soit de l'anémomètre sonique permettant la mesure de la vitesse et de la direction du vent et de l'analyseur de gaz à infrarouge. L'anémomètre est placé au sommet de la tour. L'air capté en eau de la tour est transporté dans un tube jusqu'au niveau du sol afin d'être analysé. Différentes raisons sont à l'origine du filtrage des hautes fréquences. Trois d'entre elles, grâce aux progrès techniques sont devenues négligeables : le temps de réponse et la fréquence d'échantillonnage limitée des deux appareils ainsi que la taille de la zone de

mesure des appareils. Par contre, les deux autres phénomènes conservent un impact important sur la mesure des flux. Il s'agit de la différence d'emplacement entre l'anémomètre sonique et l'entrée du tube transportant l'air (l'air devrait être prélevé dans le volume de mesure de l'anémomètre mais cela provoquerait alors des appels d'air) et du transport de l'air au travers du tube. Une atténuation des fluctuations des concentrations des traceurs se réalise suite aux frottements avec la paroi interne du tube et des différentes couches du fluide entre elles. Le filtrage des hautes fréquences est alors corrigé à partir de l'élaboration d'une fonction de transfert intervenant dans le calcul d'un facteur de correction. La fonction de transfert dans le cas du CO₂ a déjà été largement étudiée (Aubinet et al., 2001; Aubinet et al., 1999; Leuning et Judd, 1996; Moncrieff et al., 1997). Par contre peu d'études se sont penchées sur la fonction de transfert pour la vapeur d'eau, pourtant différente de celle du CO₂ (Clement, 2005; de Ligne et al., 2010; Ibrom et al., 2007). Ces études ont montré, qu'à la différence du CO₂, en plus des caractéristiques du système, la fonction de transfert pour la vapeur d'eau qui est un traceur actif, est également dépendante des conditions d'humidité de l'air. de Ligne et al. (2010) montrent que le facteur de correction à considérer pour le filtrage des hautes fréquences, augmente avec une diminution du VPD. Cependant, bon nombre d'études utilisent toujours la fonction de transfert du CO₂ pour la mesure de l'évapotranspiration, qui est uniquement dépendante de la hauteur de mesure et de la vitesse du vent.

Outre les traitements propres au signal enregistré (corrections pour les basses et hautes fréquences), la mesure par eddy covariance doit faire face à d'autres incertitudes. Les conditions de mesures étant restrictives, les procédures de remplacement des données manquantes peuvent être des sources non négligeables d'incertitudes sur les cumuls saisonniers ou annuels des flux. La mesure nocturne est également une source d'incertitude importante, la turbulence étant faible et le transport par advection (transport horizontal) devenant important. Les caractéristiques du système de mesure et les conditions atmosphériques déterminent également une empreinte de mesure du système d'eddy covariance, nommée footprint. Valable uniquement en théorie pour des écosystèmes

homogènes, par nécessité la mesure par eddy covariance a été étendue à des écosystèmes plus ou moins hétérogènes. Il s'agit alors de pouvoir identifier la source de la mesure afin de relier le flux enregistré à un écosystème donné. De manière générale la fonction de footprint est nulle au pied de la tour, maximale à quelques mètres, puis s'atténue sur plusieurs centaines de mètres (Figure I.4). Plusieurs modèles de footprint ont été développés en vue de discriminer la provenance des flux sur les sites (Gash, 1986; Neftel et al., 2008; Schuepp et al., 1990).

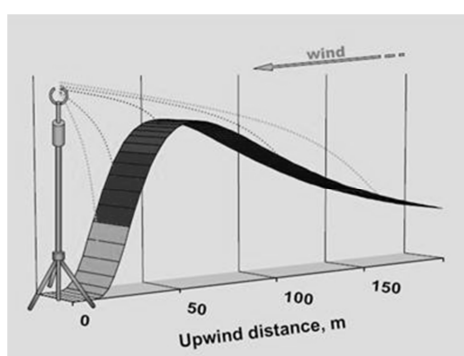


Figure I.4 : Forme hypothétique de la fonction de footprint en fonction de la distance à la tour dans la direction du vent (Upwind distance, m). Issue de Burba (2013).

Le bilan de carbone d'une forêt est représenté globalement par les gains réalisés via la photosynthèse et les pertes via la respiration. Le gain de carbone par photosynthèse qui correspond à la production primaire brute, est nommé GPP pour Gross Primary Production ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). En comptabilisant la respiration autotrophe (R_a , $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) on calcule la NPP, soit la production primaire nette ($\text{NPP} = \text{GPP} - R_a$; $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Si l'on soustrait à la NPP la respiration hétérotrophe alors la productivité nette de l'écosystème est obtenue (NEP; $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Les flux entre l'atmosphère et l'écosystème, mesurés par eddy covariance, correspondent à la NEE (Net Ecosystem Exchange; $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Les respirations autotrophe et hétérotrophe forment la respiration de l'écosystème (TER, $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). La TER peut être calculée selon deux approches, dites de « nuit » ou de « jour », amenant toutes deux à des incertitudes quant à la détermination de la GPP.

I.4. La transpiration des espèces ligneuses

I.4.1. Transport de l'eau dans l'arbre

La transpiration est le flux principal permettant le mouvement de l'eau du sol vers l'atmosphère dans les écosystèmes forestiers. Afin de décrire l'état hydrique du *continuum* sol-végétation-atmosphère, la notion de potentiel hydrique (Ψ , MPa) est utilisée, représentant de manière simplifiée la force nécessaire pour mettre en mouvement les molécules d'eau au travers du milieu (Figure I.5). La feuille possède un potentiel hydrique (foliaire) plus bas (plus négatif) que le rameau, provoquant alors un mouvement de l'eau vers les feuilles, le rameau ayant lui-même un potentiel plus bas que la branche et ainsi de suite jusqu'aux racines. Le mouvement de l'eau repose alors sur l'intégrité du système de transport des racines jusqu'aux feuilles. L'air possédant un potentiel hydrique plus négatif que les feuilles, l'eau est transpirée via les stomates.

En condition hydrique non limitantes, l'évapotranspiration potentielle (ETP), combinaison principalement du déficit de saturation en eau de l'air (VPD) et du rayonnement (global R_g ou net R_n), contrôle les flux transpiratoires. L'analogie à un système électrique (van den Honert, 1948) est généralement utilisée pour décrire ce fonctionnement, le système étant perçu comme une suite de résistances de plus en plus fortes des racines jusqu'à l'atmosphère, avec une différence de potentiel aux deux extrémités du système. La nuit, si la demande évaporative de l'air est nulle, alors l'arbre rééquilibre son potentiel hydrique avec celui de l'horizon du sol dans lequel il puise l'eau. On parle alors de potentiel hydrique de base (Ψ_b).

Le transport de l'eau et des minéraux (sève brute), des racines jusqu'aux feuilles, s'effectue le long du xylème dans l'aubier (Figure I.6). En parallèle, le phloème assure la redistribution, des feuilles jusqu'aux racines, des photosynthates, acides aminés et électrolytes (sève élaborée; Figure I.6). Ces deux voies de transport sont disposées autour du cambium, assise génératrice de cellules formant annuellement un nouveau cerne, le xylème à l'intérieur et le phloème à l'extérieur (Figure I.6). Les cernes les plus anciens perdent au fil du temps leur fonction de transport, formant

Chapitre I

alors le duramen ou bois mature. Le duramen ne possède plus de cellules vivantes. Les cernes toujours fonctionnels forment l'aubier.

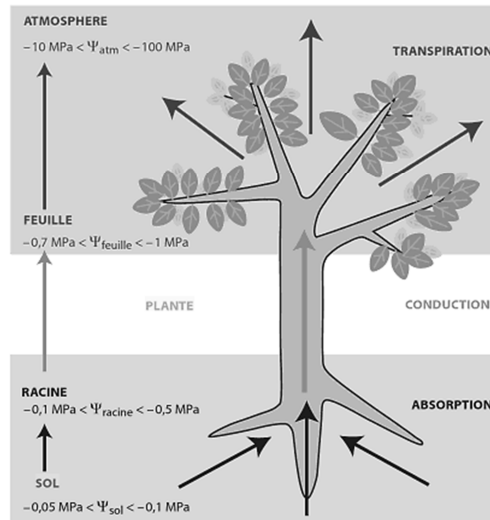


Figure 1.5 : Représentation schématique du transfert d'eau au travers du continuum sol-végétation-atmosphère selon la théorie de la tension-cohésion, et du gradient de potentiel hydrique, du sol, des racines, des feuilles et de l'atmosphère. Source : Biologie végétale ; Nutrition et métabolisme, 2^e édition, Dunod 2012.

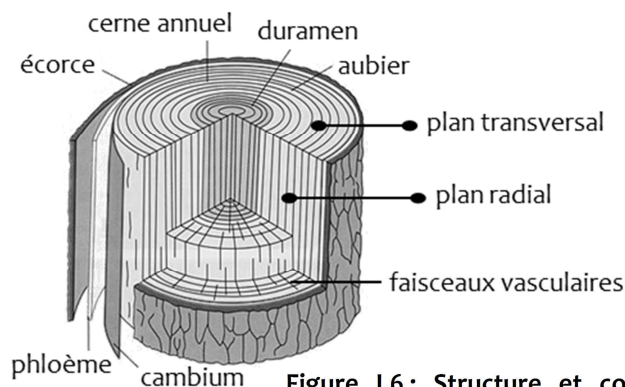


Figure 1.6 : Structure et composition d'un tronc d'arbre (coupe transversale et radiale). Source : <http://cerig.efpg.inpg.fr/tutoriel/morphologie-fibres-bois/page03.htm>.

L'architecture des éléments conducteurs et leurs densités transversales au sein de l'aubier, sont deux facteurs permettant de classer les espèces ligneuses en trois groupes. Le premier, les conifères, possèdent uniquement comme éléments conducteurs des trachéïdes. Les trachéïdes sont des cellules mortes, de quelques millimètres de long, dont les parois

sont percées de ponctuations, qui permettent le passage latéral de la sève brute entre trachéides. Les angiospermes possèdent également quelques trachéides, mais le transport de la sève brute se fait principalement par des vaisseaux, correspondant à un empilement de cellules mortes formant un cylindre de grande taille. Comme pour les trachéides, les vaisseaux sont percés latéralement de ponctuations, mais également à leur extrémité par des perforations. Le passage de la sève est alors principalement vertical. Les vaisseaux assurent un transport de la sève plus rapide que les trachéides. Au sein des angiospermes la densité radiale des vaisseaux permet de distinguer le second groupe d'espèces ligneuses, les espèces à zone poreuse marquée (chêne, frêne, orme, châtaigner...), du troisième, les espèces à pores diffus (hêtre, charme, bouleau, érable...). Le bois est également constitué de parenchyme, qui contrairement aux éléments conducteurs sont des cellules vivantes, formant les faisceaux vasculaires (ou rayons ligneux). Ils contribuent au transport radial de la sève et ont une fonction de stockage (eau, carbohydrate). Chez les angiospermes, des fibres sont également disposées à côté des vaisseaux assurant une fonction de soutien, alors que chez les gymnospermes les trachéides assurent à la fois le transport et le soutien.

Les éléments conducteurs du phloème sont, contrairement au xylème, des cellules vivantes. Ils sont également accompagnés de parenchyme. La majorité des tissus élastiques du tronc (cellules vivantes) sont compris dans les organes situés en périphérie du cambium, ce dernier y compris, et dans le mésophylle des feuilles (Brough et al., 1986; Čermák et Nadezhdina, 1998; Zweifel et al., 2000).

Le flux de sève au sein de la surface d'aubier n'est pas uniforme et décroît généralement du cambium vers le duramen (Čermák et al., 1992; Čermák et Nadezhdina, 1998; Granier et al., 1994; Köstner et al., 1998; Lu et al., 2000). Des exemples de profil radial de flux de sève sont donnés Figure I.7. Le profil varie en fonction des espèces, mais également au sein d'une même espèce en fonction de la circonférence ou de l'âge de l'arbre, ou encore de la demande évaporative (Delzon et al., 2004; Fiora et Cescatti, 2006; Nadezhdina et al., 2002).

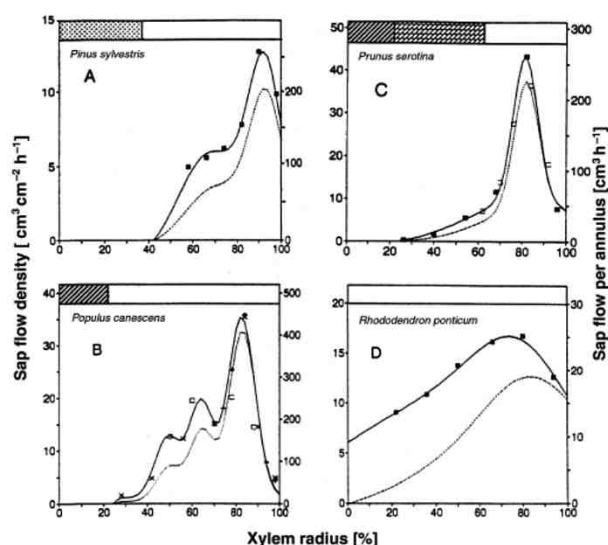


Figure 1.7 : Profils radiaux de flux de sève dans le tronc, de deux espèces d'arbres dominantes (A, B) et de deux espèces dominées (C, D), mesurés à midi lors de journées ensoleillées. La couleur du xylème est représentée schématiquement dans la partie supérieure de chaque graphe : hachures = duramen noir marron, réticulé = zone de transition brun grisâtre, pointillés = duramen légèrement plus foncé et blanc = xylème indifférencié. Les valeurs mesurées de densité de flux de sève (Sap flow density) sont présentées et le profil radial est modélisé à partir de courbes d'ajustement (lignes continues). Les lignes en pointillés représentent le flux de sève par anneau (Sap flow per annulus), avec une amplitude de 2 % du rayon de xylème. Les profils radiaux du peuplier (*Populus canescens* ; C) et du cerisier (*Prunus serotina* ; C) ont été mesurés avec 2 et 3 capteurs respectivement. Le cambium est situé à 100 % du rayon, le 0 représentant le centre de l'arbre (Xylem radius %). Extraite de Nadezhdina et al. (2002).

Les différents tissus de l'arbre ont également une capacité de réserve en eau. Zimmermann (1983) identifie trois zones de stockage de l'eau dans la plante, i) les cellules vivantes, ii) les parois des cellules ou les vaisseaux inactifs du xylème, iii) le xylème dans l'aubier. Les cellules vivantes par contraction des tissus élastiques participent à la transpiration journalière quelles que soient les conditions atmosphériques et édaphiques (Steppe et al., 2004; Zweifel et al., 2000). On observe des variations journalières en diamètre de l'ensemble des organes, racines, tronc, branches et feuilles (Boyce et McCune, 1992; Čermák et al., 2007; Gross et Koch, 1991; Herzog et

al., 1995; Hinckley et al., 1978; Köstner et al., 1998; Sevanto et al., 2002; Ueda et Shibata, 2001) ; synthèse bibliographique issue de Betsch, 2010), mettant en évidence les phénomènes de décharge et de recharge de ces tissus durant la journée. Les arbres prélèvent généralement plus d'eau en fin d'après-midi et la nuit qu'ils n'en transpirent, permettant la recharge des tissus (Running, 1979). Le matin cette eau stockée est utilisée pour répondre rapidement à la demande évaporative de l'air. Cependant, certaines études mettent également en évidence la participation du bois d'aubier dans les fluctuations de diamètres des organes, due à l'augmentation de la tension dans le xylème (Irvine et Grace, 1997; Sevanto et al., 2003; Sevanto et al., 2002). L'eau stockée dans les parois des cellules ou les vaisseaux inactifs du xylème peut être libérée pour des potentiels hydriques relativement élevés (Tyree et Yang, 1990). Elle peut alors participer fortement à la transpiration et jouer un rôle important dans le maintien du fonctionnement hydrique et carboné en cas de sécheresse (Waring et Running, 1978; Zweifel et al., 2001).

L'eau contenue dans les vaisseaux du xylème au sein de l'aubier peut constituer une réserve, mais ne sera libérée qu'à la suite de phénomènes de cavitation et d'embolie des vaisseaux (Tyree et Sperry, 1988). Ce phénomène peut réduire le stress hydrique de la plante mais conduit à une diminution de la conductivité hydraulique. Selon Betsch (2010) : « de manière générale la quantité d'eau stockée dépend de l'organe, du tissu considéré et surtout de la taille de l'arbre. Plus l'arbre sera grand, plus la quantité d'eau stockée et prélevée sera élevée. La quantité d'eau prélevée quotidiennement peut tout de même dépendre des facteurs climatiques. On observe une très grande variabilité de la quantité d'eau utilisée entre les espèces ».

Des mouvements d'eau au sein de la plante peuvent également être observés à la suite de phénomènes de redistribution hydraulique dans le sol et/ou dans la plante. Dans le sol, il a été mis en évidence des redistribution d'eau via le système racinaire pouvant s'effectuer des horizons les plus profonds vers les horizons en superficie, mais également dans le sens inverse ou latéralement, en fonction des différences de potentiels hydriques (Brooks et al., 2006; Burgess et al., 1998; Domec et al., 2010; Howard et al., 2009; Meinzer et al., 2004; Oliveira et al., 2005; Prieto et al., 2012). Ces réallocations permettent de maintenir des potentiels hydriques du sol assez élevés pour l'ensemble du système racinaire afin d'éviter des phénomènes

de cavitation (Domec et al., 2004; Siqueira et al., 2009; Warren et al., 2007a). Au sein de l'arbre, l'eau réallouée aux différents organes peut avoir plusieurs sources. Lors d'évènements pluvieux ou de périodes de brouillard, les feuilles peuvent absorber de l'eau qui est alors redistribuée dans l'ensemble de l'arbre selon les besoins (Breshears et al., 2008; Burgess et Dawson, 2004; Limm et al., 2009; Simonin et al., 2009; Yates et Hutley, 1995). Lorsque la demande évaporative et les flux transpiratoires sont faibles, l'eau stockée dans les différents tissus de la plante peut également être redistribuée vers les compartiments présentant des potentiels hydriques faibles. Puis, l'eau peut également provenir du sol et être directement déviée au sein du tronc afin d'être redistribuée, mettant en évidence la possibilité d'observer simultanément des flux ascendants et descendants et leurs compartimentations (Nadezhdina et al., 2009).

1.4.2. Les mesures des flux d'eau dans l'arbre

La transpiration fait partie des principales variables d'intérêt dans les recherches scientifiques décrivant le fonctionnement hydrique des espèces forestières, tout comme la mesure des potentiels hydriques de la plante (des racines jusqu'aux feuilles) et des variations de diamètre du tronc. Couplée aux variables climatiques et aux caractéristiques du couvert, elle permet d'évaluer la conductance stomatique de ce dernier, utilisée afin de mettre en évidence des seuils de fonctionnement physiologiques vis-à-vis de la demande évaporative et/ou de la réserve en eau disponible du sol. Il est primordial de la quantifier afin de paramétrer les modèles de bilan hydrique terrestres. Elle permet également, couplée au flux de carbone, d'évaluer selon différents indicateurs la productivité des espèces.

Les mesures de transpiration débutent au début du 20^{ème} siècle grâce à l'utilisation de colorants, faisant appel à des méthodes destructives (Dixon, 1914; James et Baker, 1933; Kramer, 1940). Au fil du temps, des méthodes non-destructives ont été développées en utilisant principalement la chaleur comme proxy pour quantifier la transpiration. Elles se sont basées soit sur la vitesse de transfert par convection et conduction au travers des tissus xylémiens d'une impulsion de chaleur (Dixon, 1936; Huber, 1932; Huber

et Schmidt, 1937; Marshall, 1958), soit sur la mesure de températures à partir de capteurs placés autour d'une source de chaleur continue (Ittner, 1968; Vieweg et Ziegler, 1960). La première base donne naissance à la technique HPV, pour Heat Pulse Velocity, et ses dérivées (voir Vandegehuchte, 2013 pour davantage de détails) largement utilisée dans les recherches en écophysiologie. La seconde base donne naissance à trois méthodes largement utilisées à l'heure actuelle, i) la méthode de bilan de chaleur (SHB pour Stem Heat Balance ou THB pour Trunk Heat Balance ; Čermák et al., 1973), ii) la méthode de dissipation thermique (TD ; Granier, 1985) et iii) la méthode HFD pour Heat Field Deformation (Nadezhdina et al., 1998).

Parmi toutes ces méthodes de mesure, on distingue les méthodes de bilan de chaleur (SHB & THB) permettant l'évaluation directe d'un flux de sève ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) au travers du tronc, des autres méthodes qui quantifient une densité de flux de sève ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). La densité de flux de sève représente une quantité de sève passant par une certaine surface en fonction du temps. Les méthodes de bilan de chaleur sont utiles dans les études visant la quantification de la transpiration totale des arbres. Pour les autres méthodes, la transpiration totale de l'arbre est extrapolée à partir de la portion d'aubier échantillonnée, créant des sources d'erreurs. Cependant, l'utilisation de plusieurs capteurs permet de préciser au sein de la surface d'aubier les variations de flux de sève radiales et azimutales et/ou des phénomènes de redistribution hydrique. Ces mesures, tout le long du rayon d'aubier, ont alors largement contribué à l'avancée des connaissances sur le fonctionnement hydrique des arbres et leurs aptitudes, en fonction de l'espèce, à évoluer au sein d'environnements stressants.

Le paragraphe suivant s'attache à décrire la méthode de dissipation thermique (Granier, 1985, 1987), méthode utilisée dans cette étude, en se focalisant sur ses capacités de mesures et les sources potentielles d'erreurs à prendre en compte pour le traitement des résultats. Les autres méthodes seront abordées selon les alternatives qu'elles apportent face aux limites de la méthode de dissipation thermique. Elles sont entre autres largement décrites (fonctionnements, limites de mesures, comparaisons) dans de nombreuses études. Čermák et al. (2004) en fournissent une liste détaillée. Plus récemment Steppe et al. (2010) ou Vandegehuchte (2013) exposent également une description et une comparaison détaillée des différentes

méthodes de mesures de densités de flux de sève et des améliorations encore apportées à l'heure actuelle.

1.4.3. La méthode de dissipation thermique : principes, limites et alternatives



Figure 1.8 : Capteur de flux de sève à dissipation thermique (UP GmbH, Germany ; Photo : Rémy Soubie).

Les caractéristiques du capteur de dissipation thermique et la méthodologie à appliquer pour les mesures et le traitement des résultats sont décrites en détails dans Granier (1985, 1987) et Lu et al. (2004). Nous reprenons ici les principes généraux.

Un capteur de flux sève de type Granier est constitué de deux sondes de 20 mm, insérées dans des tubes en aluminium préalablement disposés radialement dans l'aubier et séparées verticalement d'environ dix centimètres (Figure 1.8). Chaque sonde est équipée d'un thermocouple cuivre-constantan qui sont montés en opposition et permettent de mesurer l'écart de température entre les deux sondes. La sonde supérieure est chauffée à puissance constante (0,2 W) à l'aide d'un fil chauffant. Lors d'un flux de sève nul (conditions nocturnes), l'écart de température entre les deux sondes est maximal ($\Delta T_{\max}$). Si le flux de sève est non nul, la chaleur dissipée au niveau de la sonde supérieure sera proportionnelle à la vitesse de la sève, induisant des variations d'écart de température (ΔT) entre les deux sondes. La densité de flux de sève ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) est calculée à partir de l'Equation 1.7, dépendante des coefficients de calibration, a et b, établis par Granier (1985) sur trois espèces (*Pseudotsuga menziesii*, *Pinus nigra* et *Quercus pedunculata*) et de la détermination du $\Delta T_{\max}$.

$$\text{SFD} = a * K^b = 119 * \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T} - 1 \right)^{1,23} \quad \text{Equation 1.7}$$

I.4.3.1. Coefficients de calibration

La méthode de dissipation thermique, tout comme la méthode HFD, est empirique. Elles se basent sur la relation entre un ratio de température et la densité de flux de sève. A l'inverse, la majorité des méthodes de mesure de flux de sève se basant sur une impulsion de chaleur (HPV), ne sont pas empiriques et ne nécessitent alors pas de calibration. Elles nécessitent cependant un nombre important de propriétés du bois permettant la détermination de la diffusivité thermique du milieu.

Selon Granier (1985), les coefficients de calibration établis sont indépendants de l'espèce et de l'anatomie du bois. Cette observation est soutenue par de nombreuses études comparant les mesures de flux de sève par la méthode de dissipation thermique avec d'autres méthodes de flux de sève, de chambres de mesures (bag branch measurements), d'eddy covariance, de bilan hydrique à l'échelle du bassin versant, ou encore la conductance stomatique dérivée des flux avec des mesures porométriques (Ewers et al., 2007; Ford et al., 2007; Granier et al., 1994; Granier et al., 1990; Köstner et al., 1996; Saugier et al., 1997; Tournebize et Boistard, 1998).

Cette observation a cependant souvent été remise en question. Cabibel et Do (1991) trouvent des coefficients légèrement différents sur trois espèces feuillues (le pommier, le chêne et le châtaignier) menant à une estimation de SFD supérieure de plus de 15 % à celle obtenue à partir des coefficients d'origine, pour des valeurs de K supérieures à 1 (équivalent à des SFD compris entre 120 et 140 g.m⁻².s⁻¹; Lu et al., 2004). La relation obtenue est toutefois constante au sein des trois espèces sélectionnées. D'autres auteurs, à partir de nouvelles calibrations, ont également constatés des différences (Bush et al., 2010; Clearwater et al., 1999; de Oliveira Reis et al., 2006; Hultine et al., 2010; Steppe et al., 2010; Taneda et Sperry, 2008). Clearwater et al. (1999) mettent en évidence l'influence de la longueur de la sonde en contact avec le tissu non conducteur et proposent une correction. Une fois la correction apportée, la calibration d'origine est confirmée. Les différences observées par Taneda et Sperry (2008) sont également expliquées par la proportion de la sonde en contact avec les éléments conducteurs, tout comme pour Bush et al. (2010) sur trois espèces à zone poreuse marquée. Ces derniers trouvent par contre une bonne corrélation

entre leur calibration et celle d'origine pour deux espèces à pores diffus, ce qui n'est pas le cas pour Hultine et al. (2010) et Steppe et al. (2010) qui constatent des sous estimations de SFD de 50 et 60 % respectivement. Les variations de densités de flux de sève le long de la sonde sont également mises en avant afin d'expliquer les différentes calibrations (Clearwater et al., 1999). C'est le cas pour de Oliveira Reis et al. (2006) sur le papayer. La distribution des vaisseaux du xylème, en majorité en périphérie, et les fortes teneurs en eau de la tige sont les causes plausibles des différences de coefficients observées.

Selon Lu et al. (2004) la modification du protocole de fabrication des capteurs (matériaux et/ou taille) peut également être la cause des différences de calibration observées. Etant donné la complexité de la procédure de calibration, les auteurs conseillent alors, non pas de calibrer la relation pour chaque nouvelle espèce, mais de faire une vérification via d'autres méthodes comme par exemple la gravimétrie.

Certains auteurs se sont également intéressés aux effets du forage pour l'insertion de la sonde sur le bois et sur le contact avec la sonde (Barrett et al., 1995; Green et al., 2003; Lu et al., 2002; Swanson et Whitfield, 1981; Wullschleger et al., 2011). Ce facteur concerne toutes les méthodes de mesures de flux de sève nécessitant l'insertion de sondes dans l'arbre. Des corrections ont été établies à partir de simulations numériques, en premier lieu pour différentes méthodes basées sur l'impulsion de chaleur (Barrett et al., 1995; Green et al., 2003; Swanson et Whitfield, 1981), puis plus récemment pour la méthode de dissipation thermique (Wullschleger et al., 2011).

I.4.3.2. Détermination du $\Delta T_{\max}$

La détermination de $\Delta T_{\max}$, correspondant à un flux nul dans l'arbre, est fondamentale pour le calcul de SFD (Lu et al., 2004). Alors que pour la méthode HFD elle peut être extrapolée des mesures (Nadezhdina et al., 2006; Vandegehuchte, 2013), elle se détermine *in situ* pour la méthode de dissipation thermique, nécessitant alors d'être dans des conditions de flux nul.

En pratique, un flux nul n'est pas nécessairement observé toutes les nuits dans l'arbre, en raison des mouvements d'eau pour la croissance (végétale ou organe de reproduction), de la restauration des réserves d'eau dans les différents tissus (Goldstein et al., 1998; Lu et al., 1995) ou encore d'une forte demande évaporative nocturne couplée à de fortes vitesses de vent (Snyder et al., 2003). Selon la méthodologie mise en place par Granier (1987), pour éviter une erreur sur la détermination du $\Delta T_{\max}$, ce dernier doit être calculé à partir d'une régression linéaire entre les maximums déterminés sur une période de 7 à 10 jours (Figure I.9 a). Cette méthode permet également de prendre en compte les éventuelles variations de $\Delta T_{\max}$, à long terme, induites par une dégradation des propriétés thermiques du bois autour de la sonde. En effet, il peut se produire des réactions du bois d'aubier autour des sondes, induisant des variations de teneur en eau et donc des propriétés physiques du bois, dont sa conductivité thermique, provoquant alors une variation du $\Delta T_{\max}$. Oishi et al. (2008) ont également créés des critères basés sur la valeur de VPD durant la nuit et l'intervalle de confiance des mesures afin de sélectionner les nuits à flux nul. Lu et al. (2004) font également remarquer que le $\Delta T_{\max}$ du bois sec est généralement supérieur à celui du bois humide, impliquant alors, lors de fortes sécheresses, de prendre en compte ces variations journalièrement (Figure I.9 b).

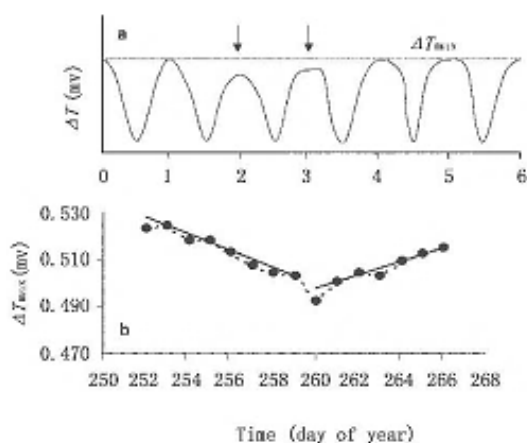


Figure I.9: Détermination du $\Delta T_{\max}$, a) sans phénomène de dérive, à partir de la régression établie entre les maximums rencontrés sur 7 à 10 jours. Les flèches indiquent des flux transpiratoires nocturnes, b) lors d'un phénomène de dérive se produisant lors de fortes périodes de sécheresses. La régression est alors établie pour chaque période. Issu de Lu et al. (2004).

I.4.3.3. Influence du gradient naturel de chaleur

Les gradients naturels de chaleur représentent l'ensemble des gradients de températures se déroulant dans l'arbre dont la cause n'est pas liée au chauffage appliqué pour la mesure de flux de sève. Ces gradients sont principalement dus à des différences de stockage de chaleur entre le sol, le tronc et les racines et à l'échauffement solaire (Čermák et Kučera, 1981; Do et Rocheteau, 2002a; Köstner et al., 1998; Lu et al., 2004). Ils sont particulièrement importants au lever ou au coucher du soleil et pour des arbres isolés, des forêts ouvertes ou encore des vergers. Ils peuvent être évalués in situ en débranchant le chauffage de la sonde supérieure du capteur de flux de sève durant plusieurs jours. Selon Do et Rocheteau (2002a) leur influence est négligeable pour des valeurs inférieures à 0,2 °C.

Plus le capteur sera placé loin du sol, face nord, et isolé des rayonnements, plus l'influence des gradients naturels de chaleur sera faible. Le capteur peut également être placé à l'horizontale afin d'éviter les gradients verticaux, en faisant alors l'hypothèse que les gradients horizontaux sont négligeables. Pour les écosystèmes présentant une forte hétérogénéité diurne et/ou nocturne des gradients naturels de chaleur, Do et Rocheteau (2002b) ont mis en place une méthodologie fonctionnant sur la même méthode que celle de Granier (1985), mais avec une alternance de périodes avec ou sans chauffage. Un cycle de 15 min « avec » et 15 min « sans » correspond à la meilleure alternative. Une nouvelle calibration a été mise en place afin de tenir compte du régime non stationnaire des températures. Cette méthode permet de réduire significativement l'influence des gradients naturels de chaleurs.

La plupart des méthodes HPV pour lesquelles seul compte le temps de propagation de la vague de chaleur, ne sont pas soumises à une influence des gradients naturels de chaleur. La méthode HFD fonctionnant, comme la méthode de dissipation thermique, sur l'estimation d'un bilan de chaleur est en théorie également influencée par ces gradients. Cependant, étant donné les courtes distances entre les sondes, l'influence est supposée mineure (Vandegehuchte, 2013).

1.4.3.4. Intensité et direction des flux

Toutes les méthodes de mesures de flux de sève n'offrent pas la même gamme de mesure des flux. La méthode de dissipation thermique permet, toutes corrections prises en compte, une mesure des flux faibles ($< 55 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), à élevés ($> 150 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), mais ne permet pas, contrairement à la méthode HFD, une mesure des flux dans la direction inverse. Ces flux comme nous l'avons mentionné peuvent avoir lieu lors de redistributions hydriques dans le sol via la plante ou dans la plante elle-même. Concernant les mesures basées sur l'impulsion de chaleur, une nouvelle méthode, Sapflow+, a été développée par Vandegehuchte et Steppe (2012) afin de pouvoir mesurer toutes les gammes de flux dont les flux inverses. Les gammes de mesures des méthodes HPV développées au préalable sont par contre plus restreintes (Vandegehuchte, 2013).

1.4.3.5. Extrapolation des mesures à l'échelle de l'arbre et du peuplement

A l'échelle de l'arbre, la densité de flux de sève mesurée est transformée en flux transpiratoire en extrapolant la mesure sur l'ensemble de la surface d'aubier. Selon l'espèce, il est alors primordial de déterminer la surface d'aubier, puis le profil radial de flux de sève le long du rayon d'aubier (Figure I.7).

A l'échelle du peuplement, les flux transpiratoires des arbres d'une même espèce sont en partie gouvernés par le statut social de ces derniers, déterminant l'accès à la lumière (Granier et al., 1992; Oren et al., 1998). Il est alors important de placer les capteurs de flux de sève en fonction de la proportion de chaque classe de circonférences au sein du peuplement. A l'échelle du peuplement, la transpiration (T , mm ; Equation I.8 ; Granier et al., 1992) est alors calculée à partir : 1) des densités de flux de sève moyennes par classe de circonférence (SFDm_i ; $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), 2) de la proportion de la surface d'aubier des individus de chaque classe par rapport à la surface d'aubier totale du peuplement (p) et 3) de la surface terrière d'aubier du peuplement (SA ; $\text{m}^2.\text{m}^2$), tel que pour n classes :

$$T = \sum_{i=1}^{i=n} (\text{SFDm}_i * p_i) * SA \quad \text{Equation I.8}$$

1.5.L'interception et les écoulements le long des troncs

De manière générale, l'interception est évaluée comme la fraction de la pluviométrie incidente n'atteignant pas le sol et réémise dans l'atmosphère par évaporation. La plupart des études prennent donc en compte la fraction interceptée par les surfaces végétales ligneuses (André et al., 2008a; Aussenac, 1968; Aussenac et Boulangeat, 1980; Staelens et al., 2008; Zimmermann et Zimmermann, 2014), soit l'interception de la canopée. Gerrits et al. (2010), prennent également en compte l'eau interceptée par la litière au niveau du sol et évaporée dans l'atmosphère. Nous parlerons alors d'interception du sol forestier. L'interception est généralement évaluée comme la différence entre la pluviométrie incidente et la pluviométrie arrivant au sol. La pluviométrie arrivant au sol est calculée comme la somme des pluviolessivats et des écoulements le long des troncs.

Les pluviolessivats sont évalués à partir de pluviomètres disposés sous la canopée. Dans ce cas-là, c'est l'interception de la canopée qui est évaluée. Plusieurs types de système de mesure existent. Les plus fréquents correspondent à des demi-tubes en PVC (quelques cm de diamètre et de 2 à 3 m de long), reliés à un collecteur principal, ou, à des entonnoirs disposés sous la canopée. Le collecteur peut correspondre à un bidon placé à l'extrémité des tubes ou des entonnoirs, ou à un auget basculant relié à un compteur. La caractérisation temporelle des pluviolessivats dépend alors de la fréquence de la récolte des données (contenance des bidons et/ou relevés des compteurs). Les pluviomètres équipés d'augets basculants peuvent également être reliés à des centrales d'acquisition des données afin d'analyser les données à une échelle temporelle de l'ordre de l'heure et/ou de l'évènement pluvieux.

A l'échelle annuelle ou saisonnière, la variabilité temporelle des pluviolessivats est importante (Gerrits et al., 2010), particulièrement pour les espèces feuillues en fonction de leur phénologie. Les conditions climatiques gouvernant les flux d'évaporation, telles que la vitesse du vent et le VPD, affichent également des variations annuelles modifiant les flux

d'interception. Gerrits et al. (2010) reportent par contre que l'interception du sol forestier présente des variations temporelles moins marquées que celles de la canopée.

La caractérisation spatiale dépend du protocole de mesure mis en place. L'ensemble des auteurs s'accordent sur la forte variabilité spatiale des pluvioléssivats et la difficulté de faire une évaluation moyenne de ces derniers à l'échelle de la parcelle forestière. La répartition des pluvioléssivats joue un rôle important dans la répartition de l'eau dans le sol (Bouten et al., 1992; Gerrits et al., 2010). La variabilité spatiale des pluvioléssivats est liée à l'intensité et la durée de l'évènement pluvieux, l'hétérogénéité du couvert forestier (surface terrière, LAI, distribution spatiale, composition spécifique) et aux conditions climatiques (principalement la vitesse du vent et l'humidité relative de l'air). L'interception sera favorisée lors d'une pluie peu intense et de longue durée, suivie de conditions atmosphériques évaporantes avec un vent fort. Une fraction de la pluviométrie incidente arrive plus ou moins directement au sol, alors qu'une autre partie va être stockée au niveau de la canopée en fonction de la capacité de stockage de celle-ci. Une fois la capacité de stockage maximale atteinte, l'eau s'écoule vers le sol. La canopée présente alors généralement des écoulements préférentiels, influençant largement la répartition des pluvioléssivats (Gerrits et al., 2010). Les conditions climatiques influencent les taux d'évaporation mais les quantités évaporées sont alors principalement dépendantes des capacités de stockage d'eau par la canopée (André et al., 2008b).

Etant donné la forte hétérogénéité spatio-temporelle des pluvioléssivats ou de proxy tels que la capacité de saturation de la canopée ou encore l'éclairement relatif au sol, il est difficile d'établir des protocoles de mesures et/ou des modèles standards pour l'évaluation de l'interception. Aussenac (1968) fait remarquer qu'un petit nombre de pluviomètres disposés au hasard conduit généralement à de mauvaises estimations des pluvioléssivats. Il préconise alors, non pas d'augmenter le nombre de pluviomètres, mais de les disposer en fonction de l'éclairement relatif au sol. Les relations établies entre interception et éclairement relatif sont plus que satisfaisantes. Cependant, pour les comparaisons entre divers peuplements (espèce et/ou âge), l'éclairement relatif peut être considéré comme insuffisant pour exprimer la structure d'une espèce et son évolution avec

l'âge (Aussenac, 1968). Avec le temps, les échantillonnages se sont intensifiés, en prenant en compte davantage de paramètres influant sur l'interception. Zimmermann et Zimmermann (2014) en fonction de l'échelle de temps à caractériser et de la complexité de l'écosystème, préconisent l'installation de 25 à 200 pluviomètres sur des surfaces d'1 ha.

Les écoulements le long des troncs sont mesurés à partir de colliers disposés tout autour des troncs et reliés à des collecteurs et/ou des augets basculants. Comme pour les pluviollessivats, les écoulements le long des troncs sont principalement dépendants dans le temps de la phénologie des espèces et des types de précipitations. Dans l'espace, la variabilité est dépendante du climat via l'intensité et la durée de la pluie, la vitesse du vent et la demande évaporative (André et al., 2008a; Crockford et Richardson, 2000; Kuradji et al., 2001; Tang, 1996) ainsi que du couvert forestier par la surface terrière, la structure de la canopée et la composition spécifique (architecture des arbres, caractéristiques de l'écorce; Aussenac et Boulangeat, 1980; Staelens et al., 2008). Les écoulements le long des troncs débutent, selon l'espèce, à partir d'une certaine quantité de pluviométrie incidente, définissant la capacité de stockage du tronc et des branches. Ils sont plus importants en hiver qu'en été (Aussenac et Boulangeat, 1980; Staelens et al., 2008). Une pluie intense mène généralement à une diminution des écoulements le long des troncs, en raison de l'accentuation des écoulements préférentiels et donc du pluviollessivage (Staelens et al., 2008). Les mesures d'écoulements le long des troncs sont généralement extrapolées à l'échelle du peuplement, à partir des effectifs par espèce et par classe de circonférence.

Chez le hêtre, les écoulements le long des troncs sont considérés comme importants, tout au long de son évolution, en raison d'une écorce lisse et d'une disposition des branches aigue (Aussenac, 1968; Aussenac et Boulangeat, 1980). Ils sont évalués en moyenne tout au long de l'année entre 7 et 9 % de P_i (Aussenac, 1968; Aussenac, 1975; Aussenac et Boulangeat, 1980; Staelens et al., 2008). Pour le douglas, les écoulements le long des troncs peuvent être conséquents jusqu'à 40-50 ans, puis diminuent progressivement en raison du développement d'un rhytidome important (Aussenac et Boulangeat, 1980).

L'évaluation de l'interception est également dépendante de la bonne caractérisation de la pluviométrie incidente. Cette dernière peut être mesurée au-dessus de la canopée ou à découvert, en clairière. En hauteur, de fortes vitesses du vent et une pluie fine peuvent être la source d'une mauvaise estimation de la pluviométrie incidente (Allerup et al., 1997; Crockford et Richardson, 2000). Plusieurs auteurs relèvent cependant peu de différences entre une pluviométrie mesurée en hauteur (plusieurs mètres) et en clairières (Aboal et al., 1999; Lloyd et al., 1988; Loustau et al., 1992; Staelens et al., 2005).

Quantitativement, l'interception de la canopée est un flux important au sein du cycle de l'eau en forêt. Elle est évaluée entre 15 et 50 % de la pluviométrie incidente au sein des forêts tempérées et humides. Pour les hêtres, l'interception est généralement évaluée entre 20 et 25 % de la pluviométrie incidente en Europe, avec une forte influence de la phénologie de l'espèce sur le flux à l'échelle annuelle (Augusto et al., 2002; Aussenac et Boulangeat, 1980; Biron, 1994; Gerrits et al., 2010; Peck et Mayer, 1996; Staelens et al., 2008). Pour le douglas, l'interception est plus importante (plus forte capacité de stockage de la canopée). Robins (1974), Rutter et al. (1975), Aussenac et Boulangeat (1980) et Tiktak et Bouten (1994) l'estiment entre 35 et 40 % de P_i . D'autres auteurs reportent une interception entre 20-30 % de P_i pour des plantations de douglas (Iroumé et Huber, 2002; Link et al., 2004; Pypker et al., 2005; Rothacher, 1963). En prenant en compte l'interception du sol forestier, Gerrits et al. (2010) calculent une interception totale de 36 % pour des hêtres durant la saison de végétation, soit le double de l'interception de la canopée (18 %). L'interception du sol forestier représente alors 22 % des pluviollessivats mesurés.

I.6.L'eau dans le sol : la réserve en eau

I.6.1. Réserve utile (RU) du sol et réserve en eau disponible pour les plantes (R_t)

La réserve utile (RU), correspond à la quantité d'eau maximale, accessible pour les plantes, que peut contenir un sol. En l'absence de flux dans le sol (drainage ou évapotranspiration), cette quantité d'eau est dépendante de la capacité de rétention de l'eau du sol en fonction de la profondeur. Cette rétention dépend des propriétés physiques du sol telles que la texture, la structure, la densité (ρ_s), et la charge caillouteuse (cc), qui déterminent essentiellement la macroporosité du sol, puis de certaines propriétés chimiques tels que la teneur en carbone ou la capacité d'échange cationique (Bréda et al., 2004). Afin de caractériser la RU d'un sol, on établit alors pour chaque horizon de sol à caractéristiques hydrodynamiques homogènes les courbes de teneur en eau du sol en fonction de la succion exercée (courbes pF ; Figure I.10 ; Richards, 1941).

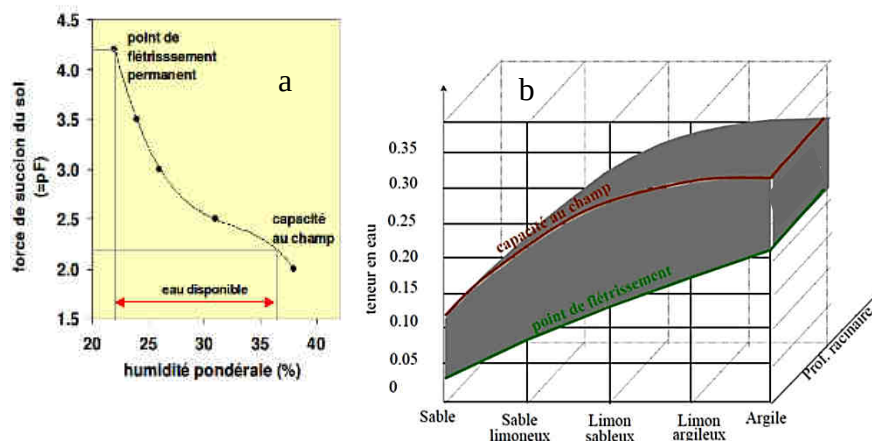


Figure I.10 : a) Humidité pondérale en fonction de la force de succion pour un sol donné (courbe pF). Figure extraite du site INRA, (<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/index.php?p=forets&c=sol>). Le point de flétrissement permanent (pF= 4.28) et la capacité au champ (pF = 2.2) limitent l'eau disponible dans le sol ; b) évolution de l'eau disponible, en fonction de la texture des sols et de la profondeur racinaire. Adapté de Musy et Soutter (1991).

La succion représente l'ensemble des forces modifiant le potentiel hydrique de l'eau dans un sol non saturé en eau. Deux seuils (pF caractéristiques ; Figure I.10) sont alors utilisés afin de caractériser la RU d'un sol : la teneur en eau à la capacité au champ (θ_{FC} pour Field Capacity) correspondant à la quantité d'eau maximale que peut contenir un sol après ressuyage (élimination de « l'eau de gravité »), et la teneur en eau au point de flétrissement (θ_{WP} pour Wilting Point) correspondant à la quantité d'eau minimale extractible du sol par les plantes (les forces de rétention exercées par la matrice du sol devenant alors plus fortes que la succion exercée par l'absorption racinaire). Le pF, logarithme décimal de la succion exprimé en MPa, est généralement utilisé. Les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement sont généralement définies par des pF respectifs de 2,48 et 4,2 MPa. Il est cependant reconnu que les arbres sont capables d'extraire de l'eau pour des pF plus bas, la valeur de 4.2 ayant été définie pour des couverts herbacés (Bréda et al., 1995; Bréda et al., 2002). Le pF correspondant à la capacité au champ évolue également en fonction du type de sol (Section I.6.2).

La RU est alors dépendante des teneurs en eau aux pF caractéristiques des horizons du sol, de leurs charges caillouteuse et de la profondeur racinaire. Elle se calcule en mm, comme la somme de chaque lame d'eau disponible par horizon pris en compte (n horizons ; Equation I.9).

$$RU = \sum_{i=1}^n ((\theta_{FC_i} - \theta_{WP_i}) * h_i * (100 - CC)/100) \quad \text{Equation I.9}$$

θ_{FC} et θ_{WP} représentent des teneurs en eau volumique ($m^3.m^{-3}$). Au plus la hauteur (h) de l'horizon est importante, au plus le poids de ce dernier dans le calcul augmente. La charge caillouteuse est exprimée en pourcentage du volume total de sol et est considérée dans ce calcul comme imperméable. Une bonne évaluation de la profondeur de sol totale est tout de même utile afin d'évaluer la profondeur de prospection racinaire potentielle (Bréda et al., 2002).

Pour deux espèces sur un même site la différence de RU sera alors tout d'abord fonction de leur profondeur racinaire respective. L'estimation de la profondeur racinaire est cependant délicate, demandant pour être précise un échantillonnage important (profondeur de sol, nombre de

répétitions). Pour plus de précision sur d'éventuels effets de compétition entre espèces, la prospection latérale des racines, l'efficacité d'absorption ou encore les phénomènes de symbioses (mycorhiziennes par exemple) sont également à prendre en compte. Il semble alors plus prudent de considérer, sur un site donné, une profondeur potentielle d'enracinement dépendante de la profondeur de sol. L'influence des espèces sur les pF caractéristiques est limitée mais pas nécessairement négligeable. La rétention de l'eau dans le sol étant dépendante de certaines propriétés chimiques notamment liées au carbone, les espèces via la composition chimique de leurs litières peuvent influencer indirectement les teneurs en eau du sol.

L'évolution de la réserve en eau disponible (R_t), représentant à un moment donné la quantité d'eau accessible aux plantes, est dépendante des entrées (pluviométrie) et des sorties d'eau (drainage et évapotranspiration) dans la zone de prospection racinaire. Sur un même site, pour deux espèces différentes, cette évolution dépendra alors de la surface terrière des espèces, de la structure de leurs canopées et de leurs écorces (influençant les flux d'interception et les écoulements le long des troncs), et de leurs fonctionnements hydrique (flux transpiratoires, capacité d'absorption racinaire). Elle se calcule selon l'Equation I.10, θ_i représentant la teneur en eau volumique de l'horizon i à l'instant t .

$$R_t = \sum_{i=1}^n ((\theta_i - \theta_{wp_i}) * h_i * (100 - cc)/100) \quad \text{Equation I.10}$$

Différentes méthodes indirectes de mesures *in situ* des teneurs en eau du sol existent afin d'obtenir un suivi en continu de la R_t . Trois groupes peuvent être identifiés :

- La méthode gravimétrique ;
- Les méthodes nucléaires, soit l'atténuation d'un faisceau de neutrons (Pélegrin et Buscarlet, 1960 ; Couchat, 1967), soit l'absorption de rayons γ (Ferguson et Gardner, 1962 ; Gurr, 1962) ;
- Les méthodes diélectriques, principalement TDR (Time Domain Reflectometry ; Davis et Chudobiak, 1975 ; Topp et Davis, 1982) et capacitatives.

La méthode gravimétrique se distingue des autres, étant la seule mesure directe de la teneur en eau du sol (θ). Elle est cependant destructive (prélèvements de sol) et non reproductible. Les autres méthodes, plus ou moins précises et fiables (Tableau I.1), permettent l'automatisation de la mesure de θ et donc un suivi en continu et l'établissement de bilan hydrique stationnel. Les volumes échantillonnés sont par contre relativement faibles (de l'ordre du cm^3 ou du dm^3). L'estimation de la variabilité spatiale des teneurs en eau dépend alors du nombre de répétitions mises en place et de l'hétérogénéité du sol à caractériser.

	Gravimétrie	Sondes à neutron	Sondes TDR	Sondes capacitives
Précision et fiabilité	Mesure directe (dépend de la précision de la détermination de la densité apparente)	Précis et fiable (dépend du temps de comptage et de l'étalonnage)	Très précis et fiable (dépend de l'étalonnage)	Précis et fiable (dépend de l'étalonnage)
Volume échantillonné	Dépend du volume prélevé	Volume important autour de la sonde (sphères rayons 10 à 25 cm)	Faible volume autour de la sonde (dépend de l'architecture des sondes)	Faible volume autour de la sonde (dépend de l'architecture des sondes)
Avantages	- peu coûteux en matériel - méthode directe - volume contrôlé	- méthode de référence - accès direct à la teneur en eau - volumes importants	- précis, - moins onéreux que sonde à neutron et non réglementé	- moins onéreux que TDR et plus simple d'utilisation
Inconvénients	- non reproductible - destructif - main d'œuvre importante	- onéreux - utilisation réglementée - inopérant en surface	- onéreux - élément de volume de mesure mal défini	- sensible à la salinité - sensible à l'espace sonde-sol - élément de volume de mesure mal défini.

Tableau I.1 : Résumé des caractéristiques des méthodes courantes de mesure de teneur en eau du sol. Informations issues du croisement de plusieurs sources (Calvet, 2003; Pereira Dos Santos, 1997; Saur, 2008).

Les teneurs en eau du sol sont très variables à la fois dans le temps et dans l'espace (Buttafuoco et Castrignanò, 2005). Cette variabilité est modulée à la fois par les propriétés du sol et par la structure du couvert végétal. Selon Western et al. (2002), la variabilité spatiale des teneurs en eau du sol est généralement faible lors de conditions sèches (proches du point de flétrissement) ou humides (proches de la saturation), et plus élevées pour les conditions intermédiaires. Calvet (2003) rappelle que : « la précision d'une méthode est une chose, la précision de l'estimation de la teneur en eau en est une autre en raison de la variabilité spatiale des caractéristiques des sols qui est souvent à l'origine d'une incertitude de plus de 20 % ».

I.6.2. Evaluation de la capacité au champ

Diverses méthodes de détermination de la capacité au champ existent. Selon Bréda et al. (2002) cette valeur ne peut être déterminée qu'*in situ*. Cependant, à défaut, elle peut également être obtenue en soumettant un échantillon de sol à des potentiels hydriques compris en 0.023 et 0.1 MPa ($1.7 \leq pF \leq 3$). Il a été proposé, à partir d'expériences sur des échantillons remaniés, de sélectionner des valeurs de capacité au champ pour des argiles à $pF = 3$, pour des limons à $pF = 2.5$ et pour des sables à $pF = 2$ (Bonneau, 1961). En revanche sur des échantillons de sol non remaniés, conservant leur porosité structurale, Bruand et al. (1996) montrent que quelle que soit la texture, la capacité au champ est proche du $pF = 2$.

La détermination *in situ* de la capacité au champ à partir de mesures de teneur en eau du sol (réflectomètres), et en laboratoire à partir d'échantillons de sol non remaniés, sont comparées au cours de cette étude.

I.6.3. La réserve en eau disponible relative (REW)

La disponibilité de l'eau dans le sol au cours de la saison peut être évaluée à partir de la réserve en eau disponible relative, la REW (pour Relative Extractable Water), rapport entre R_t et R_U . En-dessous d'un certain seuil, la disponibilité en eau devient limitante. Ce seuil de déficit hydrique conduit à une régulation stomatique et donc à une diminution de la transpiration et de l'assimilation de carbone. Granier (1985, 1987) montre,

pour différentes espèces et différents sols, que la consommation en eau des espèces décroît linéairement avec la diminution de REW à partir de la valeur seuil de 40 %. Il a également été montré que le passage de ce seuil de 40 % pouvait correspondre à un arrêt ou à une forte diminution de la croissance radiale des espèces, voire une rétraction des tissus élastiques des troncs, mettant en évidence les effets de capacitance de ces derniers (Granier et al., 1995). Une valeur de 20 % est reportée par Lagergren et Lindroth (2002) pour de pins et des épicéas en Suède, mais pourrait provenir d'une surestimation de la capacité au champ.

I.6.4. Modèle BILJOU©

Le modèle de bilan hydrique forestier BILJOU©, développé par l'UMR Écologie et écophysiologie forestière de l'INRA (Granier et al., 1995; Granier et al., 1999), est utilisé dans cette étude afin premièrement de le paramétrer pour le site de Vielsalm sur la période 2010-2011 et deuxièmement de modéliser de manière rétrospective la R_t , la REW et les flux d'évapotranspiration de 1998 à 2009. Il s'agit d'un modèle itératif, modélisant le bilan hydrique de peuplements feuillus ou résineux au pas de temps journalier. Le 1^{er} janvier la R_t est initialisée à son maximum (RU). Chaque jour, R_t est calculée en fonction de la pluie arrivant au sol, de la distribution de l'eau au travers des différents horizons (drainage via la macroporosité et stock d'eau), et des flux d'évapotranspiration. Le modèle BILJOU© prend uniquement en compte les flux d'eau verticaux (modèle 1D), les ruissellements étant alors négligés (Granier et al., 1999). De ce fait, le modèle est davantage adapté aux sites présentant peu ou pas de pente. Si la R_t atteint son maximum, la totalité de la pluie arrivant au sol est drainée. La transpiration est modélisée à partir de l'ETP. La relation est modifiée en fonction de l'indice de surface foliaire du peuplement (LAI pour Leaf Area Index ; m² de feuilles par m² de sol), et de la REW. En-dessous du seuil de 40 % de REW, la transpiration est régulée. La pluie arrivant au sol est estimée comme la pluviométrie incidente moins les flux d'interception. L'interception est modélisée en fonction du type de peuplement, feuillus ou résineux, et de l'interception des radiations par le feuillage (fonction du LAI du peuplement). Tous les détails sont fournis dans Granier et al. (1999). Les

fichiers d'entrées et de sorties du modèle sont détaillés dans la Section II.7.4. Le modèle a été validé pour des peuplements de chênes, hêtres, épicéas et douglas (Aussenac et Granier, 1979; Aussenac et Granier, 1988; Granier et al., 1999; Granier et al., 2002).

Sur la saison, différents indicateurs ont alors été développés afin de quantifier le déficit hydrique (Figure I.11). Il s'agit 1) de la durée du stress, période durant laquelle la REW est en dessous du seuil de 40 % ; 2) de l'indice de stress hydrique reflétant à la fois la durée et l'intensité du stress et étant calculé comme la somme des écarts journaliers de la REW au seuil de 40 % ; et 3) de la date à laquelle la REW passe en dessous du seuil de 40 %.

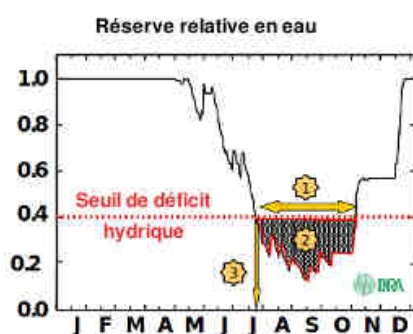


Figure I.11 : Exemple d'un suivi annuel de la REW et représentation des indicateurs de déficit hydriques (légendes dans le texte) développés. Figure extraite du site INRA, (<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/index.php?p=forets&c=indic>).

I.6.5. Le drainage

Le drainage correspond aux sorties d'eau latérales ou verticales du sol. Le déplacement de l'eau s'effectue plus ou moins rapidement, selon la porosité du sol. Le drainage rapide correspond au déplacement de l'eau au travers des macropores du sol ($> 50\mu\text{m}$ de diamètre ; Bréda et al., 2002). Lorsque les horizons du sol atteignent leur capacité au champ, tout apport d'eau est alors drainé en profondeur. Si l'écoulement est bloqué, l'eau s'accumule et forme alors une nappe. En dehors de la capacité au champ, une partie de l'eau arrivant au sol est drainée rapidement, alors que l'autre partie ré-humecte le sol, au travers de la macro et microporosité du sol. La variabilité spatiale du drainage est inhérente à la variabilité des propriétés du sol et à la structure du couvert végétal et est alors considérée comme importante.

I.7. Les sécheresses : conséquences physiologiques et adaptations

Selon Bréda et al. (2004), «une sécheresse édaphique est une diminution de la réserve en eau des sols suffisamment sévère pour que le fonctionnement des arbres ne soit plus optimal ». Elle intervient suite à un déficit pluviométrique plus ou moins long et est alors fonction de la RU des peuplements. Les études en écophysiologie ont permis d'améliorer la compréhension des réponses des espèces ligneuses face à une sécheresse édaphique, mais les prédictions sur la productivité et la mortalité des peuplements restent difficiles à mettre en œuvre (McDowell et al., 2008). Étant donné l'étroit couplage entre le fonctionnement carboné et hydrique des arbres et leur environnement, les sécheresses ont des effets immédiats, impactant la végétation durant la saison, mais aussi à long terme, pouvant affecter pendant plusieurs années la croissance des espèces et/ou mener à la mortalité.

Suite à un déficit hydrique, les interfaces sol-racines et feuilles-air sont affectées. De fortes demandes évaporatives de l'air couplées à une diminution de la R_t dans le sol, provoquent une diminution du potentiel hydrique (résistance au transfert de l'eau) tout le long du *continuum*. Si la tension au travers des éléments conducteurs devient trop importante, des phénomènes de cavitation peuvent apparaître, correspondant au passage d'une bulle d'air dans l'élément conducteur (Cochard et al., 1992b; Tyree et Sperry, 1989). Ce dernier est alors embolisé et n'est plus opérationnel. Afin d'éviter cela, lors de la chute du potentiel hydrique, les arbres ferment généralement leurs stomates, limitant alors les flux transpiratoires mais également l'assimilation du CO_2 . La régulation stomatique est un processus complexe pouvant dépendre, en plus du microclimat et des potentiels hydriques du sol et de la plante, de la concentration en CO_2 de l'atmosphère et de la régulation hormonale de la plante (Tardieu et Davies, 1992; Tuzet et al., 2003; Whitehead, 1998). Deux stratégies physiologiques sont communément admises, regroupant les espèces dites isohydriques et celles anisohydriques (Tardieu, 1993; Tardieu et Simonneau, 1998). Les espèces isohydriques ont un contrôle stomatique important, limitant les flux transpiratoires avant que le système n'atteigne un potentiel hydrique

critique, mais provoquant alors de fortes diminutions de l'assimilation du carbone. Les espèces anisohydriques fonctionnent par contre proche ou au-delà du potentiel hydrique critique, maintenant alors un fonctionnement carboné actif, mais risquant davantage une embolie du système. Une embolie des éléments conducteurs trop importante va conduire en premier lieu à la chute des feuilles, encore vertes suite à l'embolie des pétioles (Bréda et al., 2004), ainsi qu'à des taux de mortalité racinaires élevés, en particulier pour les racines fines (Leuschner et al., 2001). L'ensemble de ces régulations et/ou dégradations au niveau des organes contribuant au fonctionnement hydrique et carboné de la plante, vont entraîner une diminution, voire un arrêt, des mises en réserves de glucides, nécessaires pour les réparations, la maintenance, la croissance et la défense des arbres. L'analyse d'années particulièrement sèches et chaudes, telles que 2003 en Europe, ont permis de mettre en évidence une diminution de la production primaire brute (GPP) et de la respiration de l'écosystème (TER) bien corrélées à la diminution de la RU_t dans le sol sur plusieurs écosystèmes forestiers (Baldocchi, 2008; Bréda et al., 2006; Granier et al., 2007). La diminution accrue de la GPP en comparaison à celle de la TER induit une diminution de la production primaire nette (NEE) (Ciais et al., 2005; Granier et al., 2007). La mise en place du feuillage au printemps et du nouveau cerne dépendent également de ces réserves carbonées. Un déséquilibre des réserves carbonées peut alors avoir des conséquences à long terme sur la croissance des arbres, tant que ce dernier n'est pas comblé (Bréda et al., 2006). On constate fréquemment une réduction des cernes et/ou du LAI, les années suivant un épisode de sécheresse (Aussenac et al., 1984; Bréda et Badeau, 2008; Le Dantec et al., 2000). Les sécheresses peuvent conduire à des hausses de taux de mortalité des espèces ligneuses, comme par exemple en France en 2004 ou en 2005 à la suite de la sécheresse de 2003 (Renaud et Nageleisen, 2004).

La sensibilité d'une espèce à la sécheresse est un caractère difficile à définir et à quantifier, dépendant de ses propriétés hydrauliques (résistance à la cavitation ; capacités et réallocation en eau), mais également des propriétés édaphiques de la station (RU et fertilité), et de la sylviculture appliquée (contrôle de l'indice foliaire influençant les flux d'interception et les flux transpiratoires ; Sergent et Bréda, 2013). Le taux de perte de

conductivité hydraulique exprimé en fonction du potentiel hydrique dans le xylème d'un organe considéré, permet de quantifier la sensibilité à la cavitation d'une espèce. On détermine à partir de ces courbes de vulnérabilité le potentiel hydrique pour lequel la perte de conductivité est de 50 % (Percentage Loss of Conductivity ; PLC 50%), quantifiant généralement la sensibilité à la sécheresse « théorique » d'une espèce. La pente des courbes permet une estimation du « contrôle de l'embolie » en fonction de l'espèce. Lors d'une sécheresse, les espèces fonctionnent plus ou moins loin de leur seuil de vulnérabilité (Figure I.17), en fonction de leur système de régulation stomatique, mettant alors en avant un compromis pour ces dernières entre risques de cavitation et assimilation de carbone. Pour une station et une sylviculture données, la sensibilité des espèces à long terme dépend alors de ce compromis, de leur résilience et de la fréquence des aléas climatiques. Toutes ces mesures sont alors généralement mises en relation avec les résultats des réseaux de surveillance de l'état sanitaire des forêts, se basant alors davantage sur des critères visuels de dépérissements et sur les taux de mortalité enregistrés.

Manion et Lachance (1992) expliquent les phénomènes de dépérissements comme découlant d'une succession de facteurs de stress classés selon 3 grands groupes et se déroulant sur plusieurs années. Les peuplements sont initialement soumis à des stress de longue durée mais généralement de faible intensité, telle qu'une faible RU par exemple ou des conditions minérales défavorables, définissant les facteurs prédisposants. Puis des stress ponctuels intenses (sécheresse, etc.) vont former les facteurs déclenchants. Enfin la mortalité survient après l'apparition de facteurs aggravants tels que l'attaque de pathogènes. En se focalisant sur les effets de la sécheresse, deux concepts complémentaires ont été mis en avant pour expliquer les phénomènes de dépérissement et/ou de mortalité (Bréda et al., 2006; Martínez-Vilalta et al., 2002; Waring, 1987), (i) le dysfonctionnement hydrique et (ii) un déficit du bilan de carbone. McDowell (2008) ajoute à cela un troisième mécanisme, complémentaire aux deux précédents, (iii) la démographie des agents biotiques. L'interaction des trois mécanismes est fonction de l'intensité et de la durée de la sécheresse. Le déficit en carbone est censé apparaître pour des sécheresses de longue durée, l'arrêt de la photosynthèse à long terme engendrant l'épuisement de réserves

carbonées nécessaires au fonctionnement physiologique. Le dysfonctionnement hydrique est davantage fonction de l'intensité de la sécheresse. De fortes sécheresses peuvent amener à une embolie du système conducteur et à un état de dessiccation irréversible pour la plante, avant que le déficit de carbone n'intervienne. La démographie des agents biotiques, tels que les insectes ou les pathogènes, et leurs effets sur la végétation, peuvent amplifier ou être amplifiés, par les mécanismes de dysfonctionnement hydrique et de déficit de carbone (McDowell et al., 2008).

La hausse des températures peut apparaître aux premiers abords bénéfique. La phénologie des espèces par exemple, peut subir des modifications, avec des débourrements plus précoces (Chuine, 2000; Sarvas, 1972; Schaber et Badeck, 2003), et des développements foliaires et une maturation des feuilles accélérés (Davi et al., 2008). Cependant, durant des années comme 2003, pour lesquelles la sécheresse est accompagnée d'une vague de chaleur, les feuilles peuvent également être endommagées par la température excessive de l'air. La transpiration permettant le refroidissement des feuilles, lors d'une régulation stomatique due à un déficit hydrique, la température de ces dernières peut alors atteindre des seuils critiques, créant des risques de dégradation des tissus et des photosystèmes.

Des modifications de structure (traits fonctionnels) sont également observées face à des sécheresses récurrentes, tels que dans les écosystèmes méditerranéens, permettant une optimisation des fonctionnements hydrique et carboné. Ces changements en fonction des espèces et de l'environnement peuvent concerner entre autres, (i) la phénologie, (ii) l'indice de surface foliaire, (iii) le nombre de stomates, (iv) le ratio surface d'aubier-surface foliaire, (v) le ratio surface racinaire-surface foliaire, (vi) la distribution verticale des racines, (vii) la densité du bois, (viii) la capacitance des troncs (réserve d'eau) et (ix) un recouvrement de l'embolie. Une synthèse de ces mécanismes et de la littérature sont données par Bréda et al. (2006) et McDowell et al. (2008). Ces modifications permettent à plus ou moins long terme une amélioration de la conductance globale de l'arbre et/ou de la résistance du système de transport à la cavitation.

I.8. Les espèces ligneuses

I.8.1. Taxonomie et caractères morphologiques

Le hêtre

Le hêtre, espèce à feuilles caduques, fait partie de la famille des Fagacées, ordre des Fagales. C'est un arbre monoïque, haut de 25 à 30 m en moyenne mais pouvant atteindre 40 m et 1.5 m de diamètre. Sa longévité est de l'ordre de 150 à 200 ans mais peut atteindre exceptionnellement 300 ans. Le tronc est généralement cylindrique et non cannelé. L'écorce reste lisse tout au long de la vie de l'arbre, conférant au hêtre un écoulement le long des troncs de la pluviométrie incidente important quel que soit le stade de développement (Aussenac et Boulangeat, 1980). La ramification est alterne et distique, avec un angle d'insertion des branches aigu, accentuant les



Figure I.12 : Planche botanique de *Fagus sylvatica* (Köhler, 1887) Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Hetrecommun>

phénomènes d'écoulement. Les feuilles sont pétiolées (1 à 1.5 cm), ovales aiguës, entières, à bord légèrement ondulé, à 6 ou 7 paires de nervures latérales (Figure I.12). Le système racinaire est en cœur traçant (racines obliques et horizontales; Figure I.15 a), pouvant en l'absence de contraintes s'installer assez profondément dans le sol. Il rencontre par contre des difficultés à franchir des couches de sol compactes et mal drainées ou des couches indurées. La mycorhisation possède un rôle important dans l'alimentation hydrique de l'espèce. Le hêtre est une espèce à pores diffus, avec un bois de couleur jaune clair à rosée, homogène, au sein duquel il est difficile de distinguer l'aubier et le duramen.

Le douglas

Le douglas (Figure I.13), ou sapin de douglas, douglas vert, ou encore pin de l'Oregon, est un conifère de la famille des Pinacées, originaire de l'ouest de l'Amérique du Nord. Arbre monoïque, il est reconnu pour ses grandes capacités de production et la qualité de son bois. Son écorce lisse dans le jeune âge présente un rhytidome qui s'épaissit rapidement et devient écailleux, rougeâtre et à fissures longitudinales blanchâtres. Cette espèce présente alors un écoulement le long du tronc conséquent au stade juvénile mais qui diminue au fil du temps (Aussenac et Boulangeat, 1980). Les aiguilles mesurant de 15 à 30 mm sont insérées en spirales et dégagent une odeur de citronnelle. Le système racinaire est en cœur (racines horizontales, obliques et verticales ; Figure I.15 b), moyennement profond, très sensible à la compacité et à l'anaérobiose. Le douglas produit du bois rouge à duramen bien distinct.



Figure I.13 : Dessin d'ensemble d'un arbre de l'espèce *Pseudotsuga menziesii*, d'un rameau et d'un cône.

Le sapin



Figure I.14 : Planche botanique d'*Abies alba* (Thomé, 1885). Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Abies_alba

Conifère de la famille des Pinacées, tout comme le douglas, le sapin, ou encore sapin pectiné est une des espèces principales de l'étage montagnard en Europe (Rameau, 2001). Son écorce est lisse, grise argentée. Les aiguilles, à disposition sub-distiques, mesurent environ 30 mm, de couleur verte foncée sur la face supérieure, et verte gris présentant deux bandes stomatiques sur la face inférieure (Figure I.14). Le système racinaire est

pivotant (Figure I.15 c), profond, insensible à la compacité et peu sensible à l'anaérobiose. Le sapin produit un bois blanc, voire légèrement jaunâtre, dépourvu de canaux résinifères.

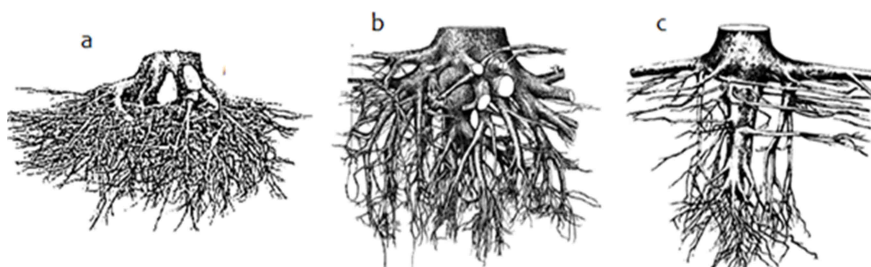


Figure I.15 : Système racinaire a) en cœur traçant (hêtre), b) en cœur (douglas) et c) pivotant (sapin). Issu de Köstler et al. (1968).

I.8.2. Phénologie

Le hêtre

En plaine, la feuillaison du hêtre se déroule entre la mi-avril et la mi-mai. La date de débourrement est principalement contrôlée par la photopériode (Galoux, 1966; Wareing, 1948) et non pas par la température. La chute des feuilles intervient à partir du mois d'octobre et jusqu'à la mi-novembre, cependant une marcescence est souvent observée en particulier chez les jeunes individus. La pousse des rameaux de l'année se déroule en mai et juin. La floraison de l'espèce se déroule en même temps que la feuillaison. La pollinisation est anémophile et la fécondation allogame. Le hêtre produit des faines (akènes) arrivant à maturité en septembre-octobre. Les hêtres arrivent à maturité sexuelle entre 60 et 80 ans et produisent de très bonne fainées environ tous les 10 ans.

Le douglas

Le douglas est une espèce sempervirente. La floraison s'effectue de mi-avril à mai. Les cônes arrivent à maturité en septembre et octobre. La floraison et la fructification se développent à partir de 25-30 ans et sont optimales au-delà de 40 ans. Le douglas produit des fructifications de qualité tous les 3 à 7 ans.

Le sapin

Le sapin est une espèce sempervirente. La floraison s'effectue en mai. Les cônes arrivent à maturité en octobre et novembre. La floraison et la fructification se développent à partir de 45 ans et sont optimales au-delà de 75 ans. Le sapin produit des fructifications de qualité tous les 3 à 6 ans.

I.8.3. Aires de répartition

Le hêtre

Le hêtre commun est d'origine européenne, avec une distribution limitée au nord et à l'est (Figure I.16). Au nord de son aire de répartition le hêtre occupe des zones de plaines et de collines alors qu'au sud il est exclusivement montagnard.

Le douglas

L'origine naturelle du douglas est l'ouest de l'Amérique du Nord, s'étendant du Mexique au sud à la Colombie Britannique au nord et de la côte Pacifique à l'ouest jusqu'au versant est des Rocheuses à l'est. En Wallonie, l'ensemble des territoires écologiques (zones distinguées par le climat et la géomorphologie ; Weissen et.al, 1991) sont aptes à accueillir le douglas.

Le sapin

L'aire de répartition naturelle du sapin (Figure I.16), concerne principalement les régions de moyenne montagne d'Europe, et la Normandie en France. En Belgique son implantation est optimale en Ardennes.

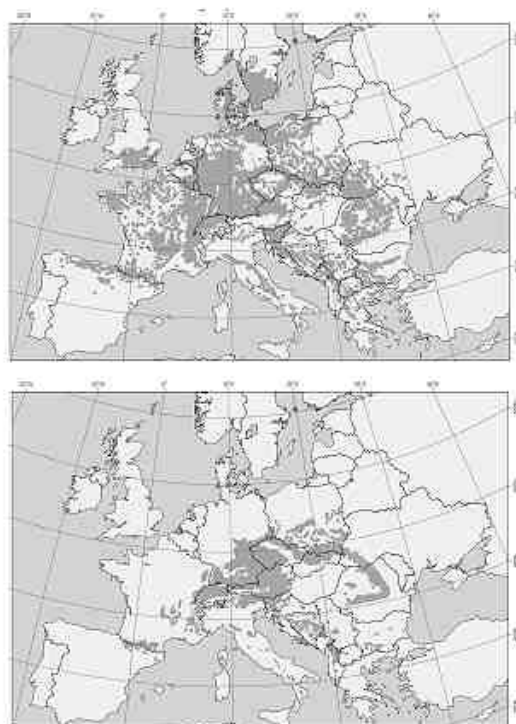


Figure I.16 : Répartition naturelle en Europe de *Fagus sylvatica* L. (en haut) et d'*Abies alba* Miller (en bas). Cartes issues du site Euforgen.org.

I.8.4. Sensibilités et changements climatiques

Le hêtre dans son développement juvénile est particulièrement sensible aux gelées tardives. Il supporte des températures annuelles moyennes comprises entre 3 et 12 °C, et des extrêmes journaliers allant de -28 à 42 °C. Espèce mésoxérophile à mésophile, le hêtre ne supporte pas l'excès d'eau. D'un point de vue topographique il est alors exclu des fonds de vallées étroites.

Au stade juvénile, **le douglas** est très sensible aux gelées tardives et sensible à la neige collante et au givre. Adulte il demeure sensible. Il supporte des températures annuelles moyennes comprises entre 6 et 16 °C, et des extrêmes journaliers allant de -30 à 40 °C. D'un point de vue hydrique le douglas est mésophile, supportant assez mal les sols trop secs ou trop humides.

Au stade juvénile **le sapin** est sensible à l'échauffement par rayonnement solaire, à la sécheresse et à la neige collante ou au givre, et

très sensible aux gelées tardives. Au stade adulte il reste très sensible aux gelées tardives, à la neige collante et au givre. Il supporte des températures annuelles moyennes comprises entre 5 et 11 °C, et des extrêmes journaliers allant de -45 à 37 °C. D'un point de vue hydrique le sapin est mésophile à hygrocline. Tout comme le hêtre, il est exclu des fonds de vallées étroites.

Les petits vaisseaux du hêtre font de lui une espèce peu vulnérable à l'embolie hivernale. La conductivité hydraulique des arbres est alors partiellement conservée d'une année à l'autre (Cruiziat et al., 2002; Hacke et Sauter, 1995). Les résineux présentent des taux d'embolie hivernale quasi nuls (Cochard et Granier, 1999). En période de végétation, l'embolie estivale chez le hêtre débute pour des potentiels hydriques foliaires en dessous de -1.9 MPa (Hacke et Sauter, 1995). Sa PLC 50 % est évaluée à environ -3 MPa (Figure I.17). Le hêtre est souvent considéré plus sensible à la sécheresse que le chêne (Bréda et al., 2006). Le hêtre a une régulation stomatique précoce, et semble ne pas fonctionner au-delà de sa PLC 50 % contrairement aux chênes, comme il a pu être observé lors de la sécheresse de 2003 (Figure I.17 ; Bréda et al., 2004). Ce fut, cette année-là, une des espèces, avec le douglas, les plus touchées par des phénomènes de dépérissements en France (Bréda et al., 2004). Sa croissance radiale a également été réduite de manière générale. Cette espèce est reconnue particulièrement sensible aux sécheresses printanières, du mois de mai et juin, conduisant à la formation d'un cerne étroit, et pouvant avoir des conséquences sur une à deux années (Dittmar et al., 2003; Lebourgeois et al., 2005). Puis un retour à de fortes croissance est souvent observé (Lebourgeois et al., 2005).

De par leurs PLC 50 %, les résineux, tels que le douglas ou le sapin, sont considérés comme moins sensibles à la sécheresse que le hêtre (Figure I.17 ; Niinemets et Valladares, 2006). Lors de sécheresses, ils fonctionnent cependant loin de cette limite, grâce à une régulation stomatique précoce pour des potentiels hydriques foliaires compris entre -2 et -2.5 MPa. Le douglas à l'échelle journalière est, à la vue de la littérature, une espèce bien adaptée au stress hydrique (Nadezhdina et al., 2009). Sa capacité de réserve en eau dans le tronc est importante et peut contribuer jusqu'à 20 % de la consommation journalière (Čermák et al., 2007). Les

phénomènes de redistribution hydraulique, des horizons de sol les plus profonds vers les plus superficiels, ont été identifiés chez le douglas comme la principale source de sa résistance à la sécheresse (Domec et al., 2004; Meinzer et al., 2004; Unsworth et al., 2004; Warren et al., 2007b; Warren et al., 2005).

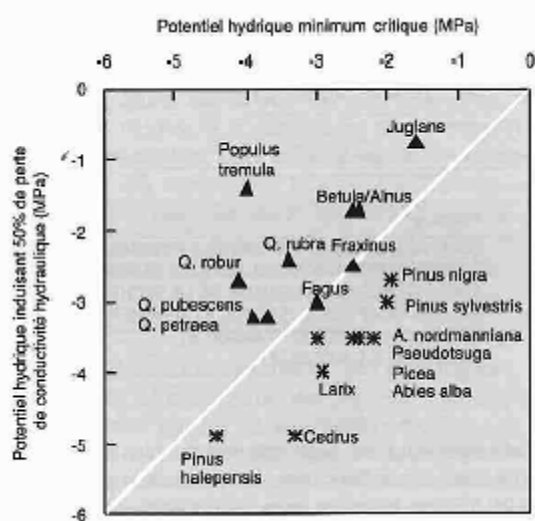


Figure 1.17 : Relation entre le potentiel hydrique induisant 50 % de perte de conductivité hydrique par embolie du système conducteur et le potentiel hydrique minimum mesuré lors de fortes sécheresses de 1976 et 2003, ainsi que lors d'expérimentations de dessèchements *in situ*. Pour certaines études le potentiel minimum a été calculé à partir du potentiel de base critique moins 0.4 MPa, selon la définition d'Aussenac et Granier (1978). Synthèse originale d'après les travaux d'Aussenac et Granier (1978); Aussenac et Valette (1982); Bréda et al. (1993); Cochard et al. (1992a); Cochard (1992); Cochard et al. (1997); Cochard et al. (1999); Lu et al. (1995); Tyree et al. (1993); Froux et al. (2002); Améglio et al. (1998); Badalotti et al. (2000). Issu de Bréda et al. (2004).

II. MATERIELS & METHODES

II.1. Le site d'étude : présentation et contexte scientifique

II.1.1. Localisation, caractéristiques du site et des peuplements

Le site d'étude est situé à Vielsalm, dans la province du Luxembourg, au sein de la région naturelle de l'Ardenne (50°18'N, 6°00'E, altitude: 450 m, Figure II.1). Le climat est tempéré océanique, avec des précipitations annuelles moyennes de 1060 mm et une température annuelle moyenne de 7.7 °C (moyennes de 1971 à 2010). Le sol est un sol brun acide à drainage normal, classé selon le système de la FAO comme dystric cambisol, d'une profondeur comprise entre 1 et 1.5 m, et composé de : 55 % de limons, 27 % de sable et 18 % d'argile (Aubinet et al., 2001; Heinesch, 2007; Longdoz et al., 2000). Une légère pente de 3 % est observée dans la direction nord-ouest.

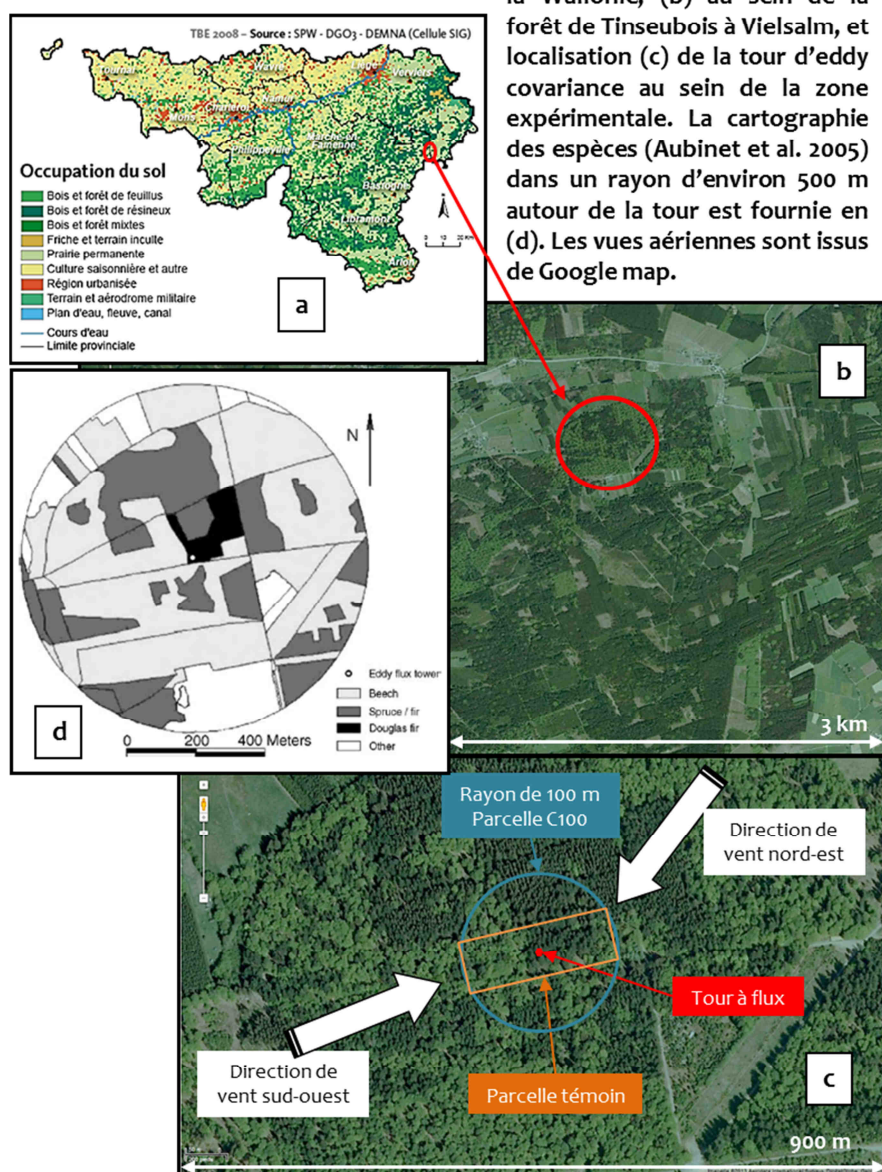
Les formations forestières de la région sont majoritairement composées de hêtres (*Fagus sylvatica* L.), de douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco), de sapins (*Abies alba* Miller) et d'épicéas (*Picea abies* [L.] Karst). Sur le site d'étude, les hêtres et les sapins ont été plantés en 1908 dans un sous-bois d'épicéas progressivement retirés à la suite d'éclaircies. Les douglas ont été plantés en majorité en 1935, puis des regarnissages ont eu lieu en 1950, 1960 et 1961.

Dans les années 1980 et 1990 le site a fait l'objet d'études (description des sols, études de la biomasse aérienne et racinaire, enrichissement en CO₂ ; Laitat et al., 1999) concentrées sur une parcelle d'environ 1 ha, nommée dans ce document **Parcelle témoin** (Figure II.1 c), au sein de laquelle la tour d'eddy covariance a ensuite été installée en 1996. Sur cette parcelle, un inventaire forestier (numérotation des arbres et mesure de la circonférence à 1m30, C₁₃₀, cm) a été effectué en 1996. A l'échelle de cette parcelle on distingue un sous-peuplement majoritairement composé de hêtre et un autre de douglas, la tour se situant à peu près au milieu des deux sous-peuplements.

Ensuite les inventaires forestiers de la Parcelle témoin ont été réalisés de 2009 à 2012 (Tableau II.1). Les mesures de C₁₃₀ sont réalisées au

mètre ruban sur les arbres d'une circonférence supérieure à 40 cm. Le géoréférencement des arbres a été effectué à partir d'un théodolite (Modèle Impulse, Laser Technology Inc., Englewood Colorado US).

Figure II.1 : Localisation du site d'étude (a) à Vielsalm au sein de la Wallonie, (b) au sein de la forêt de Tinseubois à Vielsalm, et localisation (c) de la tour d'eddy covariance au sein de la zone expérimentale. La cartographie des espèces (Aubinet et al. 2005) dans un rayon d'environ 500 m autour de la tour est fournie en (d). Les vues aériennes sont issues de Google map.



Chapitre II

Variables	Parcelles	Années de mesure			
		2009	2010	2011	2012
Identification des espèces	Témoin				
	C100				
Numérotation des arbres	Témoin				
Géoréférencement	Témoin				
Mesure de la circonférence à 1m30 des arbres	Témoin				
	C100				
Mesure de la hauteur des arbres	Témoin				

Tableau II.1 : Descriptif des mesures réalisées de 2009 à 2012, lors des inventaires forestiers en fonction de la parcelle considérée (témoin et C100) et de l'année.

	Hêtres	Epicéas	Douglas	Pins	Sapins
Hauteurs moyennes (m)	25 (5.0)	35 (2.0)	40 (3.3)	31 (2.0)	32 (3.4)

Tableau II.2 : Récapitulatif des hauteurs moyennes en m par espèce, et écart-types associés entre parenthèses, sur la Parcelle témoin.

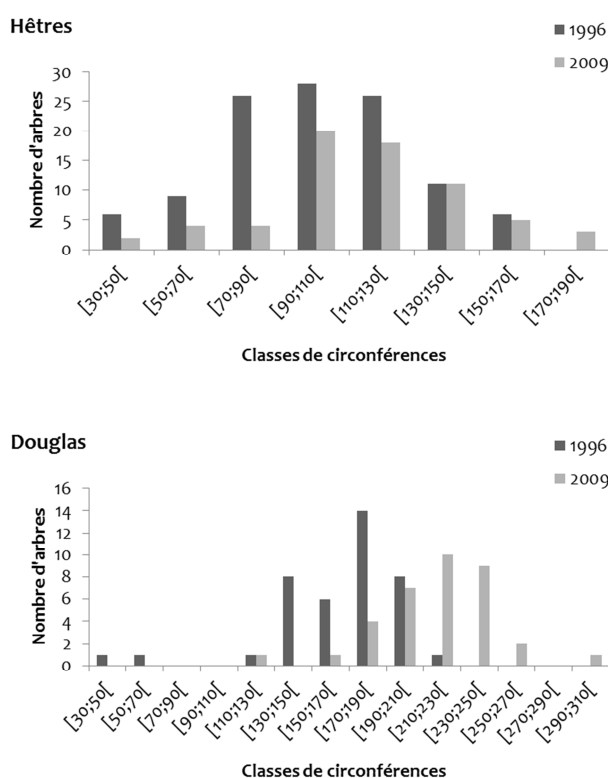


Figure II.2 : Évolution des effectifs par classes de circonférences pour les hêtres (en haut) et les douglas (en bas), entre 1996 et 2009 sur la Parcelle témoin. Les circonférences (C_{130}) ont été mesurées au mètre ruban, à 1m30.

En 2009, la **Parcelle témoin** comptabilisant 155 arbres (167 arbres à l'hectare), est composée principalement de hêtres (46 %), de douglas (29 %), et de sapins (15 %). Le reste du peuplement est composé d'épicéas et de pins (environ 5 % par espèce). Concernant les hêtres, les classes de circonférences [90 ; 110[et [110 ; 130[comprennent la majorité des individus (53 %) et représentent 57 % de la surface terrière. Chez les conifères (douglas et sapins), les classes de circonférences comprises entre 200 et 260 cm représentent 59 % des individus et 81 % de la surface terrière. Les hauteurs moyennes par espèce (Vertex II, Haglöf Sweden AB) sont reprises Tableau II.2.

La comparaison des inventaires de 1996 et de 2009 nous renseigne sur l'évolution du peuplement (Figure II.2). Pour les hêtres, une diminution de près de 40 % des effectifs est observée durant ces 13 dernières années. Un épisode de dépérissement se soldant par la mortalité de nombreux individus s'est produit de 1999 à 2001, à l'échelle du massif Ardennais, du Grand-Duché du Luxembourg et du nord-est de la France (Huart et al., 2003; Nageleisen et Huart, 2005; Rondeux et al., 2002; Rondeux et al., 2003). La mortalité des arbres a eu lieu majoritairement en 2001. Elle a été causée par l'attaque d'insectes xylophages, les scolytes (*Trypodendron domesticum* et *T. signatum*), ainsi que par une espèce de coléoptère lymexylonide, le Lymexylon dermeste (*Hylecoetus dermestoides*). Ces insectes ne s'attaquant qu'à des arbres dépérissants, voire morts, des facteurs primaires ont été suspectés d'avoir affaiblis les arbres les années précédentes. Plusieurs hypothèses ont été émises (gelée précoce et intense en automne après une période de redoux, régimes pluviométriques annuels) et sont discutées dans La Spina (2011). Sur la Parcelle témoin, nous ne pouvons pas clairement distinguer les pertes dues à ce dépérissement de celles dues aux éventuelles actions sylvicoles (interventions potentielles tous les six ans), mais une grande majorité de la mortalité peut tout de même être attribuée à cet épisode. Pour les douglas, seulement 5 individus sont absents de l'inventaire 2009 en comparaison avec celui de 1996. Les accroissements annuels moyens en circonférence, sur ces 13 années, ont été respectivement pour les hêtres, les douglas et les sapins de 0.9, 3.2 et 2.7 cm.an⁻¹.

C'est sur la **Parcelle témoin**, que se sont organisées, à partir de 2009, la majorité des mesures mises en place au cours de ce doctorat (variabilité de la réserve en eau utile, SFD, flux d'interception, surfaces foliaires, dendrométrie, dendrochronologie ; Tableau II.6 et Figure II.17). Au cours de l'étude, l'inventaire forestier a été étendu à la **Parcelle C100** (750 arbres), qui correspond à un cercle d'un rayon de 100 m, centré sur la tour (Figure II.1 ; Tableau II.1). Étant donné l'hétérogénéité du site, l'inventaire de la Parcelle C100 permet d'améliorer la prise en compte des diverses sources participant aux flux mesurés par eddy covariance (espèces et surfaces terrières ; Figure II.3), en comparaison à l'inventaire de la Parcelle témoin, principalement centré sur les hêtres et les douglas. Un élargissement de la Parcelle Témoin à la Parcelle C100, nous permet de caractériser en particulier le sous-peuplement « conifère mixte » (principalement sapins, épicéas et tsugas), qui en moyenne présente une surface terrière plus élevée que celle des hêtres et des douglas (Tableau II.12).

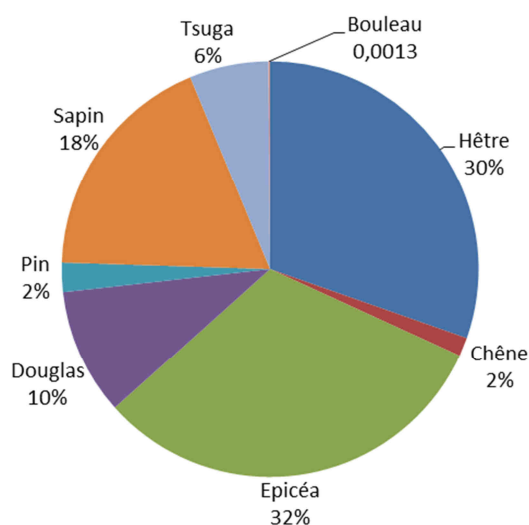


Figure II.3 : Nombre d'arbres en pourcentage en fonction de l'espèce, au sein de la Parcelle C100.

II.1.2. Eddy covariance : flux de carbone



Figure II.4 : La tour à flux de Vielsalm en 2009 (Rémy Soubie).

La tour d'eddy covariance, d'une hauteur initiale de 36 m, a été remplacée en 2009 pour atteindre une hauteur de 52 m, afin de toujours surplomber la végétation (Figure II.4). À partir de fin mars 1997 et jusqu'en 2008, les mesures ont été effectuées à une hauteur de 40 m, les instruments de mesures étant alors placés à l'extrémité d'un mât, au sommet de la tour. Le système d'eddy-covariance mis en place à Vielsalm et la méthodologie de mesure sont décrits dans Aubinet et al. (1999, 2001, 2002), ainsi que dans de Ligne et al. (2010). Ce système

permet la mesure du NEE ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) et de l'évapotranspiration réelle, ET (mm) sur un pas de temps de 30 min.

II.1.2.1. Flux de carbone et discrimination des espèces

Etant donné la complexité d'analyse des mesures d'eddy covariance sur le site de Vielsalm (hétérogénéité du couvert, anisotropie des conditions climatiques) la distinction des espèces au sein des flux de carbone et d'évapotranspiration mesurés est difficile. Ce paragraphe présente les différentes méthodes et résultats développés sur les flux de carbone, servant alors de bases à l'analyse des flux d'évapotranspiration au Chapitre V, ainsi qu'à une première évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE; Annexe 13), indice de productivité défini par le rapport entre un gain de carbone et une perte d'eau.

La base de données sur les flux de carbone a donné lieu à de nombreuses publications dont Aubinet et al. (2001, 2002, 2005) et Heinesch

et al. (2007, 2008). Elles se sont entre autres intéressées à la contribution de chaque espèce au flux de carbone enregistré et au calcul de la séquestration de carbone par l'écosystème. D'après Aubinet et al. (2002), « le seul moyen de calculer correctement la séquestration de carbone dans un site hétérogène est d'identifier les différentes sous-parcelles de végétation, de séparer leurs contributions au flux total en séparant les données en différentes séries, de combler les données manquantes de chaque série en tenant compte de l'anisotropie des conditions climatiques et de sommer séparément les données de flux bi-horaires dans chaque série ».

L'estimation de la contribution de chaque espèce au flux total peut se faire sur base de modèles de footprint (pour rappel zone d'empreinte de la mesure par eddy covariance ; Schuepp et al., 1990), permettant de rechercher les zones d'influence des mesures, couplés à une cartographie des peuplements (Figure II.1 d ; Aubinet et al., 2001). La zone d'influence dépend essentiellement de deux paramètres : la direction du vent et les conditions de stabilité atmosphérique. A Vielsalm, les mesures prises sous vent provenant du nord-est caractérisent principalement les flux provenant des douglas (Figure II.1 c) tandis que celles sous vent du sud-ouest qui est la direction dominante sur le site (49 % des jours ; Figure II.1 c) caractérisent principalement les flux provenant des hêtres. Dans les autres secteurs la distinction entre espèces est moins claire (Aubinet et al., 2001, 2005). Cette contribution de chaque espèce est aussi dépendante des conditions de stabilité atmosphérique. La discrimination est la plus efficace en journée lors de conditions atmosphériques instables. La nuit avec des conditions plus stables et un footprint plus étendu, cette discrimination devient impossible. Sur base d'Aubinet et al. (2001), Heinesch (2007) reporte que « en conditions instables, l'extension longitudinale de la zone cumulative d'influence à 90 % (zone en amont de l'écoulement qui englobe 90 % des sources) est de 437 m alors qu'en conditions neutres, elle est de 1037 m et en conditions stables, elle est d'environ 1800 m ». A l'hétérogénéité des peuplements s'ajoute une hétérogénéité climatique. Selon la direction du vent, les conditions climatiques sont différentes sur le site. Les journées pour lesquelles le vent provient du nord-est, sont généralement associées à des conditions anticycloniques (ensoleillées), alors que si le vent provient de l'ouest et/ou

du sud-ouest, les journées sont davantage associées à des conditions cycloniques (Aubinet et al., 2002). Cela amène donc à prendre en compte l'anisotropie des conditions climatiques pour la reconstitution de séries par espèce ou l'étude de la variabilité interannuelle des flux.

Aubinet et al. (2002) en discriminant les espèces, hêtres et douglas, sur la base de la direction de vent ($330-60^\circ$ pour le secteur douglas et le reste pour le hêtre) et en comblant les données manquantes en tenant compte de la phénologie et des conditions climatiques, calculent une séquestration de carbone sur 5 ans (de 1996 à 2001) pour les hêtres et les douglas de 2.28 et 3.58 kg C.m^{-2} respectivement. Pour les secteurs associés aux hêtres, une contribution non négligeable des conifères intervient cependant, et amène sûrement à une surestimation de la séquestration associée uniquement aux hêtres (Aubinet et al., 2002, 2005). Etant donné l'hétérogénéité du site, l'association de secteurs géographiques aux espèces reste complexe. Aubinet et al. (2005) à partir d'un modèle décrivant le site comme un patchwork de 3 sous-parcelles de végétation homogène (hêtre, douglas et épicéas-sapins), constatent, pour des conditions climatiques et édaphiques non limitantes, et des valeurs de PPFD supérieures à $900 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, que l'efficacité de séquestration de carbone des douglas est inférieure à celle des hêtres, et celles des épicéas et sapins inférieures à celle des douglas.

Laffineur et al. (2011), dans une étude consacrée aux composés organiques volatils, utilisent sur le site de Vielsalm le modèle de footprint de Neftel et al. (2008). Ce modèle fournit, sur le pas de temps de 30 min, les % des flux provenant de chaque espèce ou groupe d'espèce (hêtre, douglas ou conifères mixte). Nous utiliserons ce modèle afin de comparer en 2010 et 2011 les mesures d'ET par eddy covariance et l'ETR calculée à l'échelle de la Parcelle C100 (Section II.5.3 et II.6.3).

Dans le but d'étudier la variabilité interannuelle de la séquestration de carbone sur le site de 1998 à 2008, un travail de fin d'étude réalisé à l'UPB durant l'année académique 2012-2013 (Renchon, 2013), en collaboration avec le groupe des sciences forestières (UCL) dans le cadre de ce doctorat, a été mis en place. La séquestration du carbone est évaluée au travers de la GPP (Section I.1). Elle est déduite des flux de carbone mesuré (NEE) et du calcul

de la respiration de l'écosystème (TER). La TER utilisée dans cette étude, est calculée selon l'approche dite « de nuit ». Une fonction de réponse des flux nocturnes est établie en fonction de la température, et extrapolée aux conditions de jour. La GPP moyenne, de 1998 à 2008, est analysée mensuellement, mesurée sur le pas de temps de 30 min, en fonction des secteurs de vent et des classes de PPFD (principal moteur de la GPP), afin de quantifier la variabilité au sein des mesures pouvant être attribuée à la direction du vent et à l'anisotropie des conditions climatiques. Au cours de ce travail de fin d'étude, 2 secteurs de vents sont définis (Figure II.5). Le secteur nord-est (330-90°) et le secteur sud-ouest (90-330°), que l'on nommera respectivement, NE(2) et SW(2), pour éviter les confusions avec les secteurs définis dans notre étude de ET (Section II.6.3). L'amplitude des classes de PPFD est de $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Le GPP est considéré à saturation pour des valeurs de PPFD supérieures à $1000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. La variabilité interannuelle est analysée pour la NEE, la GPP, et la TER, en fonction des conditions climatiques et édaphiques, sur l'ensemble de l'année ou par saison. Elle est également caractérisée, pour la GPP moyenne, sur un pas de temps de 30 min par secteurs de vent, par classes de PPFD, et par classes de VPD. Les saisons sont, l'hiver (DOY 1-60 et 330-365), le printemps (DOY 60-150), l'été (ou période de feuillaison ; DOY 150-270) et l'automne (DOY 270-330). Les classes de VPD ont une amplitude de 5 hPa. Les analyses se concentrent sur des conditions de PPFD à saturation.

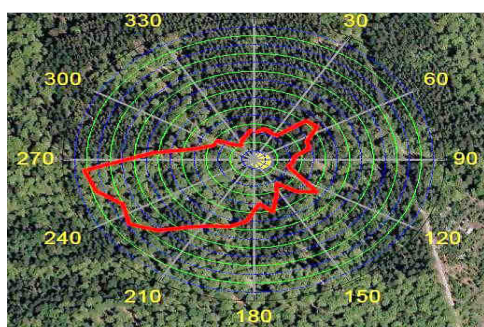


Figure II.5 : Photo aérienne du site de Vielsalm couplée à une rose des vents et une représentation du footprint des mesures (la tour se trouvant au centre des cercles) pour une direction du vent sud-ouest. Le premier cercle a un rayon de 20 m, les rayons des cercles suivants augmentant successivement de 20 m.

Renchon (2013) montre sur la période 1998-2008, à partir d'une comparaison de la variabilité totale de la GPP annuelle avec celle

potentiellement induite uniquement par la direction de vent (calculée sur une échelle mensuelle), que la variabilité interannuelle des flux sur le site de Vielsalm, à l'échelle du peuplement, est peu dépendante de la direction de vent. L'influence la plus forte de la direction du vent est mesurée pour les mois d'avril et septembre et est expliquée par la phénologie des hêtres. Ces conclusions permettent l'étude de la variabilité interannuelle des flux mesurés à Vielsalm, à l'échelle du peuplement, sans discrimination du footprint. La NEE mesurée est en moyenne égale à $-0.56 \text{ kg C.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ de 1998 à 2008 (Figure II.6 et Tableau II.3), et est négative pour toutes les années faisant du site de Vielsalm un puits de carbone. La TER est évaluée en moyenne à $1.05 \text{ kg C.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, aboutissant alors à une GPP en moyenne 3 fois supérieure à la NEE, soit $-1.61 \text{ kg C.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Figure II.6 et Tableau II.3). Au cours des 11 années considérées, la GPP augmente significativement ($+23 \text{ g C.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$), alors que les augmentations de la NEE et de la TER ne sont pas significatives (Renchon, 2013). Cette augmentation peut s'expliquer en partie par des conditions climatiques plus favorables et des périodes de végétation plus longues (Pilegaard et al., 2011; Schwartz et al., 2006). La variabilité interannuelle des flux de GPP hors période de végétation, est expliquée à 80% par les variations de PPFD. Durant les périodes de végétation, le PPFD atteignant régulièrement des niveaux de saturation pour la photosynthèse à l'échelle de la canopée, les variations de GPP interannuelles sont expliquées à 75 % par la combinaison du PPFD et du VPD. Les résidus peuvent être expliqués selon Aubinet et al. (2002) par les variations interannuelles de LAI et de dates de débourrement et de chutes des feuilles. Les années 1998 et 2000 ressortent comme des années à faible GPP, des faibles PPFD tout au long de l'année, et les attaques de scolytes, expliquant respectivement ces valeurs (Aubinet et al., 2002). Une baisse significative de la GPP a été décrite pour beaucoup de sites forestiers en Europe en 2003 (Ciais et al., 2005; Granier et al., 2007), mais ce n'est pas le cas pour Vielsalm. La NEE cette année-là, est la plus forte mesurée sur le site de 1998 à 2008, alors que la TER est par contre la plus faible. À l'échelle annuelle, étant donné les proportions de direction de vent en fonction des secteurs, ces conclusions sont davantage représentatives du sous-peuplement de hêtres, que de celui composé majoritairement de résineux. La plus forte valeur de GPP mesurée correspond à l'année 2008, durant

laquelle des forts PPFD et des faibles VPD ont contribué à cette plus forte assimilation de carbone.

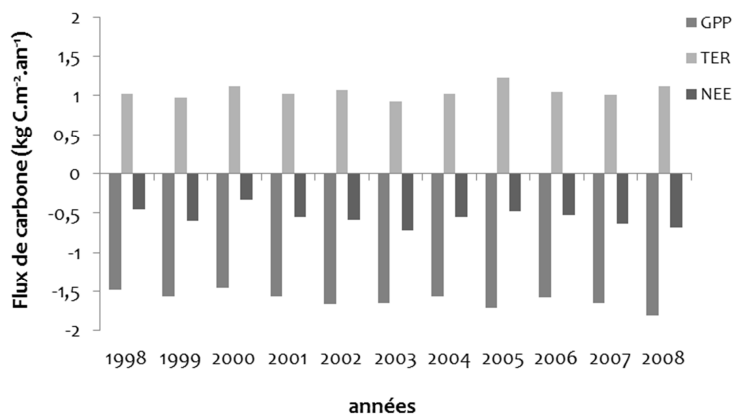


Figure II.6 : Flux de carbone annuels ($\text{kg C.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$), mesurés par eddy covariance de 1998 à 2008. Dans les bilans de carbone des écosystèmes, les entrées (GPP, Gross Primary Production) sont par convention négatives et les sorties (TER, Total Ecosystem Respiration) sont positives. Lorsque la NEE (Net Ecosystem Exchange ; $\text{NEE} = \text{GPP} - \text{TER}$) est négative, l'écosystème correspond alors à un puits de carbone et inversement à une source. Issu de Renchon (2013).

	GPP	TER	NEE
Moyenne	-1.61	1.05	-0.56
Écart-type	0.10	0.08	0.11
Coefficient de variation	-6	8	-19

Tableau II.3 : Moyenne, écart-type et coefficient de variation (rapport de l'écart-type sur la moyenne exprimé en %) des flux de GPP, de TER et de NEE mesurés par eddy covariance, de 1998 à 2008, sur le site de Vielsalm, à l'échelle du peuplement. Issu de Renchon (2013).

La variabilité interannuelle due à la direction de vent a été jugée négligeable face à la variabilité globale de la mesure (Renchon, 2013), cependant pour certaines classes de VPD, des différences sont observées concernant les moyennes bi-horaires de GPP, établies pour la classe de PPFD à saturation, lorsque les secteurs SW(2) et NE(2) sont pris en compte

séparément (Figure II.7). Jusqu'à la classe de VPD 15-20 hPa, les moyennes de GPP pour le secteur NE(2), dominé par les résineux, sont supérieures à celles du secteur SW(2) à dominance feuillus. À partir de la 5^{ème} classe de VPD, la GPP du secteur SW(2) est supérieure à celle du secteur NE(2).

Pour des conditions climatiques similaires, il semble alors que le sous-peuplement de conifères à Vielsalm, dominé par les douglas, présente globalement une assimilation de carbone brute légèrement plus élevée que celle du peuplement à dominance de feuillus. Cette différence est cependant à considérer avec prudence, les résultats correspondant à des conditions de PPFD optimales et pouvant être le reflet de multiples facteurs (capacité photosynthétique des espèces, LAI des peuplements compris dans le footprint de la mesure, effectifs des mesures pour chaque secteur). Pour les deux espèces, la GPP moyenne diminue environ de moitié de VPD1 (environ $22.5 \mu\text{mol C.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), à VPD7 (environ $11 \mu\text{mol C.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). L'analyse des flux de carbone, à partir du changement de la tour n'a pas encore été réalisée.

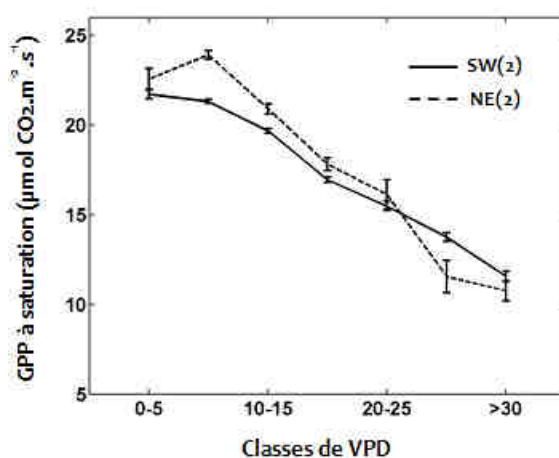


Figure II.7 : Moyenne et écart-type du GPP ($\mu\text{mol CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), pour la classe de PPFD à saturation ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), en fonction des classes de VPD (hPa), établis à partir des données bi-horaires mesurées par eddy covariance, de 1998 à 2008 (sans 1999 et 2000, pour cause de valeurs manquantes), durant la période de végétation, en fonction des secteurs SW(2) (trait continu) et NE(2) (pointillés). Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards. Issu de Renchon (2013).

II.1.3. Données météorologiques

Les données météorologiques reprises sont celles d'intérêt pour cette étude. Pour un descriptif plus complet, se reporter à Aubinet et al. (2001). Ces données météorologiques (Tableau II.4) sont mesurées au sommet de la tour depuis 1996, sur un pas de temps de 30 min. Les données manquantes ont été remplacées intégralement à l'échelle journalière uniquement pour les variables permettant le calcul de l'ETP Penman via le modèle BILJOU© (R_g , T_a , H_R , w_s ; Section I.3; Figure II.8) et pour la pluviométrie incidente (P_i ; Figure II.8). La température et l'humidité relative sont utilisées pour fournir au modèle le VPD (Section I.3). Les données absentes ont été remplacées selon différentes sources et procédures dont les détails ne sont pas toujours connus mais qui sont exposés le plus précisément possible au travers des paragraphes suivants. Les périodes 1998-2009 et 2009-2011 (soit avant et après le changement de la tour) sont traitées séparément.

Variables	Unités	Instruments de mesure	Sigles
Pluviométrie incidente	mm	Pluviomètre à auget basculant (UPB, ULg-GxABT)	P_i
Rayonnement global	$W.m^{-2}$	Pyranomètre (Kipp and Zonen CM5, Delft, The Netherlands)	R_g
Rayonnement net	$W.m^{-2}$	Pyrradiomètre (Schenck 8111, Wien, Austria)	R_n
Densité de flux de photons photosynthétiquement actifs	$\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$	Cellules photos réceptrices (Delta T SD101Q, Cambridge, UK)	PPFD
Température de l'air	$^{\circ}C$	Résistance platine (PT1000, Hy-Cal Eng., El Monte (USA))	T_a
Humidité de l'air	%	Psychromètres (UPB, ULg-GxABT, et General Eastern RH2, Watertown, MA, USA)	H_R
Direction du vent	Deg	Anémomètre sonique (Modèle SOLENT 1012R2, Gill Instruments, Lymington, UK)	w_d
Vitesse de vent horizontale	$m.s^{-1}$	Anémomètre sonique (Modèle SOLENT 1012R2, Gill Instruments, Lymington, UK)	w_s

Tableau II.4 : Variables météorologiques mesurées sur la tour d'eddy covariance du site de Vielsalm depuis 1996 et unités, instruments de mesures et sigles associés.

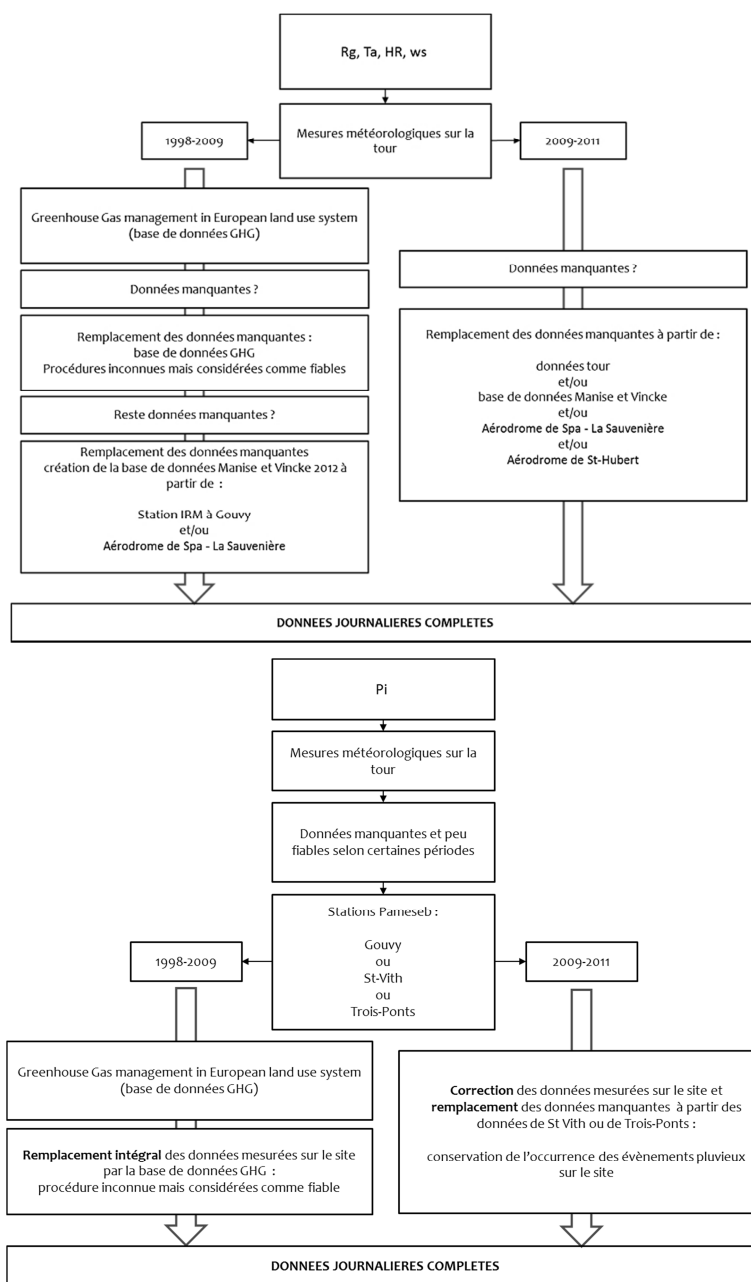


Figure II.8 : Etapes d'obtention de données journalières complètes, pour le rayonnement global (R_g , $W.m^{-2}$), la température de l'air (T_a , $^{\circ}C$), l'humidité relative de l'air (HR , $\%$) et la vitesse du vent (ws , $m.s^{-1}$) en haut, et la pluviométrie incidente (P_i , mm) en bas, pour les périodes 1998-2009 (avant le changement de la tour) et 2009-2011 (après le changement de la tour). Pour les détails se reporter au texte (Sections II.1.3.1 et II.1.3.2).

II.1.3.1. Période 1998-2009

Rg, Ta, HR et ws (Figure II.8)

Pour la période, **1998-2009**, les données absentes n'ont pas été remplacées par nos soins. Tout d'abord traitées par la base de données GHG (Figure II.8), le reste des données manquantes ont été comblées par Manise et Vincke (2012). La base de données GHG (Greenhouse Gas management in European land use system) regroupe les données des anciens projets européens tels que CarboEurope-IP ou FLUXNET, (<http://gaia.agraria.unitus.it/home>). Ce gestionnaire de base de données est en charge de combler les données manquantes qui lui sont fournies par l'équipe de l'UPB. Les données téléchargeables sont **complètes** sur le pas de temps de 30 min **pour Rg et Ta**. Le VPD est directement fourni par la base de données. Des données de **VPD sont manquantes** en raison de l'absence de valeurs d'humidité relative, **en 1999 (88 %), 2000 (13 %) et 2004 (3 %)**. Concernant la **vitesse du vent**, on comptabilise **8 % de données absentes** sur le pas de temps de 30 min **entre 1998 et 2008**.

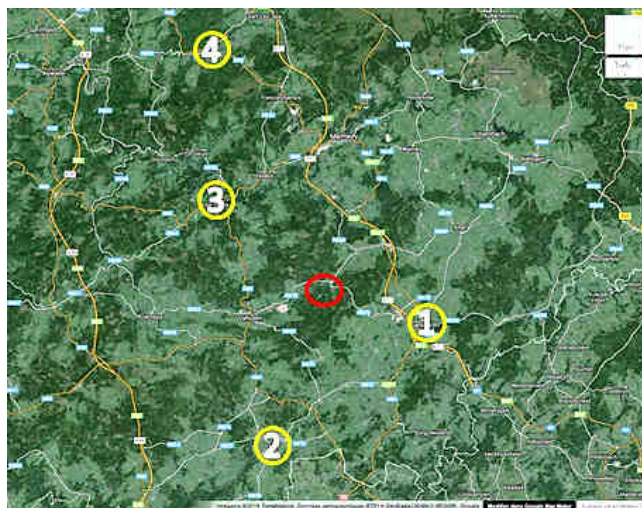


Figure II.9 : Carte localisant les stations météorologiques de l'asbl Pameseb et de l'IRM ayant contribué au remplacement des données manquantes dans la base de données GHG de 1998 à 2011. Le site expérimental de Vielsalm est entouré en rouge, les communes de St Vith (1), Gouvy (2), Trois Ponts (3) et Spa (4), en jaune.

Manise et Vincke (2012) ont remplacé les données manquantes de la base de donnée GHG (VPD et ws) à l'échelle journalière, à partir des données de la station de **l'IRM située à Gouvy** (Figure II.8 et II.9), ou des données issues de la base de donnée Tu Tiempo (<http://www.tutiempo.net/clima/Belgica/BE.html>), fournissant des données météorologiques enregistrées à **Spa (station météorologique de l'aérodrome de Spa - La Sauvenière ;** Figure II.8 et II.9). Des régressions linéaires sont établies entre les données originales (base de données GHG) et les données de l'IRM et/ou de l'aérodrome. Les modèles obtenus sont alors utilisés afin de remplacer les données manquantes de la base de données GHG. La station de Gouvy a été utilisée pour le VPD (1999 et 2000) et pour ws. La station de Spa a été utilisée pour le VPD en 2004 (Figure II.10).

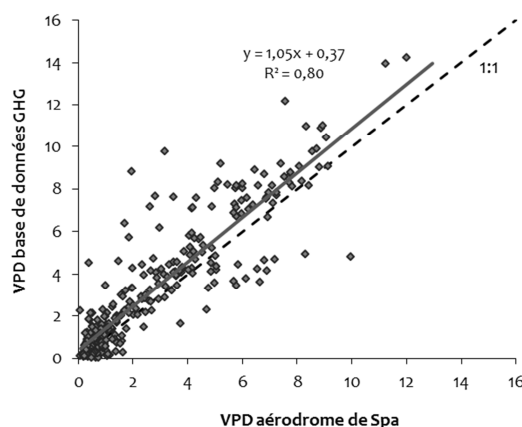


Figure II.10 : Déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air moyen journalier (VPD, hPa) issu de la base de données GHG (mesuré sur le site de Vielsalm) en fonction du VPD mesuré à Spa (hPa ; aérodrome de Spa – La Sauvenière ; base de données Tu Tiempo), en 2004 (janvier à juillet et sept à décembre).

Pi (Figure II.8)

Jusqu'au changement de la tour en 2009, la pluviométrie incidente téléchargeable sur la base de données GHG, ne provient pas du site de Vielsalm. **La pluviométrie incidente mesurée sur le site depuis 1998, s'est avérée non fiable** pour différentes raisons (coupures de courant lors d'orages, saturation de l'auget basculant lors de fortes précipitations, fuites dans le collecteur ; Figure II.11). Equipée jusqu'en juin 2010 d'un seul

pluviomètre, la tour en possède désormais deux permettant principalement de pallier ces éventuels problèmes. Les données ont été finalement remplacées, de 1998 à 2009 (avant le changement de la tour), par les données commandées à l'asbl Pameseb, possédant un réseau de stations météorologiques sur l'ensemble de la Wallonie. Les données des stations de Gouvy, de St-Vith (environ 20 km de Vielsalm) et de Trois-Ponts (environ 13 km) ont été utilisées (Figure II.8 et II.9). Les données de l'asbl Pameseb ont été fournies à **la base de données GHG qui s'est chargée du traitement et du remplacement des anciennes mesures** (Figure II.8). Les procédures de remplacement ne nous ont pas été communiquées. Un exemple de relation entre la pluviométrie incidente mesurée à St-Vith et celle mesurée à Vielsalm durant une période de bon fonctionnement des pluviomètres (juillet 2010) est fournie Figure II.12. Etant donné la forte variabilité spatiale de la pluviométrie incidente, notamment en été (orages), les événements pluvieux sont globalement bien corrélés entre les deux stations de mesures. Le cumul mensuel durant ce mois est proche, avec 85 mm pour St-Vith et 88 mm pour Vielsalm.

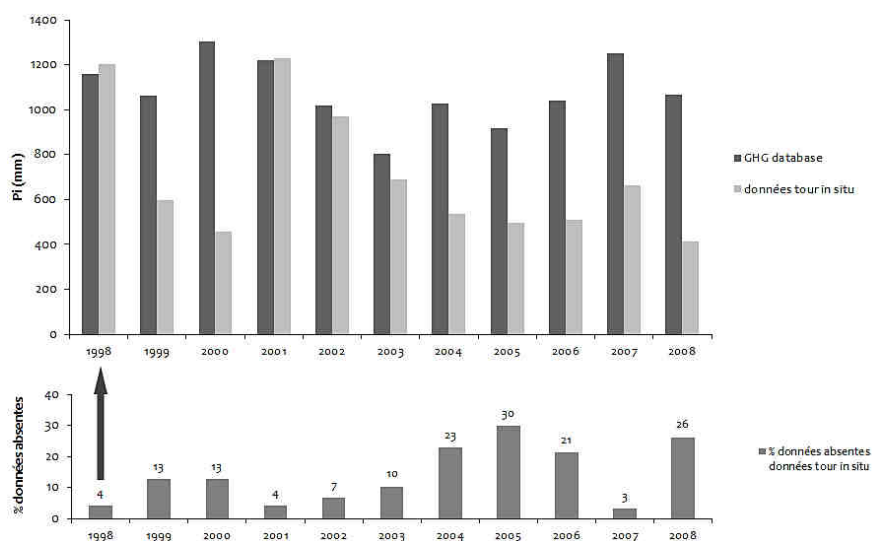


Figure II.11 : Pluviométrie incidente cumulée annuelle (P_i , mm), calculée par la base de données GHG à partir des stations de l'asbl Pameseb et mesurée sur le site de Vielsalm (sans remplacement des valeurs manquantes) à partir du pluviomètre placé au sommet de la tour (données tour *in situ*). Les pourcentages de valeurs absentes annuels pour la mesure *in situ* de P_i , sont indiqués sur le graphique du bas.

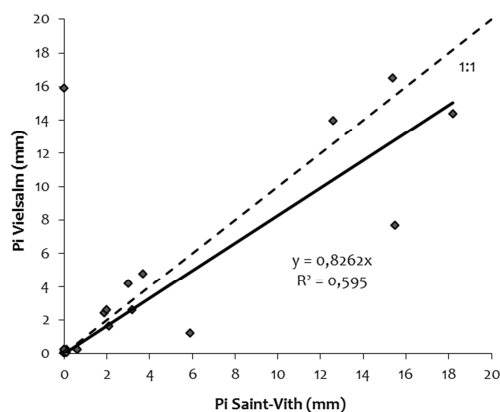


Figure II.12 : Pluviométrie incidente (P_i , mm) mesurée à Vielsalm en fonction de P_i mesurée à St-Vith durant le mois de juillet 2010. Les données sont présentées à l'échelle de l'évènement pluvieux, se déroulant entre les 2 sites de mesure soit simultanément, soit décalés de quelques heures au maximum.

II.1.3.2. Période 2009-2011

De 2009 à 2011 les données météorologiques nous ont été fournies directement par l'équipe de l'UPB. Les données manquantes ont alors été comblées par nos soins (Figure II.8). Les pourcentages de données manquantes mesurées sur le site de Vielsalm, en fonction de la variable, de l'année et du pas de temps, sont repris Tableau II.5.

	2009	2010	2011
P_i	30	4	0
Rg	31	4	0
Ta	29	0	0
HR	43.5	0.08	15
ws	21	9	5

Tableau II.5 : Pourcentages de données manquantes par années, sur le pas de temps de 30 min, pour la pluviométrie incidente (P_i), le rayonnement global (Rg), la température de l'air (Ta), l'humidité relative (HR) et la vitesse du vent (ws).

Rg, Ta, HR et ws (Figure II.8)

Les données de **température** ont été remplacées uniquement à l'échelle journalière à partir des données de la station de **Gouvy (Manise et Vincke, 2012)**. Il en est de même pour les données de **rayonnement global**, sauf en décembre 2010 où elles ont été remplacées à partir d'une **régression**

linéaire établie d'octobre à décembre 2010 avec les mesures des **capteurs PAR sur le site**.

Concernant l'**humidité relative**, les données manquantes ont été remplacées en partie, par l'**humidité relative mesurée à 12 m sur la tour**, sur un pas de temps de 30 min selon la disponibilité des données (**8.5 % en 2009, 0.02 % en 2010 et 11 % en 2011** ; Figure II.13). Pour le reste des données, des **régressions linéaires** à l'échelle journalière entre l'humidité relative mesurée à **Spa** (station météorologique de l'aérodrome de Spa - La Sauvenière ; Figure II.14) et celle de la tour, ont été utilisées pour les remplacer.

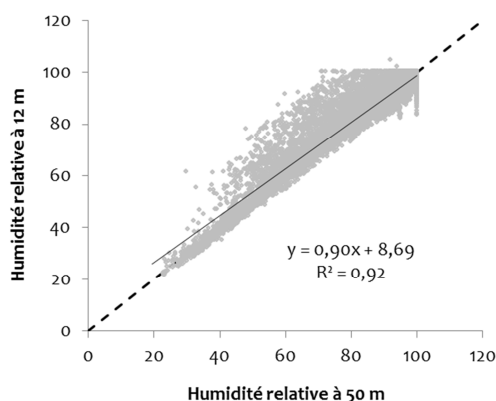


Figure II.13 : Humidité relative mesurée à Vielsalm sur la tour à 12 m en fonction de l'humidité relative mesurée à 50 m (base de données GHG), de 2009 à 2011, en fonction de la disponibilité des données.

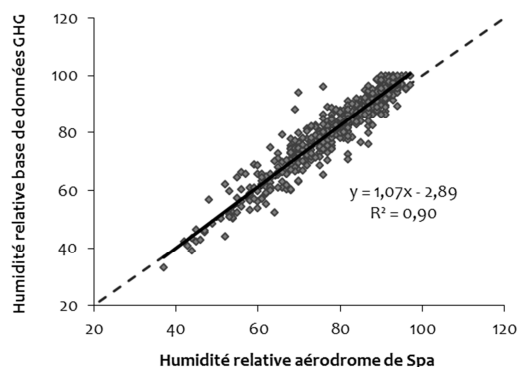


Figure II.14 : Humidité relative mesurée sur la tour à Vielsalm à 50 m (base de données GHG) en fonction de l'humidité relative mesurée à Spa (aérodrome de Spa- La Sauvenière, base de données Tu Tiempo) du 1^{er} janvier 2009 au 30 septembre 2010.

Les données manquantes de **vitesse de vent jusqu'en septembre 2010**, ont été remplacées à l'échelle journalière à partir des données de la station de **Gouvy (Manise et Vincke, 2012)**. Jusqu'en octobre 2011, les données ont ensuite été remplacées par une **valeur moyenne bimensuelle à partir des mesures sur le site**. Pour la fin de l'année 2011, une **régression**

linéaire (de novembre 2011 à mai 2012) entre les valeurs enregistrées sur la station de **St Hubert** (base de donnée « Tu Tiempo », station météorologique de l'aérodrome de St Hubert, 60 km environ au sud-ouest du site de Vielsalm) et celles de la tour, a finalement été utilisée pour combler les données manquantes (Figure II.15).

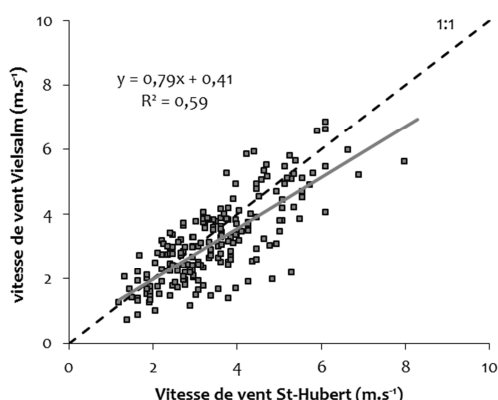


Figure II.15 : Vitesse du vent mesurée sur la tour à Vielsalm (base de données GHG) en fonction de la vitesse du vent mesurée à St-Hubert (aérodrome de St-Hubert, base de données Tu Tiempo) de novembre 2011 à mai 2012.

Pi (Figure II.8)

A partir du changement de la tour et jusqu'à fin juin 2010, les données de l'asbl Pameseb des stations de St-Vith et de Trois Ponts ont été utilisées pour **corriger** les données enregistrées sur la tour **et combler** les vides. La comparaison de 2008 à juin 2010 des données de St-Vith et des données de la tour révèle une sous-estimation moyenne de ces dernières d'environ 43 % (Figure II.16). Afin de conserver une occurrence précise des événements pluvieux sur le site depuis 2009, les données acquises à partir de la tour n'ont pas été remplacées par celles de l'asbl Pameseb, mais augmentées de 76 % de leurs valeurs. Les données manquantes ont par contre été directement remplacées par les valeurs acquises à St-Vith ou Trois-Ponts (selon la disponibilité des données). A partir de juillet 2010, aucune donnée pluviométrique n'est manquante.

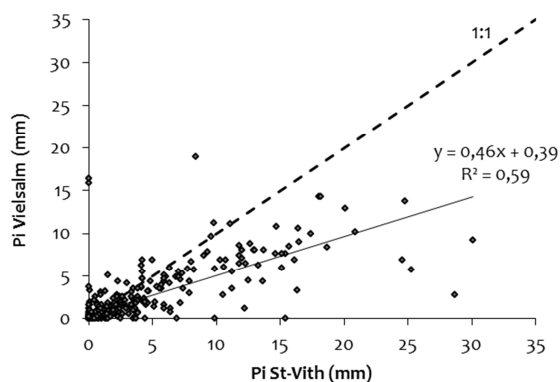


Figure II.16 : Pluviométrie incidente (Pi, mm) mesurée à Vielsalm en fonction de Pi mesurée à St-Vith du 1^{er} janvier 2008 à juin 2010. Les données sont présentées à l'échelle journalière.

II.2. Présentation générale des mesures utilisées dans cette étude

Les mesures utilisées durant cette étude, déjà en place ou développées depuis 2009, sont reprises Tableau II.6 et représentées Figure II.17. Des informations complètes, sur les matériels et les protocoles de mesures, pour les compartiments végétation et sol, sont exposés dans les paragraphes suivants. Au sein de ces deux compartiments toutes les mesures, mis à part les inventaires forestiers, ont été développées dans la Parcelle Témoin, avec pour objectif principal de distinguer les sous-peuplements de hêtre (accompagnés de sapin) et de douglas.

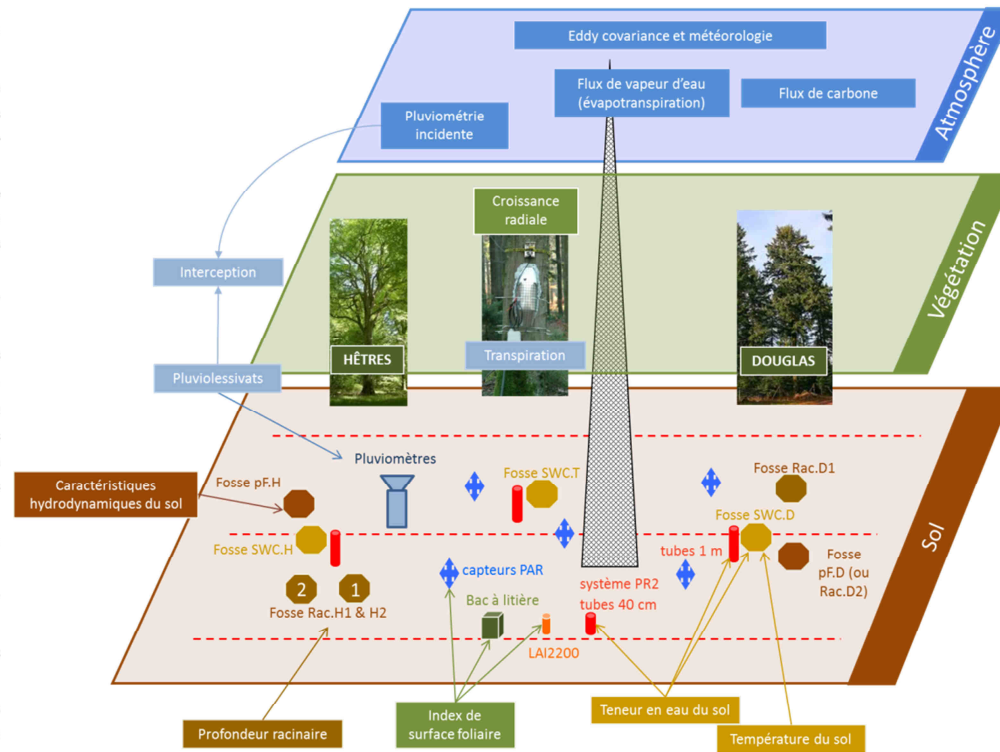
Compartiments	Mesures (matériel et/ou méthode)	Pas de temps				Équipe
		30 min	15 j.	An	Ponct.	
ATMO-SPHERE	Flux de carbone (eddy covariance)					UPB
	Flux de vapeur d'eau (eddy covariance)					UPB
	Flux de chaleur sensible (eddy covariance)					UPB
	Flux d'énergie : rayonnement global et net, PAR					UPB
	Météorologie : pluviométrie, température, pression et humidité de l'air					UPB
VEGETATION	Surface foliaire	LAI (LAI 2200)				UCL
		VAI (Capteurs PAR sous couvert)				UPB
		LAI _{max} (Bacs à litières)				UCL
	Fonctionnement hydrique	Flux transpiratoires ligneux (dissipation thermique)				UCL
		Pluiolessivats et Interception (pluviomètres sous couvert)				UCL
	Croissance radiale	(Dendromètres)				UCL
		(Dendrochronologie)				UCL
		(Inventaires forestiers)				UCL
	SOL	Teneur en eau volumique du sol (Réflectométrie)				UCL
						UCL
		Caractéristiques hydrodynamiques du sol, profondeur et profils racinaires				UCL

Tableau II.6 : Mesures, matériel et/ou méthode (indiqués entre parenthèse), pas de temps (30 min : semi-horaire ; 15j. : bimensuel ; An : annuel ; Ponct. : ponctuel) et équipe en charge, au sein des 3 compartiments du *continuum* sol-végétation-atmosphère, sur le site de Vielsalm entre 1996 et 2011. UPB : Unité de Physique des Biosystèmes. UCL : Université Catholique de Louvain. LAI : Index de surface foliaire. VAI : Index de surface de la végétation. LAI_{max} : Index de surface de végétation maximal enregistré annuellement. PAR : Rayonnement photosynthétiquement actif.

Chapitre II

Figure II.17 : Mesures mises en place à Vielsalm au sein du continuum sol-végétation-atmosphère.

-  Fosses SWC.H, SWC.D et SWC.T : suivi de la teneur en eau du sol sur le pas de temps de 30 min, pour les hêtres, les douglas, et la transition entre les 2 sous-peuplements respectivement.
-  Système PR2 tubes 40 cm : points de mesure bimensuelle (au nombre de 30) de la teneur en eau du sol jusqu'à 40 cm de profondeur, répartis sur 3 transects (pointillés rouges - - -).
-  Tubes 1 m : points de mesure bimensuelle de la teneur en eau du sol jusqu'à 1 m de profondeur.
-  Fosses Rac.H1 et H2, et Rac.D1 et D2 : fosses de profils racinaires pour les hêtres et les douglas respectivement.
-  Fosses pF.H et pF.D : fosses de prélèvement d'échantillons de sol utilisés afin de déterminer les courbes de rétention en eau en fonction de la succion exercée en laboratoire pour les hêtres et les douglas respectivement.
-  LAI2200 : points de mesure bimensuelle du LAI2200 répartis sur 3 transects (pointillés rouges - - -).
-  Capteurs PAR : mesure du PAR sous-couvert pour l'estimation du VAI sur un pas de temps de 30 min.
-  Bacs à litières : bacs répartis sur 3 transects (pointillés rouges - - -) afin de déterminer le LAI_{max} des feuillus.
-  Pluviomètres : pluviomètres sous-couvert répartis sur 3 transects (pointillés rouges - - -) pour la mesure bimensuelle des pluiolessivats.



II.3. Surface d’aubier et surface foliaire

II.3.1. Surface d’aubier

La surface d’aubier est définie ici comme la partie potentiellement conductrice du tronc et des branches des arbres. Au sein de cette surface d’aubier, la densité de flux de sève des espèces n’est pas uniforme, définissant un profil radial de densité de flux de sève (Section II.4.2.1). La mesure de la surface d’aubier est importante pour le calcul des densités de flux de sève et de la transpiration (Equation I.8), en particulier sur le site de Vielsalm où plusieurs espèces coexistent.

Pour les hêtres, la distinction entre l’aubier et le duramen est difficile (Betsch, 2010; Granier et al., 2000) car aucune différence de couleur n’est remarquable. Toute la surface (coupe transversale) est alors considérée comme conductrice et la surface d’aubier totale est considérée égale à la section transversale du xylème.

Pour les douglas, l’aubier et le duramen sont facilement distinguables à l’œil nu. Huit carottes ont été prélevées en 2009, en fonction des classes de circonférences échantillonnées sur le site, afin de déterminer la longueur radiale de l’aubier de chaque arbre et d’établir une régression en fonction de leurs circonférences respectives.

Pour les sapins, la distinction entre aubier et duramen est moins évidente que chez les douglas. La relation entre la circonférence et la surface d’aubier a été tirée de la littérature (Fiora et Cescatti, 2006). Le rayon d’aubier est estimé à 40 % du rayon total.

Pour les autres espèces présentes sur le site, les pourcentages de rayon d’aubier en fonction du rayon total sont également issus de la littérature, et estimés à 45 % pour les épicéas (Lu et al., 1995), et 40 % pour les tsugas.

II.3.2. Indice de surface foliaire (LAI) et de végétation (VAI)

Le LAI est mesuré sur le site expérimental par deux types d'instruments (Tableau II.6 et Figure II.17) : 1) un analyseur de canopée et 2) des bacs à litière. Le VAI, qui correspond à des m² de bois et de feuilles par m² de sol, est estimé à partir de capteurs PAR (Tableau II.6, Figure II.17 et Equation II.1). Trois types de mesures ont été développés pour leur complémentarité. Les mesures des capteurs PAR sont automatisées et réalisées en continu, mais nécessitent une calibration via des méthodes de références, telle que celle des bacs à litières pour les hêtres. Les mesures au LAI2200 fournissent une mesure de la variabilité spatiale du LAI. Les trois méthodes sont non destructives. L'analyseur de canopée et les capteurs PAR sont des méthodes de mesures indirectes, basées sur la théorie des transferts radiatifs et sur la distribution angulaire des feuilles (Monsi et Saeki, 1953). Ces méthodes fonctionnent sur la comparaison d'un rayonnement hors couvert et d'un rayonnement sous couvert afin d'en déduire une mesure de la transmission de la lumière. La méthode des bacs à litière est une mesure dite semi-directe de la surface foliaire, uniquement applicable aux peuplements feuillus.

II.3.2.1. Capteurs PAR

Des capteurs PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, DeltaT QS, Cambridge, UK) sont disposés sur la Parcelle témoin par groupe de 5 sous chaque sous-peuplement (2*5 capteurs par sous-peuplement) et un groupe de 3 capteurs à l'intersection des deux (Figure II.17). Soit un total de 23 capteurs sur la Parcelle témoin. Au sein de chaque groupe de 5, les capteurs sont disposés en croix, à 1,0 m autour d'un capteur central. Pour le groupe de 3, les capteurs sont disposés en triangles, chacun espacé de 1,0 m des autres. Les capteurs ont été calibrés en 2009 à l'aide d'un capteur neuf (LI-190SA, Li-Cor, Lincoln, Nebraska, USA), avant d'être installés. Ils sont utilisés afin de mesurer en continu l'évolution du couvert. La saisie automatique du signal est assurée toutes les 30 s par une centrale d'acquisition (fabrication

artisanale, UPB) et les données sont récoltées sous la forme de moyennes bi-horaires. Le traitement des données (UPB) en comparaison avec le rayonnement incident mesuré au-dessus de la canopée fournit une estimation du VAI (Equation II.1), étant donné que l'absorption de la lumière du bois et des feuilles n'est pas dissociable. La méthodologie est décrite dans Aubinet et al. (2002). L'angle zénithal des capteurs PAR étant égal à environ 70°, les groupes de capteurs (par 5 ou 3 capteurs) peuvent être chacun considérés comme un seul point de mesure du VAI. En considérant i) une hauteur moyenne de 25 m pour les hêtres et 40 m pour les douglas et ii) une surface au sein de la Parcelle témoin d'environ 5000 m² pour chaque sous-peuplement, les surfaces couvertes par les 2 groupes de 5 capteurs par sous-peuplement sont estimées à 39 et 77 % pour les hêtres et les douglas respectivement (Annexe 1).

$$VAI = -\frac{1}{k} \ln \tau_c \quad \text{Equation II.1}$$

Avec, k : coefficient d'extinction de la lumière diffuse et τ_c : la transmittance de la canopée.

II.3.2.2. LAI2200

L'analyseur de canopée LAI2200 (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, USA) a été utilisé environ tous les 15 jours en 2010 et 2011. Cet analyseur mesure la fraction de trouées dans la canopée à partir de 5 capteurs de lumière diffuse (lumière bleue ; 320 à 490 nm), de type

hémisphériques, possédant chacun un angle zénithal différent, allant de 7 à 68 ° (Figure II.18). Il est alors important d'effectuer les mesures lors de périodes pour lesquelles la luminosité du ciel ne varie pas avec l'azimut. Ces périodes correspondent à une prédominance du rayonnement diffus sur le direct, soit au lever ou au coucher du soleil, soit durant des journées avec un

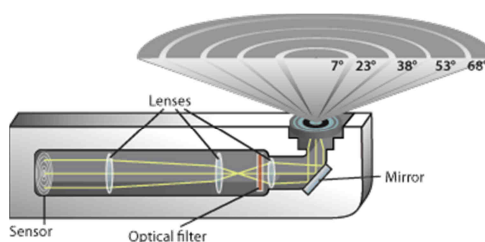


Figure II.18 : Schéma du capteur composant le LAI2200 (issu du site internet LICOR).

ciel couvert. Un cache placé sur le capteur, permettant de réduire le champ de vision de 30 à 350 °, peut être également utilisé afin de réduire les effets de changements azimutaux de rayonnement.

Sur le site, le LAI d'un sous-peuplement est obtenu à partir de la moyenne de 15 points de mesures sous-couvert, répartis sur 3 transects (Figure II.17). La mesure hors-couvert s'effectue en clairière, à moins de 500 m de la Parcelle témoin. La mesure du LAI se basant sur le ratio d'éclairement capté hors et sous-couvert, une mesure en simultané des deux améliore les estimations. Nos relevés ont été effectués dans la mesure du possible avec 2 capteurs, mais la disponibilité des instruments ou d'éventuels problèmes techniques nous ont parfois contraints à n'utiliser qu'un seul LAI2200. Dans ce cas-là, en fonction des conditions climatiques journalières, la mesure hors-couvert est prise à une fréquence plus ou moins importante (la proximité de la clairière nous le permettant) afin de pallier d'importantes variations de rayonnement.

Le traitement des données s'effectue à l'aide du logiciel FV2200 fourni par le fabricant. Les méthodes indirectes n'évaluent pas réellement le LAI puisque les parties ligneuses des arbres (branches, troncs) participent également à l'interception de la lumière. Il est alors préférable de désigner la variable directement estimée à partir de ces mesures comme le VAI. Dès lors, une correction est appliquée lors du traitement numérique des données afin de se rapprocher davantage d'une estimation du LAI. Cette correction est celle proposée par Dufrêne et Bréda (1995) qui consiste à ne prendre en compte que les mesures des 3 premiers anneaux, de 7 à 38 ° (Figure II.18). Par la même méthodologie que pour les capteurs PAR, en considérant un angle zénithal de 38 ° des capteurs et la disposition des points de mesure au sein de la Parcelle témoin, alors les mesures au LAI2200, permettent de couvrir quasiment la totalité du sous-peuplement de hêtres et la totalité de celui de douglas (Annexe 1).

Nous obtenons alors avec cette méthode une mesure moyenne et une caractérisation de la variabilité spatiale du LAI de chaque sous-peuplement, mais une évolution temporelle moins précise que celle évaluée par les capteurs PAR.

II.3.2.3. Bacs à litière

Cette méthode semi-directe (échantillonnage via l'utilisation de récolteur et non directement sur l'arbre) d'évaluation de la surface foliaire peut être considérée en théorie comme la plus précise des trois méthodes appliquées, mais concerne uniquement les peuplements feuillus. Elle permet d'évaluer l'index de surface foliaire maximum de ces derniers (le LAI maximum, LAI_{max}) une fois que la surface de feuilles récoltées est exprimée en fonction de la surface de sol considérée.

Le rapport entre le poids (matière sèche) et la surface d'un échantillon de feuilles récoltées sur le site est tout d'abord établi. Ce rapport est nommé SLA (Specific Leaf Area, $m^2.g^{-1}$). Un échantillon d'environ 100 feuilles fraîches a été récolté chaque année (de 2009 à 2011) lors de la chute des feuilles. En parallèle, des bacs à litières de surface d'interception identique (11 bacs de $0.70 m^2$), ont été disposés sur la Parcelle témoin le long de 3 transects sous les hêtres (Figure II.17). A partir du début de la chute des feuilles le contenu des bacs peut être récolté plus ou moins fréquemment en fonction de la résolution temporelle des résultats souhaitée. Dans notre cas, la récolte des feuilles a été effectuée de 2 à 3 fois par année, mais en s'intéressant uniquement à la somme annuelle des feuilles par bac. Une fois récoltées, les feuilles sont séchées à l'étuve ($65\text{ }^{\circ}C$ durant 2 jours), puis pesées afin d'obtenir un poids de matière sèche. Ce poids est transformé en surface à partir du SLA établi en parallèle. Cette surface de l'échantillon est ramenée à un LAI du peuplement en fonction du rapport entre la surface totale des bacs et la surface de la parcelle expérimentale. Cette méthode nous permet d'obtenir une évaluation du LAI_{max} pour le sous-peuplement de hêtres.

II.4. La transpiration des espèces ligneuses

Les flux de sève ont été mesurés de mai à octobre pour les années 2010 et 2011, selon la méthode de dissipation thermique (Granier, 1985; Section I.4.3). Le protocole d'échantillonnage des mesures de flux transpiratoires, a été établi selon l'inventaire de la Parcelle témoin. Cependant les flux transpiratoires à l'échelle des sous-peuplements

présentés au travers de ce document, ont été calculés à partir de l'inventaire de la Parcelle C100 (Section II.1.1).

II.4.1. Densité de flux de sève

II.4.1.1. Méthodologie

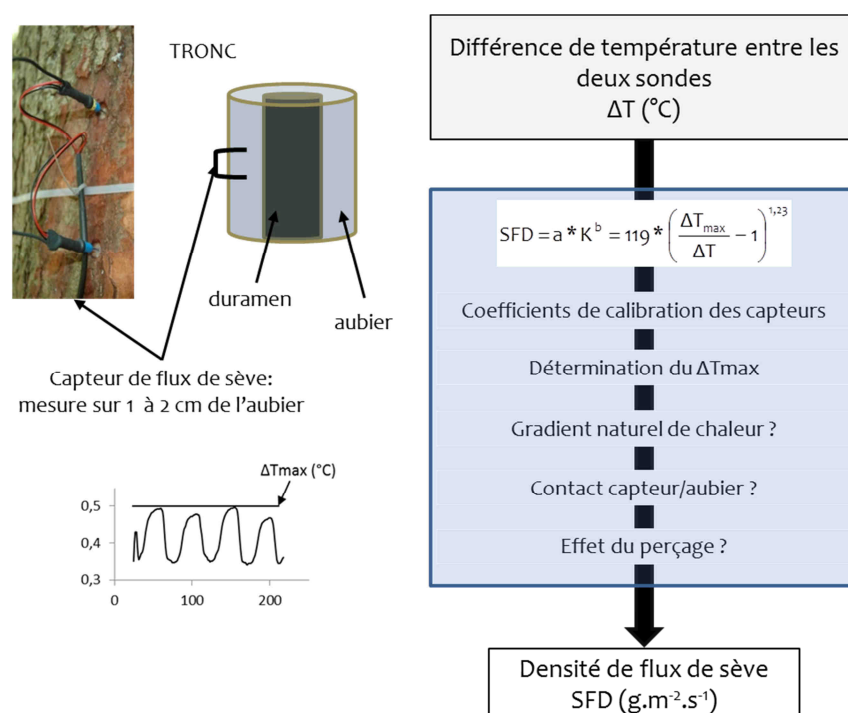


Figure II.19 : Méthodologie de mesure de la densité de flux de sève d'une espèce ligneuse à partir de la méthode de dissipation thermique. La mesure de température (ΔT), à partir d'une formule empirique et de la vérification de plusieurs hypothèses, est transformée en densité de flux de sève.

Les sondes chauffantes des capteurs de flux sève (UP GmbH, Germany; résistance d'environ 35 Ohms ; Figure II.19) sont alimentées par un système de chauffage de fabrication artisanale (UPB, ULg-GxABT) permettant un réglage (pour chaque capteur, quelle que soit la distance « capteur /système de chauffage ») de la puissance fournie à intensité

constante. Pour un fonctionnement optimal, la puissance fournie à la sonde chauffante doit être d'environ 0.2 W.

Le nombre d'arbres équipés par espèce (Tableau II.7) a été déterminé en 2009, à partir du pourcentage d'individus par espèce au sein de la Parcelle témoin, et des classes de circonférences au sein de chaque espèce (Tableau II.8). Nous avons équipé neuf hêtres, six douglas, et trois sapins. Chaque année tous les arbres ont été équipés au mois de mai, soit par de nouvelles sondes, soit par d'anciennes sondes encore fonctionnelles (vérification des résistances). La saisie automatique du signal est assurée toutes les 30 s par deux centrales d'acquisitions (modèle CR800, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT) et deux multiplexeurs (AM16/32B, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT). Les données sont récoltées sous la forme de moyennes bi-horaire.

Espèces	Arbres	C ₁₃₀ (cm)	Surface d'aubier (cm ²)
Hêtre	H2	63	316
	H3	81	522
	H5	97.5	756
	H6	105	877
	H8	115	1052
	H9	123	1204
	H12	129	1324
	H17	147.5	1731
	H22	164	2140
Douglas	D1	181	951
	D2	206	1263
	D3	220	1456
	D6	232	1632
	D11	242	1787
	D17	250.5	1924
Sapin	S2	123.5	777
	S11	164	1370
	S17	222	2510

Tableau II.7: Circonférence à 1m30 (C₁₃₀, cm) et surface d'aubier (cm²), de chaque arbre équipé avec un capteur de flux de sève de type dissipation thermique (UP GmbH, Germany), en fonction de l'espèce. Les arbres sont nommés dans l'ordre croissant de C₁₃₀, H pour les hêtres, D pour les douglas, et S pour les sapins.

Parcelle témoin : 155 arbres.ha ⁻¹					
Hêtre (46 %)		Douglas (29 %)		Sapin (15 %)	
Classes C ₁₃₀	% d'arbres	Classes C ₁₃₀	% d'arbres	Classes C ₁₃₀	% d'arbres
[40;90[	20	[40;160[	4.5	[40;100[	4
[90;110[	25	[160;220[	38	[100;160[	52
[110;130[	27	[220;240[	33	[160;220[	26
[130;180[	28	[240;260[	20	[220;260[	17
		[260;310[	4.5		

Tableau II.8 : Composition, en % d'arbres par classe de circonférence, pour chaque espèce (hêtre, douglas et sapin). Le nombre d'arbres par hectare toutes espèces confondues (arbres.ha⁻¹) et les % de chaque espèce au sein de la Parcelle témoin sont indiqués.

La densité de flux de sève, SFD (g.cm².s⁻¹), est calculée selon l'Equation 1.7 (Section 1.4.3) **en conservant les coefficients établis par Granier (1985)**. Les données brutes ont été traitées en utilisant **une référence dynamique représentant le flux nul ($\Delta T_{\max}$)**, déterminée selon la méthode de Oishi et al. (2008). Le logiciel utilisé est Baseline (v3.0.7; Oishi et al., 2008 ; Oren et al., 1999). Les conditions de flux nuls sont rencontrées si 1) la moyenne du VPD durant au moins 2 h est inférieure à 0.05 kPa et 2) si l'écart-type des 4 plus fortes valeurs de ΔT est inférieur à 0.5 % de la moyenne de ces valeurs. Ces deux conditions permettent à la fois de s'assurer que la demande atmosphérique est négligeable, ainsi que les mouvements d'eau au sein du tronc au-dessus du capteur de flux de sève.

L'effet éventuel d'un **gradient naturel de chaleur**, particulièrement en début de journée, pouvant créer un artefact de mesure, a été testé en 2010 en débranchant pendant plusieurs jours consécutifs le système de chauffage. Le gradient **n'a pas été jugé significatif** (<0.2 °C) et aucune correction n'a donc été apportée à nos données. Toutes les données manquantes par arbre (11 et 3 % en 2010 et 2011 respectivement), ont été complétées à partir de régressions avec le climat et/ou des mesures de flux transpiratoires sur des arbres de la même espèce et de circonférence similaire.

II.4.1.2. Puissance fournie et calibration des capteurs

Lors de la première année de mesure une puissance trop forte a été délivrée aux capteurs. En suivant les instructions fournies par le fabricant des sondes (UP GmbH, Germany), l'intensité fournie aux capteurs était de 0.084 A, au lieu des 0.076 A permettant d'obtenir la puissance de 0.2 W recommandée par Granier (1985). La puissance délivrée était alors de **0,26 W**. Cette méthode est empirique et l'utilisation des coefficients développés par Granier (1985) permettant la transformation de K en SFD (Equation I.7) requiert de travailler dans des conditions parfaitement similaires (en faisant l'hypothèse que les capteurs soient déjà parfaitement identiques à ceux d'origine). En théorie cette surchauffe du capteur peut alors amener à une mauvaise estimation de la transpiration. Sans réponse des fabricants, qui ont été contactés afin de leur signaler le problème et leur demander un facteur de calibration lors d'une surchauffe, une expérience a été réalisée *in situ* en 2011 à cette fin (Figure II.20).

En parallèle, certaines études ont révélé la nécessité de calibrer les capteurs de dissipation thermique avant installation, en particulier lorsqu'ils sont utilisés sur d'autres espèces que celles déjà « validées » (se reporter à la Section I.4.3 pour les références bibliographiques). Ces calibrations peuvent être effectuées en laboratoire à l'aide de banc de calibration (Cabibel et Do, 1991; Steppe et al., 2010). Sans nouvelle calibration, une sous-estimation des mesures est généralement observée. Cependant, les coefficients d'origine ont également été validés par de nombreuses études, par calibration, ou par inter-validation avec d'autres méthodes d'évaluation des flux (Section I.4.3). Il est alors envisageable que les sous-estimations observées ne proviennent pas d'une mauvaise calibration des coefficients vis-à-vis de l'espèce mais davantage vis-à-vis du capteur en lui-même. Comme pour le problème de puissance évoqué précédemment, cette méthode étant purement empirique, une modification dans la fabrication du capteur (conception et/ou matériaux de fabrication) peut probablement amener à des variations de la calibration de l'Equation I.7 (Lu et al., 2004). Nous n'avons pas eu les moyens de calibrer nos capteurs avant leur installation, mais nous avons eu par contre la chance d'obtenir de la part d'André Granier (UMR INRA-UHP) un capteur d'origine, de fabrication artisanale. Nous faisons l'hypothèse que ce

capteur, ayant déjà été validé à plusieurs reprises sur le hêtre et le douglas, est une référence (Référence 1 ; Figure II.20).

Il a alors été décidé de **tester in situ** la fiabilité des capteurs de marque UP à 0.2 et 0.26 W en comparaison à ce capteur de référence. Ces expériences se sont déroulées de juillet à octobre 2011. Pour ce faire, nous avons placé successivement à côté de 15 des 18 capteurs saisonniers (UP_{saison}) installés en 2011, 1) des capteurs de la même marque avec une puissance délivrée de 0.26 W nommés $UP_{0.26\ W}$, et/ou, 2) le capteur d'origine, nommé INRA (Tableau II.9 et Figure II.21).

La méthode consiste, dans un premier temps, à **valider les capteurs UP_{saison} à l'aide du capteur INRA** (Figure II.20 étape 1). Tous les capteurs UP_{saison} n'ont par contre pas pu être comparés au capteur INRA en raison du manque de temps sur la saison de végétation. Seuls 8 d'entre eux ont bénéficiés de cette validation, dont 7 pour lesquels un capteur $UP_{0.26\ W}$ a également été placé sur l'arbre correspondant, simultanément ou en différé du capteur INRA (Tableau II.9, Figure II.21). A partir de ces 7 arbres, **une fois les capteurs UP_{saison} corrigés si nécessaire, le facteur de correction de puissance est alors déterminé en comparaison aux capteurs $UP_{0.26\ W}$** (Figure II.20, étape 2).

Dans un deuxième temps, il s'agit, pour l'année 2011, de **valider les capteurs UP_{saison} n'ayant pas pu être comparés au capteur INRA**. Pour 7 d'entre eux une comparaison au capteur $UP_{0.26\ W}$ a cependant été réalisée (Figure II.20). Ces capteurs $UP_{0.26\ W}$, dont nous considérons la calibration comme correcte, peuvent être considérés comme une référence (Référence 2 ; Figure II.20 étape 3) en corrigeant les résultats par le facteur de correction puissance. Nous parlerons alors de capteur **$UP_{0.26\ W}$ corrigés**. Les 7 capteurs évoqués (UP_{saison} non comparés au capteur INRA) sont alors corrigés à partir de la comparaison aux capteurs $UP_{0.26\ W}$ corrigés (Figure II.20 étape 4).

Finalement, 15 capteurs UP_{saison} sur 18 installés en 2011 sont validés à partir de cette méthode (Figure II.20 étape 5) et l'ensemble des capteurs UP_{saison} de 2010 peuvent être corrigés vis-à-vis du problème de puissance.

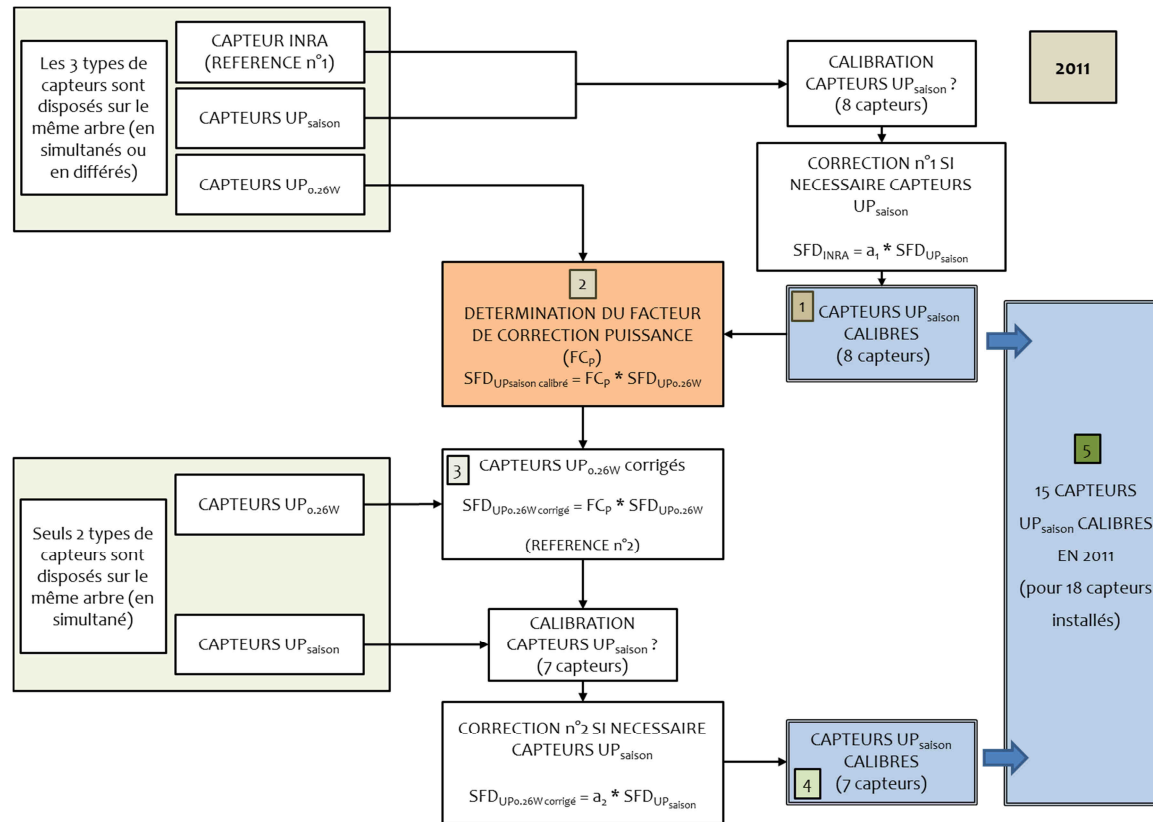


Figure II.20 : Méthodologie de calibration des capteurs UP_{saison} en 2011 en référence au capteur INRA, et détermination du facteur de correction puissance (FC_p) pour des capteurs UP_{saison} recevant 0.26 W au lieu de 0.2 W. Les comparaisons des capteurs sont faites sur la base des densités de flux de sève mesurées (SFD). Les corrections vis-à-vis de la calibration des capteurs UP_{saison} sont apportées par arbre (coefficients a₁ ou a₂). L'ordre des étapes pour la calibration des 15 capteurs UP_{saison} en 2011 est indiqué par des chiffres de 1 à 5.

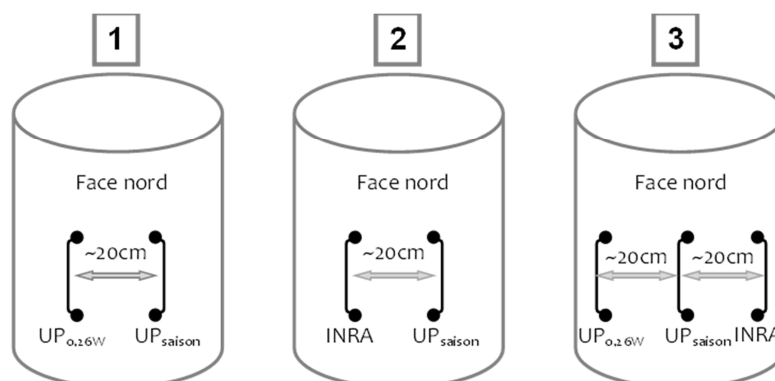


Figure II.21 : Schéma des trois cas de placement des capteurs en fonction des arbres échantillonnés et des types de capteurs utilisés (explications dans le texte). Le sens, à droite ou à gauche, de chaque capteur a pu être inversé lors des expériences en sachant que si un capteur $UP_{0.26W}$ avait déjà été installé d'un côté, le capteur INRA pour les cas n°2 & 3 a été installé de l'autre côté du capteur saisonnier, et inversement.

	Arbres équipés	$UP_{0.26W}$	INRA	$UP_{0.26W}$ & INRA
Hêtres	H5			
	H6			
	H8			
	H9			
	H12			
	H17			
	H22			
Douglas	D1			
	D2			
	D3			
	D6			
	D11			
	D17			
Sapins	S11			
	S17			

Tableau II.9 : Tableau récapitulatif des arbres équipés, en plus du capteur saisonnier (UP_{saison} , 0.2 W) : soit d'un capteur $UP_{0.26W}$ (case grise dans la colonne « $UP_{0.26W}$ »), soit du capteur INRA (case grise dans la colonne « INRA »), soit des deux en différé (case grise dans les colonnes « $UP_{0.26W}$ » et « INRA ») ou en simultané (case grise dans la colonne « $UP_{0.26W}$ & INRA »). Pour les circonférences à 1m30 des arbres équipés se reporter au Tableau II.8.

Les capteurs saisonniers en 2011 ont été collés au tube en aluminium afin d'éviter les mouvements durant la saison et réduire le « bruit » des signaux, alors qu'ils ne l'étaient pas en 2010. Les capteurs $UP_{0.26W}$ au nombre de 3 et le capteur INRA n'étaient pas collés au tube en aluminium, afin i) de pouvoir les déplacer facilement, le collage au tube entraînant souvent une

dégradation du capteur lorsque l'on veut le retirer de l'arbre, puis, ii) de respecter au maximum les conditions d'échantillonnage de 2010, année pour laquelle on cherche à quantifier une éventuelle erreur d'intensité. Tous les capteurs sont placés à la même hauteur et à une distance azimutale d'environ 20 cm à gauche et/ou à droite du capteur saisonnier (Figure II.21).

Pour 13 des 15 arbres équipés par saison (5 hêtres, 6 douglas et 2 sapins ; Tableau II.9 et Figure II.21 cas n°1), un capteur UP_{0.26 W} a été installé durant des périodes allant de 6 à 26 jours. Au sein de ces 13 arbres, 6 ont également été équipés du capteur INRA, durant des périodes allant de 5 à 11 jours. Deux d'entre eux (H8 et D3), ont été équipés en simultané par les 3 types de capteurs durant 4 et 11 jours (Tableau II.9 et Figure II.21 cas n°3), puis les autres (1 hêtre et 3 douglas), en différé. Enfin, 2 hêtres (H5 et H22) ont été uniquement équipés du capteur INRA, durant 7 et 11 jours selon l'individu (Tableau II.9 et Figure II.21 cas n°2).

Ne cherchant pas à quantifier les flux mais à comparer la réponse des différents capteurs selon l'intensité appliquée et la marque utilisée, nous faisons alors l'hypothèse que les résultats ne sont pas affectés par les changements phénologiques, particulièrement pour les hêtres. De même, et cela concerne toutes les espèces, la comparaison des capteurs s'est toujours faite en simultané pour un individu donné. Nous posons donc l'hypothèse que les conditions environnementales, en particulier les conditions climatiques, n'influent pas sur les mesures. En faisant l'hypothèse que les variations azimutales sont mineures (hypothèse non vérifiée), un écart de mesure de densité de flux de sève entre le capteur INRA et un capteur UP, sera alors principalement associé au mode de fabrication des capteurs UP. Tous les capteurs ont été installés de manière identique, avec le même matériel. Un effet du forage lors de l'installation peut être cependant mis en cause également, mais nous n'avons pas les moyens de quantifier cette source d'erreur. Les différentes hypothèses seront discutées à la vue des résultats.

Les comparaisons sont faites à partir des sommes journalières des densités de flux de sève des différents capteurs. Le choix d'un pas de temps journalier a été fait pour une question de clarté. A l'échelle de la demi-heure les comparaisons sont souvent hasardeuses, peut-être de par des légères variations azimutales entre capteurs. De plus, particulièrement en début et

en fin de journée, périodes pour lesquelles les densités de flux de sève mesurées sont faibles, les écarts mesurés peuvent paraître importants sans avoir de réelle influence à l'échelle de la journée.

A partir du facteur de calibration de puissance (FC_P ; Figure II.20), les mesures de SFD réalisées en 2010 ont été corrigées pour le problème de surchauffe (Figure II.22, étape 6). Puis, afin de pallier d'éventuels problèmes de calibration des capteurs, une calibration pour chaque arbre a été réalisée via l'observation des relations entre les moyennes journalières de SFD et de VPD en 2010 et 2011, durant les périodes de LAI_{max} (Figure II.22, étape 7 et Figure II.23). En faisant l'hypothèse que les conditions climatiques, édaphiques et sanitaires des arbres n'ont pas varié significativement entre les deux années et non pas été limitantes, la relation entre le SFD et le VPD à l'échelle de l'arbre est supposée constante. Les relations avec l'ETP, variable faisant intervenir en plus le rayonnement, ont été testées et n'apportent pas de nettes améliorations en comparaison à celles obtenues avec le VPD. En cas de différences des pentes des relations $SFD = a VPD^2 + b VPD + c$ (Fernández et al., 2009; Köstner, 2001) entre 2010 et 2011, en raison d'une mauvaise calibration des capteurs en 2010, la pente de la régression de 2010 est alors corrigée en fonction de celle de 2011 jusqu'aux environs d'un VPD journalier de 5 hPa (Figure II.22, étape 7 et Figure II.23). Cette gamme de VPD journalier permet de prendre en compte la majorité des journées de mesure et ne correspond pas en théorie à des conditions climatiques journalières limitantes. Ce facteur de calibration des pentes est finalement utilisé par arbre comme facteur de correction des SFD mesurées en 2010. Les données de densités de flux de sève sont alors utilisables à l'échelle du pas de temps journalier, en continu, sur l'ensemble de la saison de végétation (DOY 141 à 275 en 2010 et DOY 127 à 281 en 2011).

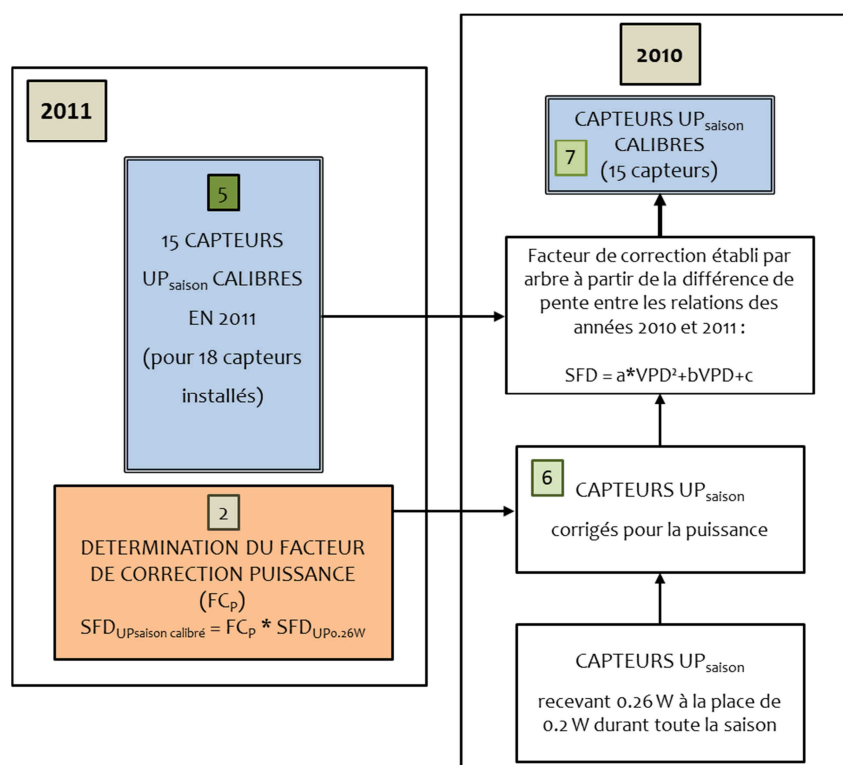


Figure II.22 : Méthodologie de correction des densités de flux de sève (SFD) mesurées en 2010, vis-à-vis du problème de puissance délivrée aux capteurs (étape 6) et de leur calibration spécifique (étape 7). Ce schéma fait suite à la Figure II.20, au travers de laquelle les étapes 2 et 5 en 2011, sont présentées.

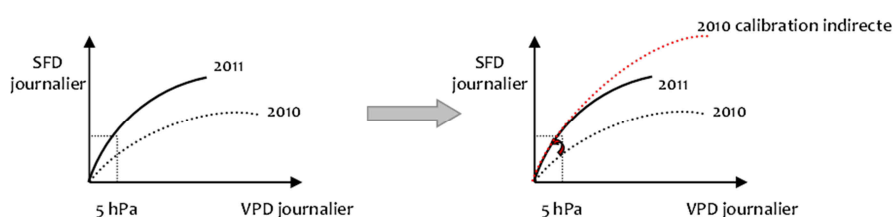


Figure II.23 : Méthode de calibration indirecte par arbre, des mesures de densités de flux de sève (SFD ; $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) de 2010 en fonction de celles de 2011. La pente de la relation $\text{SFD} = a \text{ VPD}^2 + b \text{ VPD} + c$ établie en 2010 (pointillés noirs) est calibrée (pointillés rouges) à partir d'un facteur de correction en fonction de la relation établie en 2011.

II.4.2. La transpiration par arbre

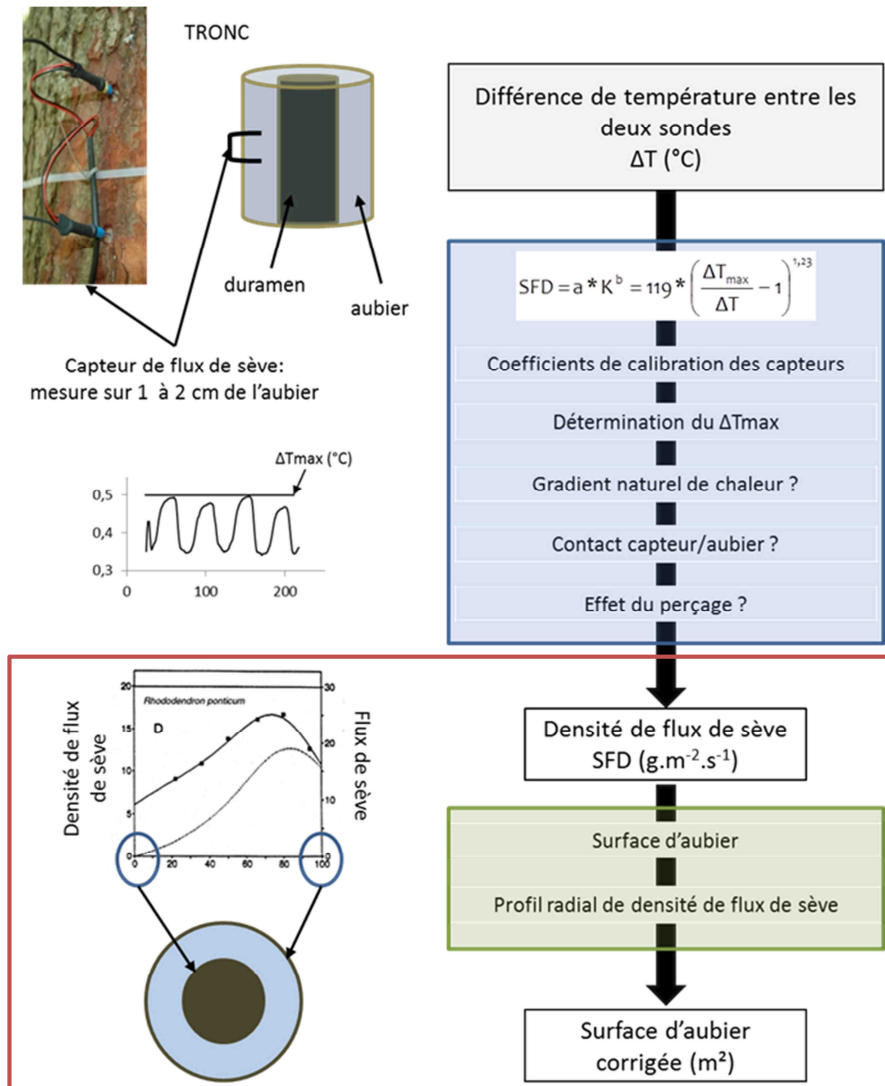


Figure II.24 : Méthodologie de calcul de la transpiration à l'échelle de l'arbre à partir de la densité de flux de sève mesurée sur les 2 premiers cm de l'aubier et d'une surface d'aubier corrigée intégrant la prise en compte du profil radial de flux de sève de l'espèce.

II.4.2.1. Profil radial de densité de flux de sève

Les sondes mesurent une densité de flux de sève moyenne sur une longueur de 2 cm. Pour utiliser ces mesures sur la totalité de la surface conductrice de l'aubier, il est nécessaire de connaître le profil radial de densité de flux de sève de l'espèce. Pour le hêtre, nous utilisons le profil établi par Granier et al. (2000, 2003). Pour le douglas, nous avons organisé une expérience durant l'été 2010, visant à déterminer le profil radial de densité de flux de sève.

A cette fin, des capteurs de flux de sève (UP GmbH, Germany), d'une longueur de 63 mm, avec le thermocouple (longueur de 10 mm) placé à l'extrémité de chaque sonde (à 50 mm), ont été utilisés. D'abord insérés en entier dans l'aubier (Figure II.25, Position 1), les capteurs sont ensuite déplacés horizontalement de 2 cm dans trois positions différentes, tous les 3-4 jours, afin d'obtenir les densités de flux de sève à différentes profondeurs, avec au minimum 2 jours complets de mesures par profondeur (Figure II.25). En fonction de la circonférence de l'arbre échantillonné, la proportion d'aubier prospectée diffère (Tableau II.10). Ces capteurs, nommés capteurs mobiles, ont été placés sur 3 douglas déjà équipés d'un capteur saisonnier de flux de sève dans les deux premiers centimètres d'aubier (capteurs de référence), à environ 1 mètre au-dessus de ce dernier. Le profil radial est établi à partir du rapport R entre la mesure du capteur mobile et du capteur de référence. Afin de tester les variations azimutales, l'expérience est renouvelée face sud de chaque tronc, avec l'installation d'un capteur (capteur sud, identique au capteur de référence), diamétralement opposé à celui de référence. Pour tous les capteurs (de référence, sud et mobile) les sondes sont uniquement en contact avec l'aubier. En 2010, l'intensité appliquée aux capteurs était de 0.084 A, ce qui était trop élevé pour les capteurs de référence (nord ou sud) avec une résistance de 35 Ω , mais les capteurs mobiles possèdent, eux, une résistance d'environ 27 Ω . Cette information n'avait pas été communiquée par les fabricants. Par chance, l'application d'une intensité de 0.084 A, équivaut alors à une puissance d'environ 0.19 W. Les conditions de mesures sont alors considérées comme correctes. Le changement de longueur du thermocouple, 10 au lieu de 20 mm, peut également être considéré comme

un facteur de variation de la calibration d'origine. Nous n'avons cependant pas eu les moyens de tester la calibration des capteurs mobiles. Cela sera discuté à la vue des résultats.

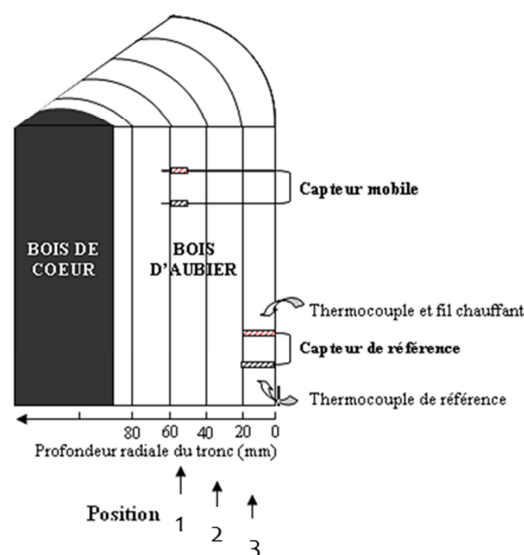


Figure II.25 : Schéma de la disposition du capteur de référence et du capteur mobile sur la section radiale d'un douglas. Le capteur mobile d'abord placé dans la position 1 (distante du cambium de 5,5cm) est ensuite déplacé successivement dans les positions 2 et 3 (distantes du cambium de 3,5cm et 1,5cm respectivement).

Nous avons choisi de calculer R sur un pas de temps journalier. Sur un pas de temps de 30 min, correspondant à la prise de mesure, le rapport entre les deux capteurs est difficilement interprétable pour de faibles valeurs de SFD, en particulier en début et en fin de journée. Sur un pas de temps journalier, R correspond au rapport entre les moyennes journalières de SFD mesurées du capteur mobile et du capteur sud avec celles du capteur de référence.

La valeur journalière moyenne de SFD est associée à la position moyenne du thermocouple et non à toute sa longueur. Cela nous permet une extrapolation du profil en continu entre les positions moyennes de mesure. Au niveau de la position moyenne du capteur de référence, à 10 mm du cambium face nord, la valeur de R est considérée égale à 1. Nous faisons alors l'hypothèse que la valeur de R entre 0 et 10 mm peut être inférieure ou supérieure à 1.

N° arbres	Rayon d'aubier (mm)	Position 3 (15 mm)	Position 2 (35 mm)	Position 1 (55 mm)
D2	68,4	0,22	0,51	0,80
D11	82,7	0,18	0,42	0,66
D17	86,1	0,17	0,41	0,64

Tableau II.10 : Rayon d'aubier de chaque arbre équipé d'un capteur mobile et profondeur relative moyenne du thermocouple du capteur mobile dans l'aubier en fonction de la position de mesure. Les mm indiqués entre parenthèse pour chaque position, indiquent la distance au cambium.

La valeur de R au niveau du cambium est alors déduite, pour chaque arbre et pour chaque face du tronc (nord et sud), à partir de régressions linéaires entre les valeurs de R à 10 mm (capteur de référence) et à 15 mm (capteur mobile). De façon identique, à l'extrémité du rayon d'aubier (limite avec le duramen), pour chaque arbre et chaque face, les valeurs de R sont déduites des régressions linéaires entre les valeurs de R calculées à 35 et 55 mm par les capteurs mobiles. Afin de définir si le profil radial est similaire en fonction de 1) la circonférence de l'arbre, 2) la face nord ou sud et 3) la position relative au sein de la surface d'aubier, des analyses de variance de moyennes sont effectuées. Un profil moyen a été établi, considérant que la gamme de circonférence des arbres échantillonnés est suffisamment restreinte pour ne pas influencer significativement sur le % de surface d'aubier associé à la profondeur relative sur le rayon d'aubier. Ce profil moyen est calculé à partir de la moyenne des valeurs de R par position, pour les 3 arbres. La moyenne des profondeurs relatives pour les 3 arbres, du capteur de référence et du capteur mobile, est respectivement de 0.13, 0.19, 0.45 et 0.70.

II.4.2.2. Calcul de la transpiration par arbre

Pour le calcul de la transpiration à l'échelle de l'arbre, le profil radial de flux de sève peut être pris en compte soit 1) par le biais d'un coefficient de variation du SFD mesuré par le capteur de référence en fonction de la profondeur au sein de la surface d'aubier (Delzon et al., 2004; Fiora et Cescatti, 2006; Köstner et al., 1996), soit 2) en conservant la valeur de SFD mesurée par le capteur de référence, et en la considérant constante le long

d'une surface d'aubier corrigée, SA_C (intégration du profil radial de flux de sève sur la surface d'aubier). Nous avons opté pour la deuxième solution. Elle est utilisée également dans Jonard et al. (2011) pour le hêtre, sur base de la relation établie dans Granier et al. (2003). Suite à l'intégration du profil (SFD en fonction de la profondeur relative dans l'aubier), Jonard et al. (2011) déduisent une surface d'aubier corrigée égale à $(2.11\pi/12) \cdot (C_{1m30})^2$, soit environ 70 % de la surface d'aubier totale. Afin d'obtenir cette relation pour le douglas, l'intégration sur la surface d'aubier du profil de R mesuré, exprimé en fonction de la profondeur relative dans l'aubier, est effectuée. Le résultat permet alors une évaluation de SA_C .

II.4.3. Transpiration du peuplement

La transpiration du peuplement est évaluée à partir de l'inventaire de la parcelle C100 (Figure II.26) afin d'être au maximum représentative de la mesure d'évapotranspiration réelle par eddy covariance (ET). Les densités de flux de sève des espèces et leurs surfaces d'aubier corrigées à l'échelle de la parcelle C100, sont nécessaires à la résolution du calcul de la transpiration du peuplement (T , mm ; Equation I.8 ; Figure II.26 et II.27). La méthode de calcul de T la plus « simple », consiste à prendre en compte le peuplement dans son ensemble (T_{P1} , mm ; Figure II.26 et II.27 et Tableau II.11). La comparaison avec ET peut être affinée en utilisant un modèle de footprint (Neftel et al., 2008), fournissant la contribution à la mesure d'ET, de zones ou sous-peuplements, prédéfinis autour de la tour (Figure II.26). Trois types de sous-peuplements sont caractérisés (Figure II.27 et Tableau II.12). Le sous-peuplement de hêtres (T_H , mm), de douglas (T_D , mm) et de conifères mixtes (T_{CM} , mm). La transpiration du peuplement (T_{P2} , mm ; Figure II.26 et II.27) est obtenue en sommant les transpirations de chaque sous-peuplement, pondérées par leurs contributions au flux mesuré par eddy covariance. Les sous-peuplements de hêtres et de douglas sont considérés comme monospécifiques. La comparaison du fonctionnement hydrique des deux espèces à l'échelle du peuplement sera basée sur le calcul de T_H et T_D .

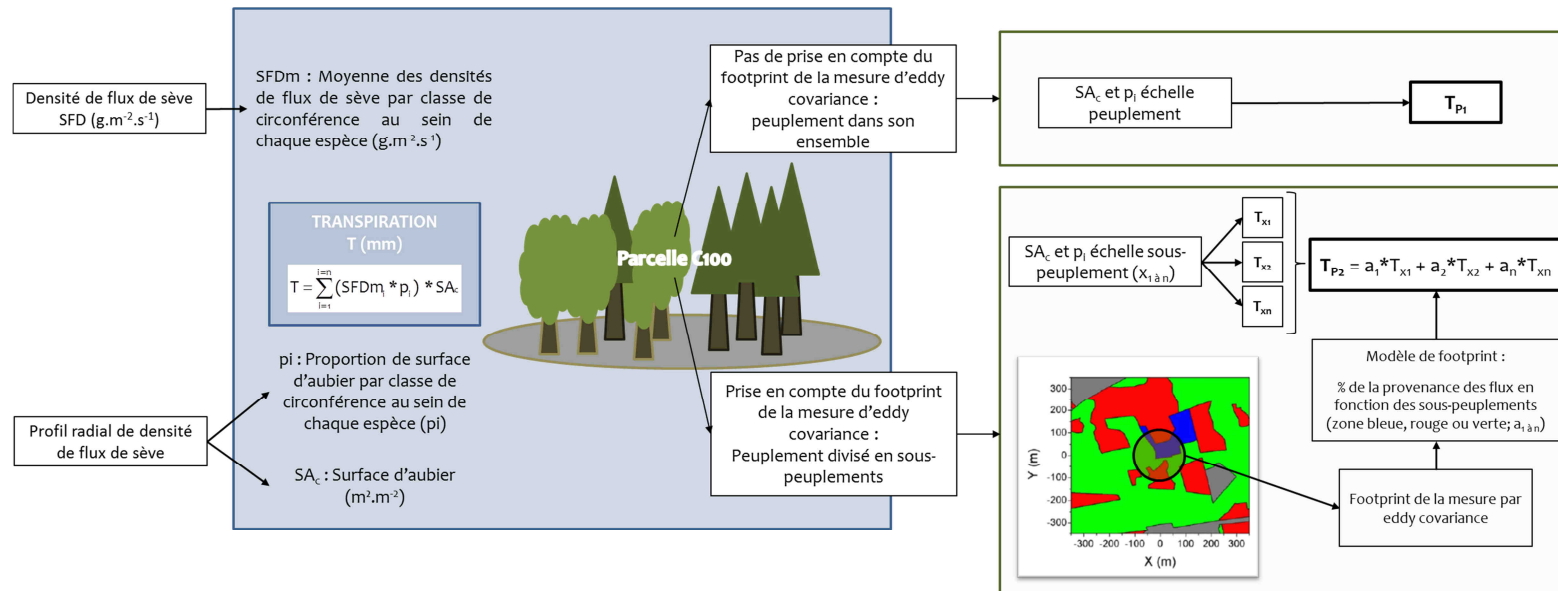


Figure II.26 : Méthodologie de calcul de la transpiration du peuplement basée sur la mesure des densités de flux de sève par la méthode de dissipation thermique. La transpiration du peuplement peut être calculée avec ou sans prise en compte du footprint (empreinte) de la mesure par eddy covariance de l'évapotranspiration réelle (ET, mm). La carte représentant la localisation des différents types de sous-peuplements intervenant dans la mesure par eddy covariance sur le site de Vielsalm est issue de Laffineur et al. (2011).

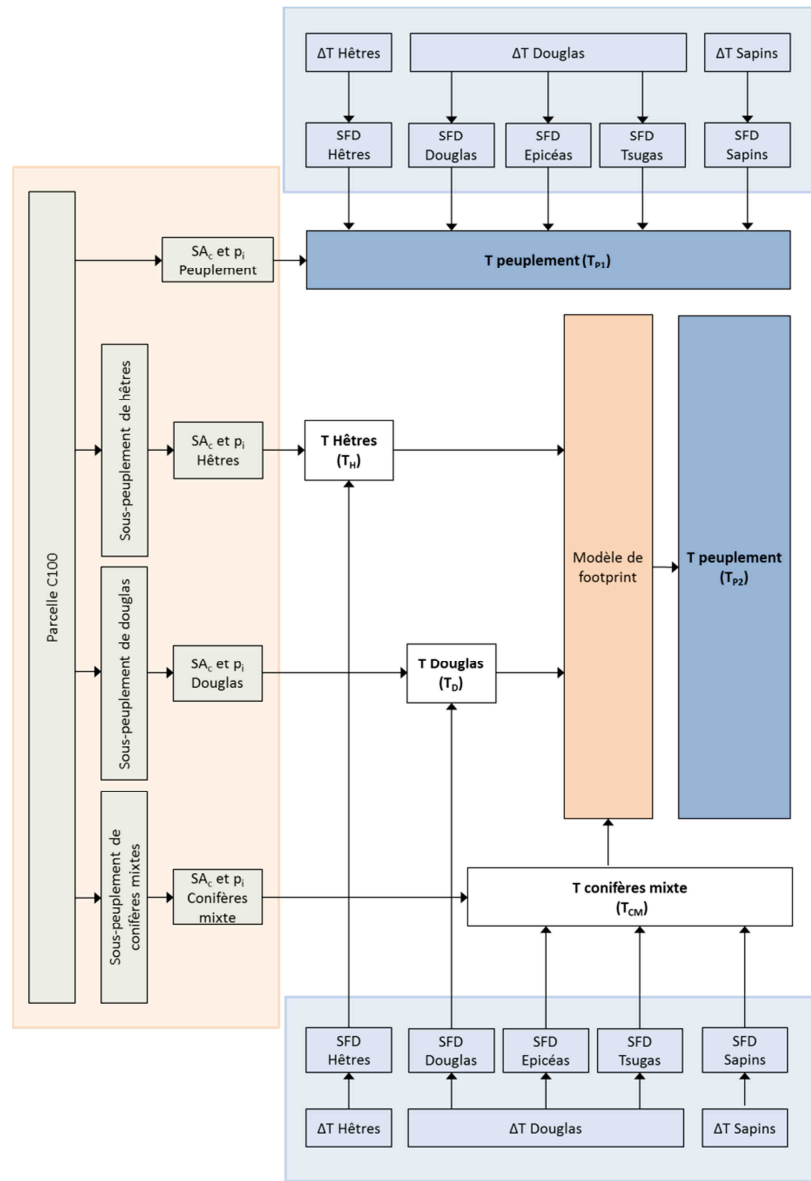


Figure II.27 : Méthodologie de calcul de la transpiration des peuplements (T_{P1} ou T_{P2}) ou des sous-peuplements (T_H , T_D et T_{CM}) au sein de la Parcelle C100 sur le site de Vielsalm, à partir de l'évaluation des densités de flux de sève (SFD) des espèces et de leur surface d'aubier corrigées (SA_c et p_i ; Figure II.26). Les densités de flux de sève sont mesurées sur 3 espèces (ΔT) à partir de la méthode de dissipation thermique. Pour l'utilisation du modèle de footprint (T_{P2}), 3 types de sous peuplements sont caractérisés (hêtres, douglas et conifères mixtes). Les entrées ΔT et SFD des espèces, situées en haut et en bas de la figure sont identiques.

Parcelle C100, peuplement mixte : 240 arbres.ha ⁻¹								
Hêtre, Chêne, Bouleau (32 %)			Douglas, Epicéa, Tsuga, Pin (50 %)			Sapin (18 %)		
Classes C ₁₃₀	%	Capteurs	Classes C ₁₃₀	%	Capteurs	Classes C ₁₃₀	%	Capteurs
[40;90[	16	H2 ; H3	[40;160[	67	D1 ; D2	[40;100[	16	S2
[90;110[	17	H5 ; H6	[160;220[	17	D1 ; D2	[100;160[	41	S2
[110;130[	29	H8 ; H9	[220;240[	8	D3 ; D6	[160;220[	31	S11
[130;210[	38	H12 ; H17	[240;260[	4	D11 ; D17	[220;280[	12	S17
			[260;330[	3	D11 ; D17			

Tableau II.11 : Pourcentages d'arbres (%) par classes de circonférence (Classes C₁₃₀), pour chaque groupe d'espèce, au sein de la Parcelle C100. Les groupes d'espèces sont constitués sur base des espèces échantillonnées pour la mesure des densités de flux de sève, soit hêtres, douglas ou sapins. Les espèces non échantillonnées ont été attribuées en fonction de leur type fonctionnel (feuillu ou résineux) au hêtre ou au douglas. Le nombre d'arbres par hectare toutes espèces confondues (arbres.ha⁻¹) et les % de chaque groupe d'espèce au sein de la Parcelle C100 sont indiqués (xx %). Les capteurs sont répartis au sein des classes en fonction de la circonférence des arbres équipés.

Le peuplement conifères mixte est en majorité composé de sapins et d'épicéas, accompagnés de tsugas et de pins (Figure II.3). Hormis pour les sapins, aucune mesure de flux de sève n'est disponible pour les autres espèces. Les densités de flux de sève mesurées sur les douglas de circonférences similaires, sont donc utilisées afin d'évaluer la transpiration de ces dernières (Figure II.27 et Tableau II.12 ; Vincke et al., 2005). Les épicéas constituent une proportion conséquente du peuplement de la Parcelle C100 (23 % de la surface terrière) et l'utilisation des SFD des douglas peut être une source d'erreur dans l'estimation du peuplement mixte (feuillus et conifères) et/ou du peuplement conifère mixte (pour l'utilisation du modèle de footprint).

Parcelle C100											
Hêtre (30 %) 175 arbres.ha ⁻¹			Douglas (10 %) 145 arbres.ha ⁻¹			Conifères mixte (56 %) 300 arbres.ha ⁻¹					
						33 % Sapin			67 % Epicéa & Tsuga		
Classes C ₁₃₀	% arbres	Capteurs	Classes C ₁₃₀	% arbres	Capteurs	Classes C ₁₃₀	% arbres	Capteurs	Classes C ₁₃₀	% arbres	Capteurs
[40;90[	17	H2 ; H3	[40;160[	8	D1 ; D2	[40;100[	16	S2	[40;100[	39	D1 ; D2
[90;110[	17	H5 ; H6	[160;220[	30	D1 ; D2	[100;160[	41	S2	[100;160[	45	D1 ; D2
[110;130[	28	H8 ; H9	[220;240[	32	D3 ; D6	[160;220[	31	S11	[160;220[	11	D1 ; D2 ; D3
[130;210[	38	H12 ; H17	[240;260[	18	D11 ; D17	[220;280[	12	S17	[220;280[	4	D6 ; D11 ; D17
			[260;330[	12	D11 ; D17				[280;310[	1	D4 ; D11 ; D17

Tableau II.12 : Composition en % d'arbres par classes de circonférence, et nombre d'arbres à l'hectare, des sous-peuplements « purs » de hêtres et de douglas, et du sous-peuplement de conifères mixte, composé de sapins (33 % des effectifs, 43 % de la SA_c du sous-peuplement), d'épicéas et de tsugas. Les arbres équipés d'un capteur sont répartis en fonction des classes de circonférences. Les résultats sont établis sur la base de l'inventaire de la Parcelle C100 (Figure II.3).

II.5. L'interception et les écoulements le long des troncs

La pluviométrie incidente (Section II.1.3) est la principale entrée d'eau dans l'écosystème. Elle ne parvient cependant pas en totalité au sol. Le feuillage et les branches en interceptent une partie, directement ré-évaporée. On vise donc à quantifier ici l'eau arrivant au sol par pluviolessivage et par écoulement le long des troncs (Section I.1), ainsi que, par différence avec la pluviométrie incidente, les quantités d'eau interceptées par les sous-peuplements de hêtres et de douglas.

II.5.1. Pluviolessivats

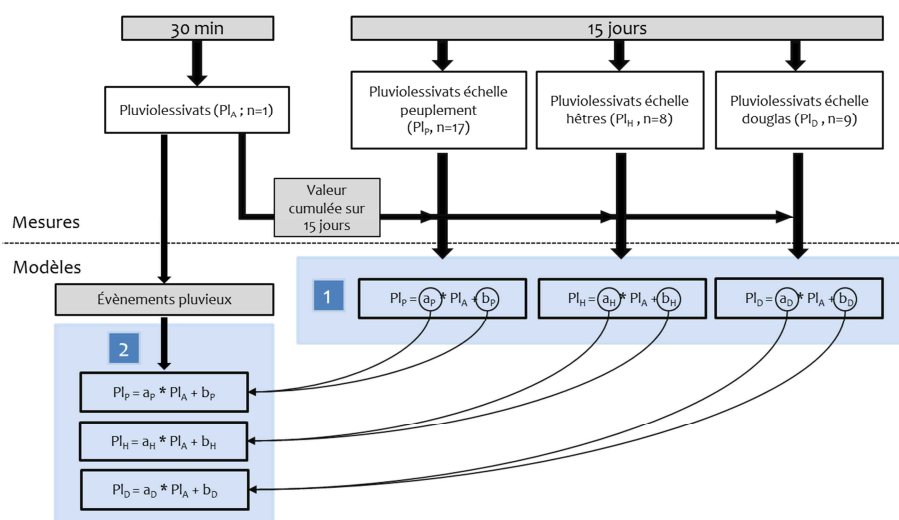


Figure II.28 : Méthodologie de calcul des pluviolessivats moyens à l'échelle du peuplement (PI_P) ou des sous-peuplements (PI_H et PI_D) sur le pas de temps de l'évènement pluvieux. Les pluviolessivats récoltés à chaque évènement pluvieux par le pluviomètre relié à la centrale d'acquisition (PI_A) sont calibrés en fonction du peuplement ou des sous-peuplements (étape 2), à partir de coefficients établis sur un pas de temps bimensuel (étape 1 ; coefficients a_P , a_H , a_D et b_P , b_H , b_D des régressions linéaires de PI_P , PI_H et PI_D en fonction de PI_A).

La mesure des pluviollessivats (PI , mm) est assurée par 18 pluviomètres placés systématiquement dans les deux sous-peuplements, le long de 3 transects (Figure II.17). Deux types de pluviomètres sont utilisés : i) des pluviomètres manuels avec relevé de la pluviométrie sous-couvert environ tous les 15 jours (Figure II.28) et ii) un pluviomètre à auget basculant, relié à une centrale d'acquisition, permettant la mesure de PI toutes les 30 min depuis juin 2010 (PI_A ; Figure II.28). Les pluviomètres manuels sont soit équipés d'un bidon d'une contenance de 10 litres (mis en place mi 2009, fabrication artisanale), soit d'un auget basculant relié à un compteur (mis en place en décembre 2009). Le pluviomètre relié à la centrale d'acquisition permet la détermination de PI à l'échelle de l'évènement pluvieux. Deux évènements pluvieux sont séparés d'au moins 12 heures (ce qui permet d'éviter les phénomènes de saturation au niveau des feuilles réduisant alors l'interception à zéro). Pour l'ensemble des pluviomètres, les entonnoirs servant de réceptacle ont un rayon de 14 cm (surface réceptrice de 196 cm²). Les données manquantes concernent principalement les saisons hivernales durant lesquelles le gel de l'eau dans les bidons ou du mécanisme des augets basculants a obligé à éliminer des mesures. Les retombées sous forme de neige n'ont également pas pu être mesurées, la neige s'accumulant la plupart du temps au-dessus des entonnoirs. Les données manquantes durant la saison de végétation concernent essentiellement les pluviomètres à augets basculant (dysfonctionnement du basculement et/ou du compteur).

La pluviométrie moyenne sous-couvert, du peuplement (PI_P) ou des sous-peuplements (PI_H et PI_D), est calculée environ tous les 15 jours à partir de l'ensemble des pluviomètres (mis à part le pluviomètre relié à la centrale d'acquisition; Figure II.28). Des régressions (données de mi-juillet à mi-novembre 2010 et de février à octobre 2011) sont alors établies sur un pas de temps bimensuel en fonction de l'échelle spatiale considérée (peuplement ou sous-peuplement), à partir de PI_P , PI_H ou PI_D exprimés en fonction de PI_A (Granier et al., 2000). Ces régressions sont alors utilisées ensuite pour calibrer PI_A sur le pas de temps de l'évènement pluvieux, en fonction de l'échelle spatiale considérée (Granier et al., 2000).

II.5.2. Ecoulements le long des troncs

Les écoulements le long des troncs (P_t , mm) n'ont pas été mesurés. Une valeur de 5 % de la pluviométrie incidente journalière a été sélectionnée pour l'ensemble des espèces, en fonction des valeurs issues de la littérature (Aussenac, 1968; Aussenac et Boulangeat, 1980; Granier et al., 2000; Staelens et al., 2008).

II.5.3. L'interception

La mesure de l'interception des pluies est calculée à partir de la différence entre la pluie incidente et la pluie arrivant au sol, soit les pluiolessivats et les écoulements le long des troncs.

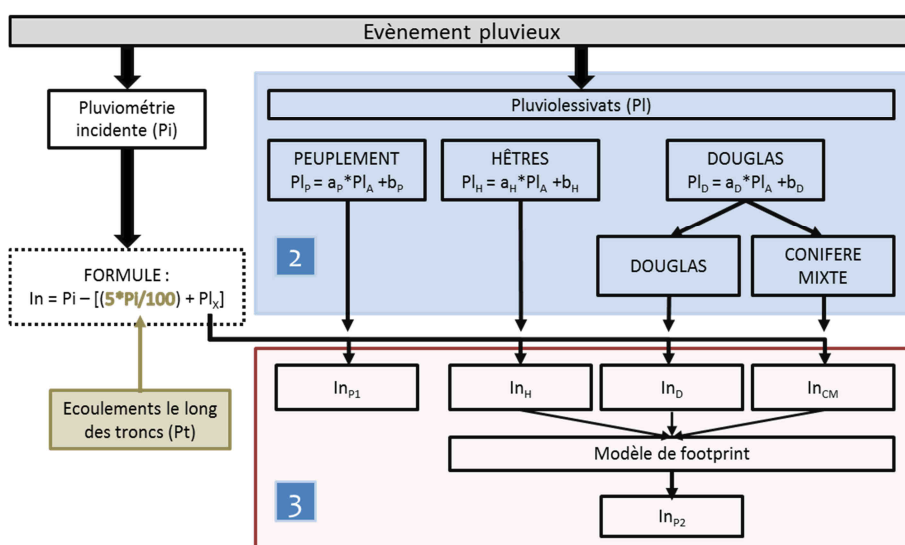


Figure II.29 : Méthodologie de calcul des interceptions moyennes des sous-peuplements (In_H pour les hêtres, In_D pour les douglas et In_{CM} pour les conifères mixtes) et du peuplement, sans (In_{p1}), ou avec l'utilisation du modèle de footprint (In_{p2}), sur le pas de temps de l'évènement pluvieux (étape 3). L'étape 2 est décrite Figure II.28. Les pluiolessivats des douglas sont assimilés à ceux des conifères mixtes.

La mesure de l'interception se fait sur le pas de temps de l'évènement pluvieux (Figure II.28 et II.29), les pourcentages de pluviométrie

incidente interceptée étant dépendant de l'intensité et de la durée de la pluie. Les écoulements le long des troncs étant considérés égaux à 5 % de la pluviométrie incidente, pour un événement pluvieux donné, à partir d'une pluviométrie sous-couvert mesurée représentant 95 % de la pluviométrie incidente, le flux d'interception est alors considéré comme nul ($I_n = P_i - P_l - P_t$).

A partir du calcul des pluvioloessivats à l'échelle de l'évènement pluvieux (Figure II.28 et II.29, étape 2), l'interception est calculée à l'échelle du peuplement (I_{n_P} , mm) et des sous-peuplements (I_{n_H} et I_{n_D} pour les hêtres et les douglas respectivement). Pour tenter d'améliorer l'inter-validation des différentes mesures de l'évapotranspiration réelle, le modèle de footprint (Neftel et al., 2008 ; Section II.1.2) peut être pris en compte pour le calcul de l'interception à l'échelle du peuplement ($I_{n_{P_2}}$). Pour rappel, le modèle fournit les % de flux provenant de chaque source : hêtres, douglas et conifères mixtes, sur un pas de temps de 30 min. L'interception du sous-peuplement de conifères mixtes ($I_{n_{CM}}$; sapins, épicéas et tsugas) est assimilée à celle mesurée pour le sous-peuplement de douglas (Figure II.29). $I_{n_{P_2}}$ est alors déterminée comme la somme d' I_{n_H} , I_{n_D} et $I_{n_{CM}}$, chacune pondérée par les résultats du modèle de footprint.

Une interception moyenne par sous-peuplement, utilisable à l'échelle journalière, est également modélisée par BILJOU©.

II.6. L'eau dans le sol : la réserve en eau utile

Cette section présente la méthodologie appliquée pour l'évaluation de la variabilité spatiale des réserves utiles du sol (RU) et de la variabilité spatio-temporelle de la réserve en eau disponible (R_t), en fonction des sous-peuplements de hêtres et de douglas.

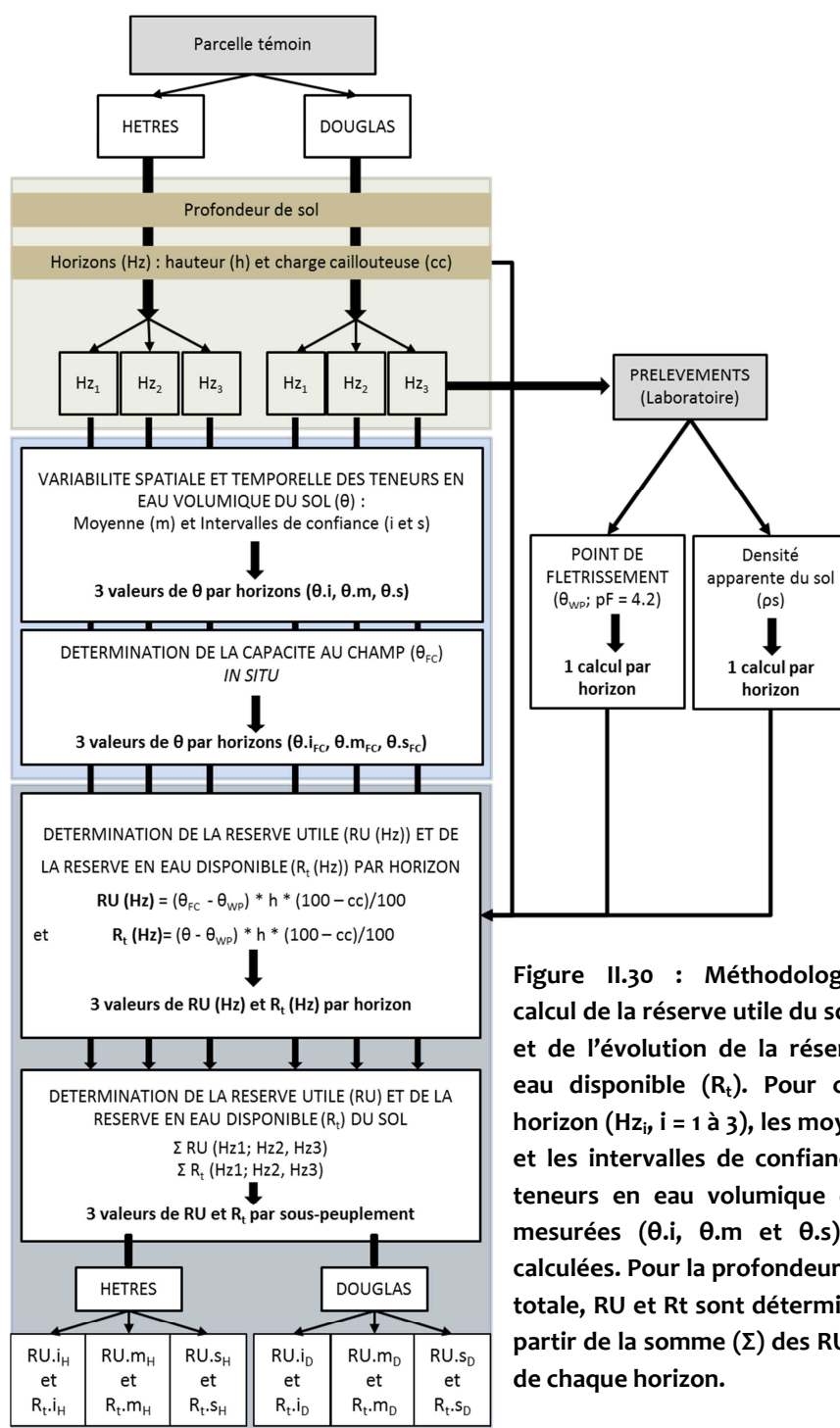


Figure II.30 : Méthodologie de calcul de la réserve utile du sol (RU) et de l'évolution de la réserve en eau disponible (R_t). Pour chaque horizon (Hz_i, i = 1 à 3), les moyennes et les intervalles de confiance des teneurs en eau volumique du sol mesurées ($\theta.i$, $\theta.m$ et $\theta.s$), sont calculées. Pour la profondeur de sol totale, RU et R_t sont déterminées à partir de la somme (Σ) des RU ou R_t de chaque horizon.

II.6.1. Profondeur de sol

La profondeur de sol (Figure II.30), jusque-là évaluée entre 1 et 1.5 m (Laitat et al., 1999; Longdoz et al., 2000) et sa variabilité spatiale, ainsi que la présence éventuelle d'une nappe perchée, ont été testées au cours d'une campagne de terrain à l'aide de la technique GPR (Ground Penetrating Radar).

Les mesures sont réalisées au moyen d'un système radar temporel (GSSI-SIR20) équipé de deux antennes, une émettrice et une réceptrice, d'une fréquence centrale de 400 MHz. Les ondes émises dans le sol par le radar vont être partiellement réfléchies en rencontrant des variations des propriétés électromagnétiques du milieu (essentiellement des variations de la permittivité diélectrique) causées par exemple par les changements d'horizons de sol, la présence de pierres, de racines ou encore d'une nappe d'eau. Le traitement des données permet l'acquisition d'images présentant l'intensité de l'onde réfléchi dans le sol (l'intensité d'une réflexion sera d'autant plus grande que la variation de permittivité correspondante sera grande) et le temps de propagation de l'onde (intervalle de temps entre l'émission et la réception de l'onde). Le temps de propagation dépend 1) de la profondeur de l'interface amenant à une réflexion et 2) de la vitesse de propagation de l'onde déterminée par la permittivité du milieu et donc les propriétés physiques du sol (dont la teneur en eau). En déterminant une valeur de permittivité du milieu, le temps de propagation de l'onde peut alors être traduit en termes de profondeur (Lambot et Vanclooster, 2010).

Lors de la journée de mesure (2011 DOY 234) 8 transects ont été réalisés dans la Parcelle témoin, dont 7 en largeur (3 par sous-peuplements et 1 à l'intersection ; transects de 26 à 60 m) et 1 en longueur (75 m). Afin de vérifier la profondeur estimée par les images radar, des sondages dans le sol à l'aide d'une tarière ont été effectués sur plusieurs transects (Tableau II.13).

	Hêtres			Trans.	Douglas			Long.
Numéro de transect	1	2	3	4	5	6	7	8
Longueur	46.8	46	43.6	36.7	60.5	33.7	26	75.5
Nombre de sondages à la tarière	1	2	1	0	1	0	1	0
Profondeur maximale atteinte par sondage à la tarière (cm)	90	68 (1) 100 (2)	107		98		70	

Tableau II.13 : Longueurs des transects mesurés lors de la campagne de mesure GPR (2011 DOY 234), en fonction du sous-peuplement (Hêtres ou Douglas), à la transition des deux (Trans.), et dans la longueur de la Parcelle témoin (Long.). Le nombre et la profondeur des sondages à la tarière par transects sont précisés.

II.6.2. Profondeur et densité racinaire

Afin de déterminer la profondeur maximale de colonisation des racines et leur répartition au sein du profil, des grilles d'environ 1 m² de superficie ou plus, divisées en carrés de 10 ou 15 cm de côté selon la grille, sont utilisées. La grille est placée à la verticale contre la paroi d'une fosse pédologique. Chaque point d'impact de racines perpendiculaires à la paroi est compté au sein de chaque carré et la somme des points d'impact de racines de même classe de diamètre est réalisée. Cela permet de distinguer les racines fines (diamètre < 3 mm) des plus grosses. Deux fosses pédologiques ont été creusées sous les hêtres (Fosse Rac.H1 et Rac.H2 ; Figure II.17). Deux profils ont été mesurés par fosses (face opposées), soit 4 répétitions. Une fosse sous les douglas a été creusée également (Fosse Rac.D1) dans laquelle 2 répétitions ont été effectuées, puis une autre fosse, déjà creusée pour des prélèvements de sol (Fosse pF.D, Section II.6.4 ; Figure II.17), a été utilisée pour la mesure d'un 3ème profil (soit 3 répétitions pour les douglas). On obtient des densités racinaires moyennes en fonction de la profondeur et par classe de diamètre pour chaque sous-peuplement. Les arbres les plus proches des fosses sont situés entre 1 et 2.5 m en fonction des fosses (Figure II.31).

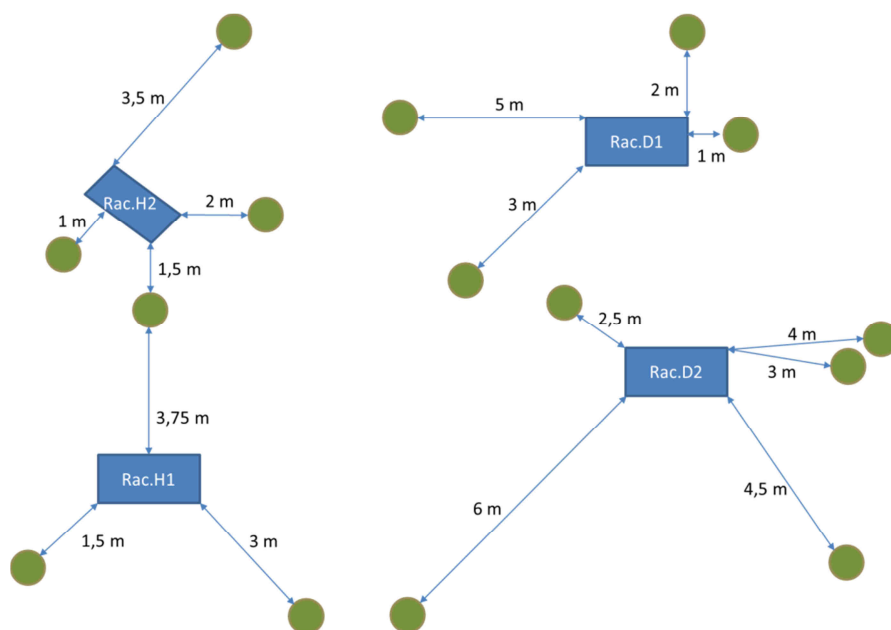


Figure II.31 : Distances entre les fosses de détermination des profils racinaires des hêtres (Rac. H1 et H2) et des douglas (Rac. D1 et D2) et les arbres (hêtres ou douglas, ronds verts) les plus proches. Seule la distance entre les fosses Rac.H1 et H2 est à l'échelle (1 cm = 1m). La taille des fosses n'est pas à l'échelle.

II.6.3. Les horizons du sol

Les horizons du sol (Figure II.30) au sein de la Parcelle témoin ont été déterminés lors d'études précédentes (relevé de terrain 1985 par Delecour). Sept horizons de sol ont été identifiés (Figure II.32 ; Annexe 2).

Le profil a été scindé en 3 horizons pour les calculs de RU et de R_t , afin de faire correspondre une mesure de teneur en eau volumique du sol pour chacun d'eux (Figure II.32) : 1) de 0 à 20 cm, 2) de 20 à 60 cm et 3) de 60 à 130 cm. Ces hauteurs d'horizons sont également retenues pour les fichiers paramètres de BILJOU®.

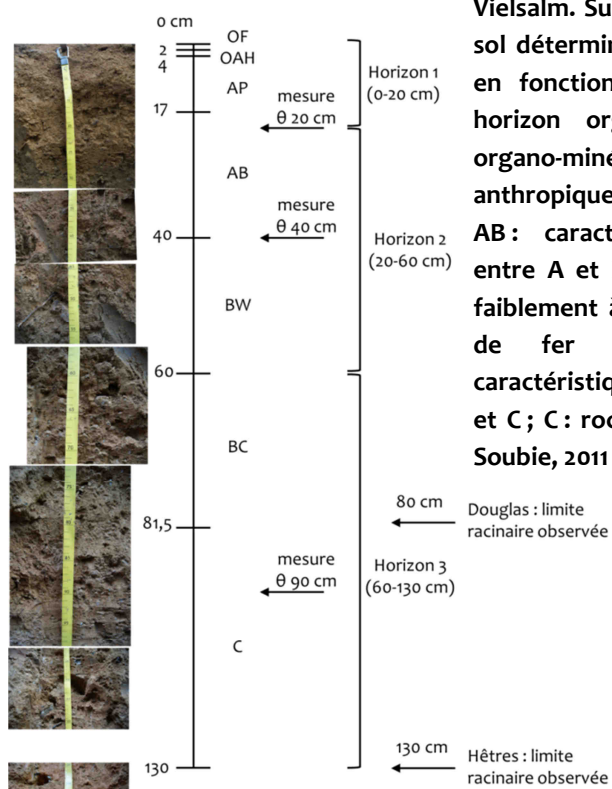


Figure II.32 : Photos du profil de sol au sein d'une fosse (Rac.H1) creusée sous le sous-peuplement de hêtre à Vielsalm. Sur la droite, les horizons de sol déterminés en 1985, sont indiqués en fonction de la profondeur (OF : horizon organique ; OAH : horizon organo-minéral ; AP : couche de nature anthropique, Perennial field cropping ; AB : caractéristiques intermédiaires entre A et B ; BW : fortement altéré, faiblement à fortement acide, oxydes de fer liés à l'argile ; BC : caractéristiques intermédiaires entre B et C ; C : roche mère). (Photos : Rémy Soubie, 2011 DOY 286)

II.6.4. Les pF caractéristiques

La détermination des courbes de teneurs en eau volumique du sol en fonction de la succion exercée avait été réalisée en 1996, par une équipe de l'UPB. Mis à part les résultats, aucune information n'est disponible, notamment sur le lieu de prélèvement. En 2010, une équipe allemande (Dr. H. Schack-Kirchner, Nutrition Universität Freiburg) en collaboration avec l'UPB, a également effectué cette expérience. Cependant les échantillons de sol ont été prélevés à un seul endroit, ne nous permettant pas de distinguer d'éventuelles différences entre les sous-peuplements de hêtres et de douglas (Figure II.30). Cela a justifié la mise en place d'une nouvelle expérience en 2011.

L'obtention des courbes de teneur en eau du sol en fonction de la succion exercée se fait en laboratoire après le prélèvement sur le terrain d'échantillons de sol non perturbés. Ces échantillons ont été prélevés à l'horizontale (2011 DOY 286), au nombre de 4 par horizon, dans un cylindre métallique (cylindre de kopecki de 100 cm³). Les horizons OF et OAH ont été rassemblés dans un seul kopecki. Les prélèvements ont été effectués à la hauteur moyenne de chaque horizon, soit 6 prélèvements : O (2 cm), AP (10,5 cm), AB (28,5 cm), BW (50 cm), BC (71 cm) et C (93 cm). Deux fosses ont été creusées à cet effet, une sous les hêtres (fosse pF.H ; Figure II.17) et l'autre sous les douglas (fosse pF.D ; Figure II.17), soit 48 échantillons traités. Ces fosses ont été creusées le plus proche possible de celles creusées en 2009 pour y installer les réflectomètres et les sondes de température (fosse SWC.H pour le sous-peuplement de hêtres et SWC.D pour les douglas ; Figure II.17), afin de faciliter la comparaison des méthodes d'évaluation de la capacité au champ (Section I.6.2 et II.6.5).

Une fois les échantillons saturés en eau au laboratoire (pF = 0), l'expérience consiste à établir une série d'équilibre entre l'eau contenue dans l'échantillon de sol et une masse d'eau à des potentiels connus (Richards, 1941). Une plaque poreuse ou une membrane saturée est utilisée comme interface entre l'échantillon et la masse d'eau. Pour chaque potentiel imposé, une fois l'équilibre établi, on mesure la teneur en eau de l'échantillon grâce à l'Equation II.2.

$$\theta(h) = \frac{M_h - M_s}{V_s * \rho_w} * 100 = \frac{(M_h - M_s) * \rho_s}{M_s * \rho_w} * 100 \quad \text{Equation II.2}$$

Avec : $\theta(h)$, teneur en eau volumique (%) à la succion h (m) ; M_h et M_s , masses humide et sèche (kg) ; V_s , volume de l'échantillon de sol (m³) ; ρ_w , masse volumique de l'eau (kg.m⁻³) ; ρ_s , masse volumique apparente du sol (kg.m⁻³). Pour les faibles succions (pF ≤ 1.5), le matériau utilisé comme barrière poreuse correspond à du sable. La succion est appliquée en faisant varier la hauteur d'une masse d'eau libre reliée au bac à sable (plaque à succion ; Hénin, 1977). Pour des pF plus élevés, une cellule de pression (ou presse à membrane) est utilisée, dans laquelle les échantillons sont placés sur une plaque poreuse, elle-même installée au-dessus d'une masse d'eau

maintenue à la pression atmosphérique. À partir de ces différentes méthodes les teneurs en eau du sol ont été déterminées pour les pF égaux à 0, 1, 1.5, 2, 2.47, 3, et 4.05. Après traitement chaque horizon par fosse est alors caractérisé par une courbe de teneur en eau en fonction de la succion exercée, établie à partir de la moyenne de 3 à 4 échantillons de sol.

La masse volumique apparente du sol, ou densité apparente, ρ_s , est déterminée après l'obtention des teneurs en eau volumique des échantillons à $pF = 3$ (Figure II.30). Jusque-là les échantillons de sol (1 kopecki par échantillon) n'ont pas été remaniés. Ils sont alors placés à l'étuve pendant 48 h, à 105 °C, puis pesés pour en déterminer le poids sec. Connaissant le volume des kopeckis, et en prenant en compte la masse caillouteuse de chaque échantillon, la densité apparente de ces derniers est calculée. Nous faisons l'hypothèse que la masse caillouteuse (grès) est non poreuse et ne contient pas des quantités d'eau significatives. Au-dessus de $pF = 3$, seuls les pores texturaux contiennent encore de l'eau. Une fois la densité apparente déterminée, les échantillons sont déstructurés, de nouveau mis à saturation en eau, puis placés dans la cellule à pression afin d'appliquer des pF supérieurs à 3.

Afin de pouvoir obtenir la valeur de teneur en eau pour n'importe quelle valeur de succion, en particulier celle au point de flétrissement ($pF=4.2$; Figure II.30) que nous n'avons pas pu atteindre avec notre matériel, le modèle de Van Genuchten (1980) est appliqué à nos résultats au moyen d'un script utilisé dans le programme Matlab® (Delmelle, 2012; Lambot et al., 2002). Ce dernier détermine la valeur des paramètres de l'équation par optimisation, afin de faire correspondre au mieux la courbe avec les teneurs en eau obtenues en laboratoire.

II.6.5. Les teneurs en eau volumique du sol

Jusqu'en 2009 le site était équipé de Theta probes (Delta T ML1, Cambridge, UK), à 3 profondeurs (20, 44 et 90 cm), sous les hêtres, afin d'évaluer les teneurs en eau volumique du sol. De 1998 à 2008 les données absentes sont de l'ordre de 20 %, surtout en 2001, 2004 et 2006 (respectivement 84, 36 et 43 % de données absentes). Avec le temps, les sondes se sont détériorées. Toutes les profondeurs ne sont pas caractérisées

selon les années, et la calibration des sondes au fil du temps n'est pas assurée. L'utilisation des données est alors risquée, et leur représentativité spatiale jusque-là était limitée.

En 2009, le dispositif a été fort amélioré pour assurer le suivi des variations temporelles et spatiales des mesures de teneur en eau volumique du sol (θ , $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$; Figure II.17), avec :

- i) un suivi en continu (30 min) de la teneur en eau volumique du sol à trois profondeurs (20, 40 et 90 cm), avec des sondes réflectomètres, du type capacitive (Modèle CS615, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT), sous les hêtres (fosse SWC.H), les douglas (fosse SWC.D) et à la transition des deux (fosse SWC.T);
- ii) la caractérisation de la variabilité spatiale de la teneur en eau du sol : 30 tubes de 40 cm de profondeur ont été disposés verticalement dans le sol de façon systématique. En y insérant une sonde également de type capacitive (système PR2, Delta T, Cambridge UK), l'humidité volumique est mesurée tous les 10 cm de profondeur, environ tous les 15 jours. Trois tubes de 1 m ont également été installés en mars 2010, chacun à côté des fosses contenant les réflectomètres (SWC.H, SWC.D et SWC.T), afin de pouvoir faire une comparaison des deux types de mesures. Initialement des tubes de 1 m de profondeur devaient être installés à la place de ceux de 40 cm, mais étant donné la charge caillouteuse à partir de 50 ou 60 cm de profondeur, leur installation fut limitée à celle près des fosses SWC.

Le but de la méthode est de pouvoir associer, par sous-peuplement, et par horizon, les variabilités temporelle et spatiale mesurées, afin de pouvoir obtenir **une gamme de teneur en eau du sol journalière** (Figures II.30, II.33 et II.34). Cette méthode est similaire à celle employée pour la mesure des pluviolessivats (Section II.5.1).

Par profondeur de mesure, les mesures des réflectomètres (SWC.H, SWC.D et SWC.T) sont utilisées pour calculer tous les jours, une moyenne journalière de teneur en eau volumique du sol (θ .cs615; Figures II.33 et II.34,

étape 1) pour les hêtres ($\theta.cs615_H$) et les douglas ($\theta.cs615_D$). La valeur journalière de $\theta.cs615$ correspondant aux mesures bimensuelles est identifiée et utilisée :

- i) avec les mesures du système PR2 ($\theta.pr2$) afin, tous les 15 jours, de calculer la moyenne ($\theta_{15.m}$) et les intervalles de confiance (seuil à 95 %) inférieur ($\theta_{15.i}$) et supérieur ($\theta_{15.s}$) de la teneur en eau du sol volumique (Figure II.34, étape 2).
- ii) avec $\theta_{15.m}$, $\theta_{15.i}$ et $\theta_{15.s}$, afin de déterminer les paramètres des régressions linéaires θ_{15} en fonction de $\theta.cs615$ (a_x ; Figure II.34, étape 3).

L'ensemble des termes employés sont identifiés par l'indice H pour les hêtres (exemple $\theta.pr2_H$ ou $\theta_{15.m_H}$) et l'indice D pour les douglas (exemple $\theta.pr2_D$ ou $\theta_{15.m_D}$).

Dans la 4^{ème} étape (Figure II.34), les données journalières de teneur en eau du sol mesurées par les réflectomètres ($\theta.cs615$), sont calibrées de façon à être représentatives des moyennes ou des intervalles de confiance calculés tous les 15 jours. Pour cela, les paramètres retenus dans l'étape 3 sont utilisés pour conférer à $\theta.cs615$ une représentativité spatiale, tels que $\theta = a_1 * \theta.Hcs615 + a_2$. Une gamme journalière de θ est donc obtenue, caractérisée par une **moyenne ($\theta.m$)**, un **intervalle inférieur ($\theta.i$)** et un **intervalle supérieur ($\theta.s$)**. Cette gamme est calculée pour le sous-peuplement de hêtres ($\theta.m_H$, $\theta.i_H$ et $\theta.s_H$) et de douglas ($\theta.m_D$, $\theta.i_D$ et $\theta.s_D$).

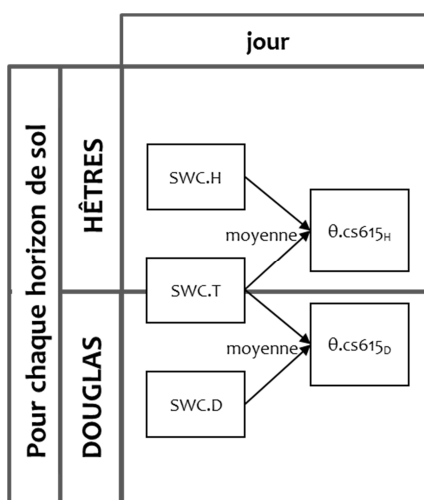


Figure II.33 : Méthodologie de calcul des teneurs en eau du sol volumique journalières pour chaque horizon de sol, pour les sous-peuplements de hêtres ($\theta.cs615_H$) et de douglas ($\theta.cs615_D$), à partir des mesures des réflectomètres sous les hêtres (SWC.H), les douglas (SWC.D) et à la transition des 2 sous-peuplements (SWC.T).

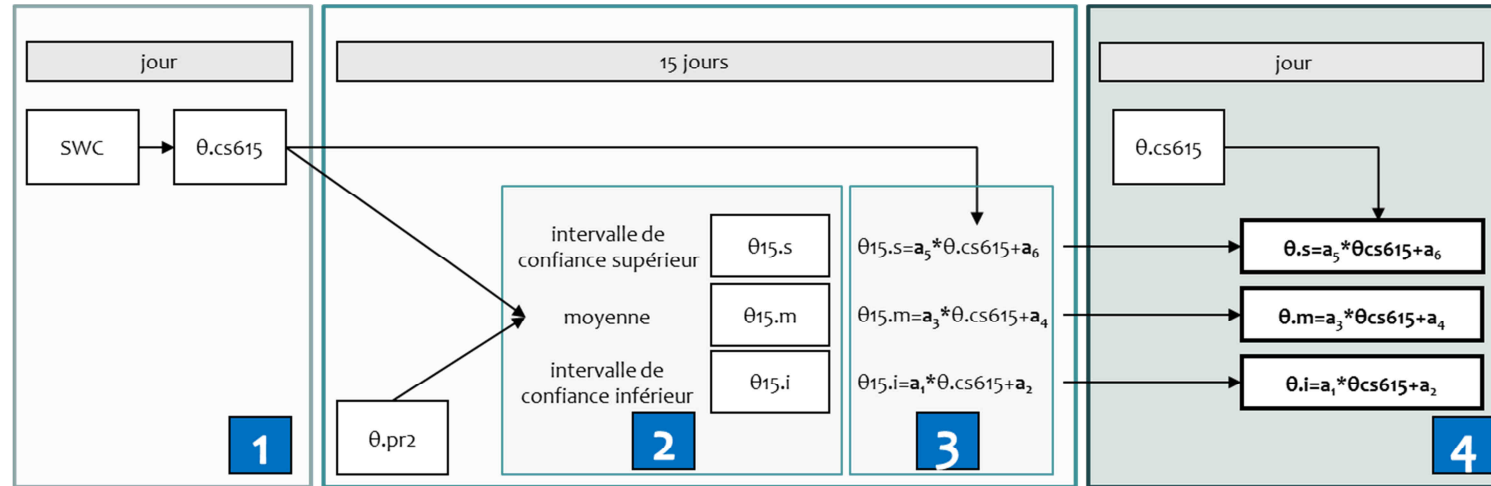


Figure II.34 : Méthodologie de calcul des teneurs en eau volumique journalières représentatives des conditions moyennes ($\theta.m$), inférieures ($\theta.i$) et supérieures ($\theta.m$) mesurées sur le site. L'ensemble des mesures journalières ($\theta.cs615$) et bimensuelles ($\theta.pr2$) sont utilisées afin d'obtenir tous les 15 jours une moyenne ($\theta_{15.m}$) et les intervalles de confiance inférieur ($\theta_{15.i}$) et supérieur ($\theta_{15.s}$) de θ , pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas (étape 2). Des régressions sont alors établies (étape 3), afin de calibrer ensuite les données sur le pas de temps journalier (étape 4). Pour le détail des étapes et des acronymes se référer au texte.

Il existe deux biais dans les calculs. Premièrement, cette méthodologie requiert normalement que les régressions au pas de temps bimensuel (Figure II.34, étape 3) soient établies à partir de données indépendantes. Or dans notre cas, les valeurs bimensuelles $\theta_{15.m}$, $\theta_{15.s}$ et $\theta_{15.i}$, ne sont pas indépendantes des mesures des réflectomètres θ_{cs615} (Figure II.34, étape 2). En effet, afin de calculer $\theta_{15.m}$, $\theta_{15.s}$ et $\theta_{15.i}$, les mesures θ_{cs615} sont utilisées en plus de celles du système PR2. Ce choix a été fait en raison du manque de mesure à 90 cm. Etant donné que par sous-peuplement un seul tube de 1 m est installé, la mesure des réflectomètres CS615 a été associée à la mesure du système PR2.

Deuxièmement, toujours en raison du manque de mesure à 90 cm, ne possédant alors que 2 points de mesure par sous-peuplement, nous avons choisi d'utiliser la fosse SWC.T à la fois pour les hêtres et pour les douglas, afin de pouvoir calculer les intervalles de confiance (Figure II.33). Les résultats des 2 sous-peuplements ne sont alors plus totalement indépendants. La représentativité spatiale reste faible à 90 cm (4 points de mesure bimensuels) en comparaison aux 2 autres profondeurs de mesure (environ 15 points de mesure bimensuels), mais est tout de même augmentée par cette méthode. Etant donné que ce choix a été fait pour les mesures à 90 cm, nous avons conservé cette méthodologie à 20 et 40 cm. Si le système de mesure mis en place le permet, il est bien évidemment préconisé de conserver l'indépendance des données dans cette méthodologie.

Mis à part lors de problèmes électriques, la majorité des données manquantes sont dues à la réponse du signal des sondes dans le sol. Lorsque le sol est saturé en eau, ou lors de fortes précipitations journalières (≥ 15 mm environ), la stabilité du signal peut être perturbée, sur quelques heures à quelques jours, rendant alors les résultats inexploitable.

Capacité au champ (Figure II.30)

La capacité au champ (θ_{FC}) est évaluée *in situ* à partir des données de teneur en eau volumique obtenues pour chaque sous-peuplement et chaque horizon ($\theta.m$, $\theta.s$ et $\theta.i$, H ou D, pour les profondeurs de mesures 20, 40 et 90 cm).

Durant les saisons hivernales, lorsque l'évapotranspiration est faible et que les cumuls pluviométriques ont permis la recharge du sol, les teneurs en eau du sol oscillent entre chaque événement pluvieux autour de la saturation, de la capacité au champ et de niveaux légèrement plus faibles en fonction de l'évaporation du sol. La capacité au champ correspond à la teneur en eau maximale de l'horizon de sol après élimination de l'eau par drainage rapide (ou eau gravitaire). La période du DOY 349 en 2010 au DOY 46 en 2011, a été sélectionnée pour la détermination des capacités au champ.

Suite aux événements pluvieux cumulant au minimum 5 mm, après avoir atteint un maximum, on observe généralement durant 2 à 3 jours une chute rapide des teneurs en eau du sol mesurées. Les teneurs en eau du sol relevées 3 jours après ces événements pluvieux sont moyennées afin de déterminer les capacités au champ *in situ* de chaque horizon. Comme pour la gamme de teneur en eau volumique du sol, nous obtenons alors une gamme de capacité au champ (valeurs moyenne, $\theta.m_{FC}$ et limites supérieure, $\theta.s_{FC}$ et inférieure, $\theta.i_{FC}$; les acronymes sont suivis de H ou D en indice afin de distinguer les sous-peuplements de hêtres et de douglas respectivement).

Ces valeurs seront mises en relation (Chapitre III ; Figure III.15 et Tableau III.6) avec la capacité au champ déterminée à partir des courbes de teneur en eau du sol en fonction de la succion exercée (Section II.3.2.4).

II.6.6. Evaluation de RU, R_t et REW

Pour le calcul de la réserve utile du sol (RU ; Equation I.9) et de l'évolution de la réserve en eau disponible pour les plantes (R_t ; Equation I.10), les variables communes fixées par horizon, par sous-peuplement, et quel que soit le calcul, moyen, inférieur ou supérieur, sont les suivantes (Figure II.30) :

- une valeur d'humidité volumique au point de flétrissement, θ_{WP} , à partir des courbes de teneurs en eau établies en laboratoire pour un $pF = 4.2$;
- une épaisseur d'horizon ;
- une charge caillouteuse.

Pour le calcul de la RU, les valeurs de capacités au champ sélectionnées sont celles mesurées *in situ* (Bréda et al., 2002), représentant à l'échelle des sous-peuplements, en fonction des horizons du sol, les valeurs inférieures ($\theta.i_{FC}$), moyennes ($\theta.m_{FC}$) et supérieures ($\theta.s_{FC}$) mesurées. Les différents calculs de RU sont identifiés comme suit : RU.i_H pour hêtres inférieur, RU.m_H pour hêtres moyen et RU.s_H pour hêtres supérieur, et idem pour les douglas (RU.i_D, RU.m_D et RU.s_D).

Pour R_t (Figure II.30), la moyenne et les limites de la gamme de teneurs en eau du sol journalières sont utilisées par sous-peuplement et horizon, afin de réaliser 3 calculs : un inférieur, un moyen et un supérieur. Comme pour RU, les calculs de R_t sont identifiés comme suit :

- $R_t.i_H$, $R_t.m_H$ et $R_t.s_H$, pour les hêtres, calcul inférieur, moyen et supérieur respectivement ;
- $R_t.i_D$, $R_t.m_D$ et $R_t.s_D$, pour les douglas, calcul inférieur, moyen et supérieur respectivement.

Le calcul de la REW, correspondant pour rappel, à un instant donné, au ratio entre R_t et RU, est alors effectué, pour chaque sous-peuplement, en fonction des 3 calculs de R_t et de RU. De manière identique à ces 2 dernières variables, les différents calculs de REW sont identifiés comme suit :

- REW.i_H, REW.m_H et REW.s_H pour les hêtres ;
- REW.i_D, REW.m_D et REW.s_D pour les douglas.

II.7. Méthodes d'évaluation de l'ETR

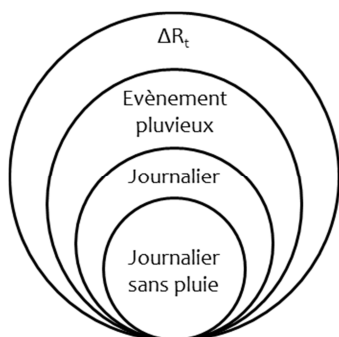


Figure II.35 : Représentation des différents pas de temps, auxquels peuvent plus ou moins se réduire nos mesures, le pas de temps « journalier » comprenant le pas de temps « journalier sans pluie » et ainsi de suite.

Il est nécessaire, afin de faciliter la compréhension, d'apporter quelques informations concernant les pas de temps définis dans cette section. Une estimation des variables sur **un pas de temps journalier** est généralement pratiquée, offrant une analyse des processus assez fine et étant au niveau international un pas de temps standard. Cependant, certains phénomènes de transfert d'eau au sein du *continuum* sol-végétation-atmosphère, ne peuvent pas toujours être réduits à une échelle journalière, en particulier ceux directement dépendants **de la durée et de l'intensité des pluies incidentes** tels que les flux d'interception ou le drainage. De plus, la continuité des données est dépendante du bon fonctionnement des instruments de mesure. Trois méthodes indépendantes d'évaluation de l'ETR sont utilisées :

- 1) la méthode du bilan hydrique du sol ($ETR = P_i - D_r - \Delta R_t$; Equation 1),
- 2) la méthode analytique ($ETR = T + I_n$),
- 3) l'eddy covariance ($ETR = ET$).

Le pas de temps adéquat pour l'analyse des données diffère selon la méthode abordée. L'harmonisation des différentes mesures de l'ETR, dans le but de conserver un échantillonnage le plus grand possible, a été une des principales difficultés dans cette étape.

Sur le pas de temps journalier, l'ensemble des méthodes peuvent être comparées en séparant les journées avec ou sans pluie. Lors de journées sans pluie (Figure II.35), l'ETR est considérée égale à T (hypothèse ET_u négligeable), ou $-\Delta R_t$ concernant la méthode du bilan hydrique du sol. Cependant, afin de s'assurer que les flux de drainage ou d'interception soient nuls, l'analyse de l'ETR a également été faite à partir des 3^{èmes} jours consécutifs sans pluie (Wilson et al., 2001), réduisant par contre le nombre de données par analyse.

En prenant en compte l'ensemble des jours de mesure, la mesure par eddy covariance est la moins restrictive, les données étant analysées à l'échelle journalière (Figure II.35). La méthode analytique impose d'analyser les données sur le pas de temps de l'évènement pluvieux (Figure II.35), dont sont dépendants les flux d'interception. Pour la méthode du bilan hydrique du sol, les transferts d'eau dans le sol sont difficilement réductibles à

l'échelle de la journée. De plus, les sondes réflectomètres se sont avérées peu fiables lors d'évènements pluvieux, amenant à la suppression de données. Les variations de ΔR_t (Figure II.35) sont alors évaluées entre 1 et plusieurs jours, comprenant automatiquement 1 à plusieurs évènements pluvieux définis pour la méthode analytique.

II.7.1. L'eddy covariance

Le système d'eddy covariance mesure depuis 1996, sur le pas de temps de 30 min, les flux de vapeur d'eau (que l'on peut convertir en flux de chaleur latente, LE, en $W.m^{-2}$), correspondants à l'évapotranspiration réelle (ET, mm). Dans un premier temps, les mesures d'ET en 2010 et 2011 sont comparées, en vue d'une inter-validation, avec les méthodes analytique et de bilan hydrique du sol. Puis, l'analyse et l'évaluation d'ET est étendue à la période 1998-2011, en comparaison aux résultats simulés par BILJOU®.

Les données fournies par la GHG database sont complètes (remplacement des données manquantes par leur soin) sur le pas de temps de 30 min de 1998 à 2008. De 2009 à 2011, les données d'évapotranspiration réelle ont été acquises au fur et à mesure de l'étude. Les données manquantes à l'échelle journalière (52, 27 et 24 %) ont été remplacées ponctuellement, des mois de mars à octobre, par une relation avec le VPD (régression linéaire simple ou transformation logarithmique si la relation est améliorée), établie sur 10 à 20 jours selon la date. Pour les séries manquantes trop longues, comme en 2009 par exemple suite au changement de la tour, les données n'ont pas été remplacées. Les séries journalières sont alors complètes d'août à octobre 2009 et de mars à octobre 2010 et 2011.

Pour la comparaison des méthodes d'évaluation de l'ETR, l'eddy covariance disponible sur le pas de temps semi-horaire peut facilement être cumulée sur des périodes plus ou moins longues. Pour les jours sans pluie (et donc les 3^{ème} jours consécutifs sans pluie également), l'ET est considérée égale à la transpiration des espèces ligneuses. La distinction de la provenance des flux, sur le pas de temps de 30 min, a été réalisée en 2010 et 2011 à partir du modèle de Neftel et al. (2008 ; Section II.1.2), fournissant alors les pourcentages de contribution des espèces (ou groupe d'espèces)

Chapitre II

au sein de la mesure d'ET, à l'échelle du peuplement. Par contre la reconstitution des flux semi-horaires, à l'échelle de l'espèce (ou groupe d'espèces), comme cela a été le cas pour le carbone (Aubinet et al., 2005), n'a pas été encore réalisée.

Dans notre étude, l'analyse de la variabilité interannuelle de l'ET se concentre de 1998 à 2011, des mois de mars à octobre. Étant donné la dépendance des flux mesurés à la direction du vent et à l'anisotropie des conditions climatiques (Section II.1.2), ces derniers sont analysés en fonction de secteurs de vents et de classes de VPD. Trois secteurs ont été définis selon les principales directions de vent et la position des espèces (Figure II.5). De 330° à 90° , secteur nommé NE, les conifères sont largement majoritaires. De 90° à 210° , secteur nommé SE, le peuplement est mixte. De 210° à 330° , secteur nommée SW, le peuplement est dominé par les feuillus. Sur un pas de temps de 30 min, de 1998 à 2011, ces 3 secteurs représentent respectivement 23, 28 et 49 % de l'ensemble des données disponibles (9 % de données absentes). A l'échelle journalière, un secteur est attribué à un jour s'il représente plus de 50 % des données récoltées sur la journée (pas de temps 30 min). Une journée avec des données manquantes de direction de vent (pas de temps 30 min) n'est pas prise en compte. A l'échelle journalière, de 1998 à 2011, les 3 secteurs, NE, SE et SW, représentent alors respectivement 18, 22 et 46 % des jours (14 % de jours sans attribution). Dans le but de s'affranchir au maximum des conditions climatiques pour la comparaison interannuelle de l'ET, l'ET journalière moyenne est analysée par classe de VPD moyen journalier. Les classes sont les suivantes : Classe 1 : ≤ 1 hPa ; Classe 2 : $]1 ; 3]$ hPa ; Classe 3 : $]3 ; 5]$ hPa ; Classe 4 : $]5 ; 7]$ hPa ; Classe 5 : >7 hPa.

La validité des flux de chaleur latente (LE), mesurés par eddy covariance, peut être remise en question au travers de l'analyse du bilan d'énergie (Equation II.3 ; Aubinet et al., 2001) intégrant LE. L'énergie disponible (A), définie par le rayonnement net (R_n) moins les termes de stockage de chaleur dans l'air et la biomasse (S) et dans le sol (G), est considérée égale à la somme des flux de chaleur latente (LE) et de chaleur sensible (H). Une fermeture incomplète du bilan est généralement observée (Aubinet et al., 2001; Goldstein et al., 2000; Goulden et al., 1996).

$$H + LE = A = R_n - S - G \quad \text{Equation II.3}$$

La non fermeture du bilan peut être expliquée par les calibrations des mesures radiatives ou de stockage, la pente des sites de mesure et particulièrement par la différence de footprint entre les mesures d'eddy covariance et les mesures radiatives (Aubinet et al., 2001). Cependant, un mauvais bilan peut également indiquer un problème dans l'évaluation de H ou de LE. A Vielsalm, Aubinet et al. (2001) constatent pour les hêtres et les douglas, dans les conditions de mesures optimales pour le bilan, que les mesures par eddy covariance sous-estiment les mesures radiatives d'environ 20 %, malgré des régressions présentant un bon R^2 (> 0.9). Ce déficit est comparable à celui observé sur la plupart des sites forestier (Aubinet et al., 2001).

Les flux d'évapotranspiration mesurés par eddy covariance, comme les autres termes du bilan, nécessitent donc des validations complémentaires.

II.7.2. La méthode analytique

L'ETR est évaluée par cette méthode en mesurant séparément ses principales composantes, soit les flux transpiratoires (T), et les flux d'interception (In). Nous négligeons dans cette étude l'évapotranspiration du sol et du sous-bois (ET_u). En effet, sous les hêtres, le sous-bois est pratiquement inexistant et l'évaporation du sol durant la saison de végétation est supposée faible étant donné le recouvrement par la strate ligneuse dominante. Sous les douglas, le sous-bois est davantage développé, réduisant alors les flux d'évaporation du sol. La contribution de ce sous-bois à la transpiration en comparaison à la strate dominante a été supposée négligeable, mais pourra être cependant discutée. Pour information, le modèle BILJOU© fourni tout de même une évaluation de l'évapotranspiration du sous-étage, confirmant sa faible participation à l'ETR sur le site de Vielsalm. Les données d'ETR analytique sont disponibles DOY 172 à 275 en 2010 et DOY 127 à 281 en 2011.

Comme le calcul des flux d'interception est dépendant de la durée des évènements pluvieux, les mesures de la transpiration journalière sont adaptées à ce pas de temps pour le calcul de l'ETR. La transpiration journalière est sommée en fonction du nombre de jours compris par évènement. Pour une analyse saisonnière, les flux d'interception et de transpiration sont sommés sur l'ensemble des périodes de mesures.

Pour l'analyse de l'ETR analytique entre sous-peuplements et la comparaison de la méthode du bilan hydrique du sol, T_H et In_H , ainsi que T_D et In_D sont utilisées (Sections II.4.3 et II.5.3). On nomme ETR_H , l'ETR pour les hêtres et ETR_D pour les douglas (Figure II.36).

Pour la comparaison de l'ETR analytique avec les mesures d'eddy covariance, les calculs sans (ETR_{P1}) ou avec (ETR_{P2}) l'utilisation du modèle de footprint sont testés. ETR_{P1} est calculée à partir de la somme de T_{P1} et In_{P1} (Section II.4.3 et II.5.3 ; Figure II.36) et ETR_{P2} à partir de la somme de T_{P2} et In_{P2} (Section II.4.3 et II.5.3 ; Figure II.36).

Transpiration		Interception		Evapotranspiration réelle
T Hêtres (T_H)	+	In Hêtres (In_H)	=	ETR_H
T Douglas (T_D)	+	In Douglas (In_D)	=	ETR_D
T peuplement (T_{P1})	+	In Peuplement (In_{P1})	=	ETR_{P1}
T peuplement (T_{P2})	+	In Peuplement (In_{P2})	=	ETR_{P2}

Figure II.36 : Récapitulatifs des calculs de transpiration (T , mm) et d'interception (In , mm) utilisés pour les calculs d'évapotranspiration réelle ($ETR = T + In$, mm) par la méthode analytique à l'échelle des sous-peuplements (hêtres, H et douglas, D) et du peuplement, sans ($P1$) ou avec ($P2$) l'utilisation du modèle de footprint.

II.7.3. La méthode du bilan hydrique du sol

II.7.3.1. Le drainage

Le drainage n'a pas été mesuré sur le site expérimental. Il est classé comme favorable³ selon le sigle de la carte des sols de Belgique (Gbb2 ; Légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie version-2, 2007).

Selon l'équation du bilan hydrique (Equation 1) : $D = P_i - ETR - \Delta R_t$. A l'échelle saisonnière, le drainage peut être évalué à partir de la résolution de cette équation, les variables étant toutes mesurées sur le site de manière indépendante. Le drainage est également une variable fournie par le modèle BILJOU®.

II.7.3.2. La méthode du bilan hydrique du sol (ETR_{SOL})

Selon l'équation du bilan hydrique du sol (Equation 1) : $ETR = P_i - D_r - \Delta R_t$. Pour la résolution de cette équation, la principale impasse a été l'estimation du drainage. À partir des mesures *in situ* des teneurs en eau du sol (Section II.6.5), le drainage n'est pas estimable en raison de la difficulté à séparer les flux de drainage et d'évapotranspiration ainsi que du dysfonctionnement des sondes d'humidité du sol lors de fortes pluies, en particulier lorsque le sol est proche de la saturation en eau. Dans ce cas-là, l'estimation de ΔR_t peut représenter une variation de réserve en eau disponible d'un à plusieurs jours. Le drainage modélisé par BILJOU® sur un pas de temps journalier (et donc facilement cumulable sur un pas de temps plus long), est alors utilisé pour la résolution de l'Equation 1 (Figure II.37).

Pour les jours sans pluie, l' ETR_{SOL} est considérée égale à la valeur absolue de ΔR_t . C'est donc la seule condition pour laquelle la méthode du bilan hydrique du sol peut être comparée aux autres mesures, sans l'utilisation du modèle.

Par cette méthode, l'ETR est estimée à l'échelle des sous-peuplements de hêtres ($ETR_{SOL.H}$; Figure II.37) et de douglas

³ Classe de drainage naturel favorable (b) : sols non gleyifiés avec une apparition des phénomènes d'oxydo-réduction à partir de 125 cm de profondeur.

($ETR_{SOL,D}$; Figure II.37). La comparaison est alors principalement faite avec la méthode analytique, permettant de distinguer l'ETR des deux sous-peuplements.

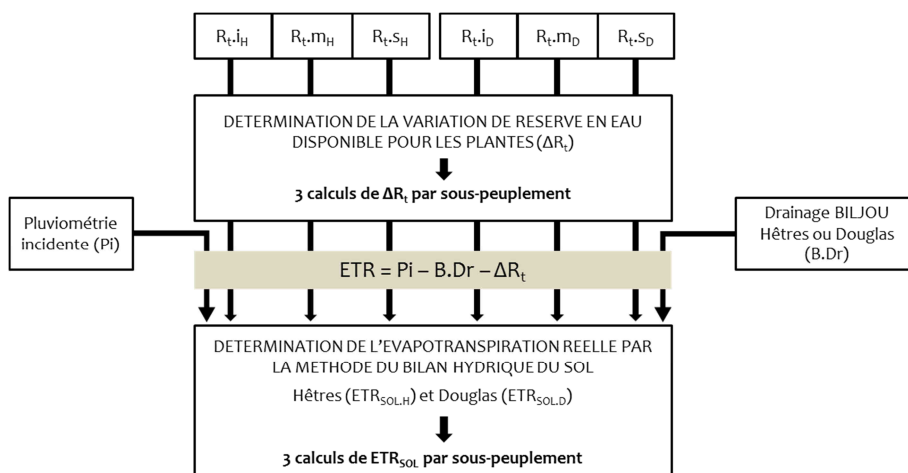


Figure II.37 : Méthodologie de calcul de l'évapotranspiration réelle évaluée par la méthode du bilan hydrique du sol, ETR_{SOL} . L' ETR_{SOL} est caractérisée pour le sous-peuplement de hêtres ($ETR_{SOL,H}$ et de douglas $ETR_{SOL,D}$). Les variations de réserve en eau du sol sont déduites, par sous-peuplement, des calculs inférieurs ($R_{t,i}$), moyens ($R_{t,m}$) et supérieurs ($R_{t,s}$) de réserve en eau disponible (R_t). Le drainage utilisé est celui modélisé par BILJOU© ($B.Dr$, mm).

II.7.4. Modèle de bilan hydrique forestier BILJOU©

Le modèle BILJOU© (Granier et al., 1999 ; Section I.6.4) permet d'établir un bilan hydrique journalier du site étudié. Sont exposées brièvement dans ce paragraphe les entrées, les paramètres et les sorties du modèle. Pour plus de détails se référer à l'article cité ci-dessus ou au site internet développé pour l'utilisation en ligne du modèle :

<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/index.php?p=accueil>.

II.7.4.1. Les entrées du modèle

Les variables météorologiques (Section II.1.3 ; Figure II.38), sont fournies à BILJOU© sous forme de valeurs journalières. Il s'agit de : P_i (mm), R_g ($J.cm^2$), T_a ($^{\circ}C$), VPD (hPa) et w_s ($m.s^{-1}$).

II.7.4.2. Les paramètres

Le profil de sol décrit au modèle est constitué de maximum 3 horizons. Pour chaque horizon d'épaisseur connue, il est nécessaire d'estimer la RU, la densité des racines fines, la teneur en eau pondérale au point de flétrissement permanent et la densité apparente du sol. A Vielsalm, 3 fichiers paramètres sont définis (Tableau II.14) sur base des valeurs RU.i, RU.m et RU.s (hêtres, H ou douglas, D ; Section II.3.2.6).

Feuillus						
Phénologie : 112-310						
LAI _{max} = 5						
Prof.	ρ_{rac}	θ_{WP}	ρ_s	RU.i _H	RU.m _H	RU.s _H
20	0.357	0.143	0.99	8.3	19.8	31.5
60	0.51	0.125	1.26	35.2	60.7	86.2
130	0.132	0.143	1.68	54	123	194.4
Résineux						
Phénologie : 1-366						
LAI _{max} = 4.2						
Prof.	ρ_{rac}	θ_{WP}	ρ_s	RU.i _D	RU.m _D	RU.s _D
20	0.534	0.105	1.03	18.9	30.5	42
60	0.454	0.107	1.13	50.5	73.2	96.3
130	0.012	0.143	1.66	64.0	117.0	168.8

Tableau II.14 : Fichiers paramètres des sous-peuplements de feuillus (en haut) et de résineux (en bas), pour le modèle BILJOU©, détaillant : les dates de débourrement et de chute des feuilles des feuillus (DOY ; phénologie), la valeur de LAI_{max} de chaque sous-peuplement, puis pour chaque horizon la profondeur de son plancher (Prof., cm), la densité racinaire (ρ_{rac} , exprimée en proportion de la densité racinaire totale), la teneur en eau volumique du sol au point de flétrissement permanent (θ_{WP}), la densité apparente du sol (ρ_s , g.cm⁻²), et la RU (mm ; 1 calcul par fichier paramètre, RU.i, ou RU.m ou RU.s).

Pour tout type de peuplement, une valeur de LAI_{max} est fournie au modèle. Le LAI est considéré comme variable pour les feuillus en fonction de la phénologie et constant pour les résineux (= LAI_{max}), au cours de l'année. Pour les feuillus, l'évolution du LAI est directement calculée à partir du LAI_{max}, en précisant le jour de débourrement des feuilles et celui de leur chute complète. Sur base d'observations sur le terrain, le débourrement est

paramétré pour le 22 avril (DOY 112) et la chute des feuilles pour le 06 novembre (DOY 310). Les valeurs de LAI_{max} pour chaque sous-peuplement ont été paramétrées sur base des mesures au LAI2200 (Section II.3.2), durant les mois de juillet et aout.

II.7.4.3. Les sorties du modèle

Les flux (Figure II.38)

Il s'agit des différents flux de l'ETR (B.ETR), en valeurs journalières soit : la transpiration des arbres (B.T), l'interception de la pluie par les surfaces végétales (B.In), et l'évaporation du sol et la transpiration du sous-étage (B.ETu). A partir d'une évaluation du flux de drainage, B.Dr, selon l'équation du bilan hydrique du sol (Equation 1), le modèle est alors en mesure de fournir une estimation de la variation de réserve en eau disponible, absolue, $B.R_t$, ou relative, B.REW. Pour le calcul des différents flux, le lecteur est invité à consulter Granier et al. (1999).

Dans cette étude, les sorties spécifiques aux feuillus et aux résineux concernant l'ETR, sont ensuite utilisées pour calculer les flux représentant le peuplement mixte (P ; Parcelle C100 ; Figure II.38). Pour cela, du DOY 121 au DOY 288 de chaque année, les valeurs journalières des flux modélisés, des feuillus et des résineux, sont additionnées en étant pondérées par la proportion de la surface d'aubier corrigée (SA_c) de chaque groupe au sein de la Parcelle C100 (Feuillus : 0.34 ; Résineux : 0.66). En dehors de ces dates, les sorties du peuplement mixte sont assimilées aux sorties du modèle des résineux. Nous n'avons pas utilisé de modèle de footprint, les résultats de ce dernier n'étant disponibles pour l'instant qu'à partir de 2010.

Les sorties des modèles sont alors notées :

$$\underbrace{B}_{\text{BILJOU©}} \cdot \underbrace{R_t(\text{ou REW ; Dr ; T ; In ; ETR})}_{\text{Sorties du modèle}} \cdot \underbrace{i(\text{ou } m ; s)}_{\text{Calcul RU}} \cdot \underbrace{H(\text{ou } D ; P)}_{\text{(Sous-) peuplement}}$$

Pour l'exemple, la R_t modélisée pour les feuillus, pour le scénario de RU moyen ($RU.m_H$) est notée : $B.R_t.m_H$.

Les indices

A partir de la REW, le modèle calcule et fournit trois indices de stress hydriques (lorsque $REW < 0.4$) : la durée du déficit hydrique, l'intensité du déficit hydrique et la date de début du déficit hydrique (Sections I.6.4).

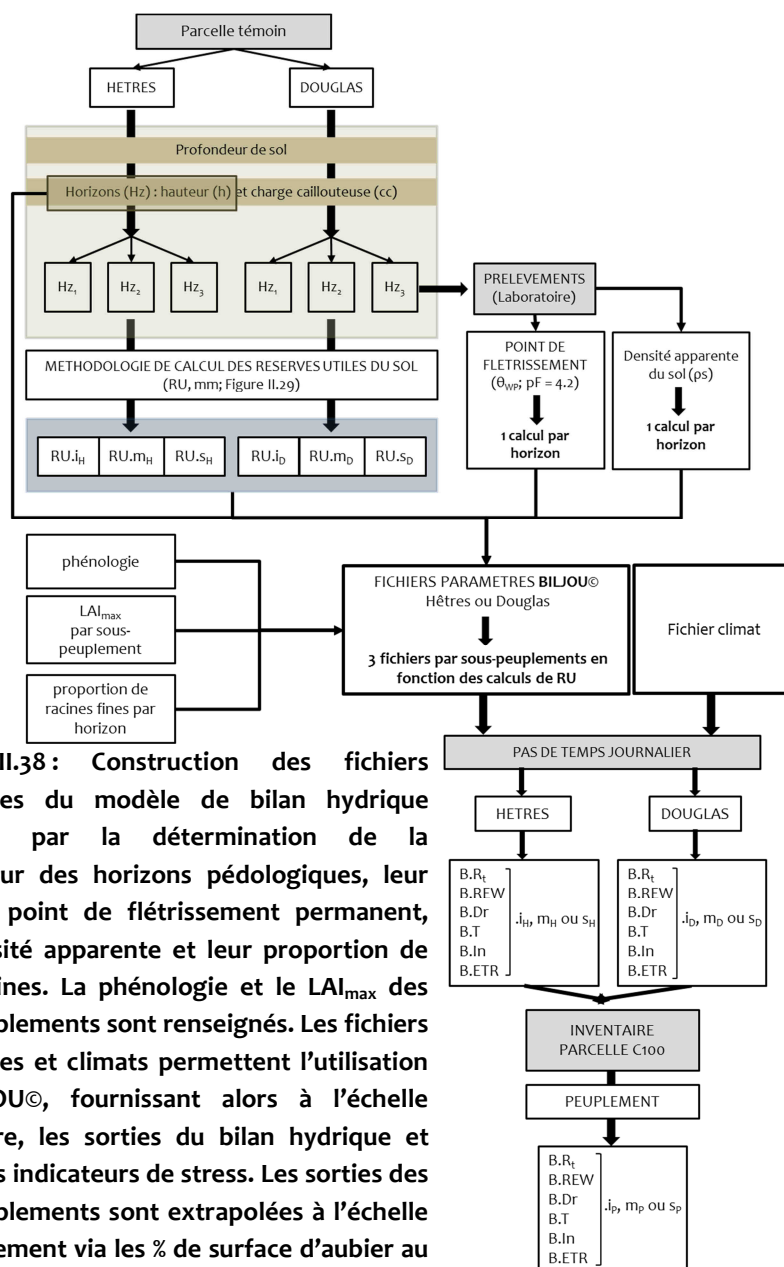


Figure II.38 : Construction des fichiers paramètres du modèle de bilan hydrique BILJOU®, par la détermination de la profondeur des horizons pédologiques, leur RU, leur point de flétrissement permanent, leur densité apparente et leur proportion de racines fines. La phénologie et le LAI_{max} des sous-peuplements sont renseignés. Les fichiers paramètres et climats permettent l'utilisation de BILJOU®, fournissant alors à l'échelle journalière, les sorties du bilan hydrique et différents indicateurs de stress. Les sorties des sous-peuplements sont extrapolées à l'échelle du peuplement via les % de surface d'aubier au sein de la Parcelle C100, en fonction du genre feuillus ou résineux.

II.7.5. Récapitulatif des grandeurs construites et comparées pour l'évaluation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Pour rappel, quatre méthodes d'évaluation de l'ETR sont comparées, l'eddy covariance, les méthodes analytique et de bilan hydrique du sol et la modélisation par BILJOU©. Au travers des méthodes, l'échelle du peuplement et/ou des sous-peuplements de hêtres et de douglas, sont caractérisées (Figure II.39). En réalisant les analyses les jours sans pluie, les évaluations de l'ETR sont simplifiées. Les mesures par eddy covariance sont principalement comparées à la méthode analytique et à BILJOU© à l'échelle du peuplement, avec ou sans l'utilisation du modèle de footprint (Figure II.40). Les méthodes analytique, de bilan hydrique du sol et BILJOU© permettent une distinction des sous-peuplements, et sont comparées entre elles à cette échelle spatiale (Figure II.40).

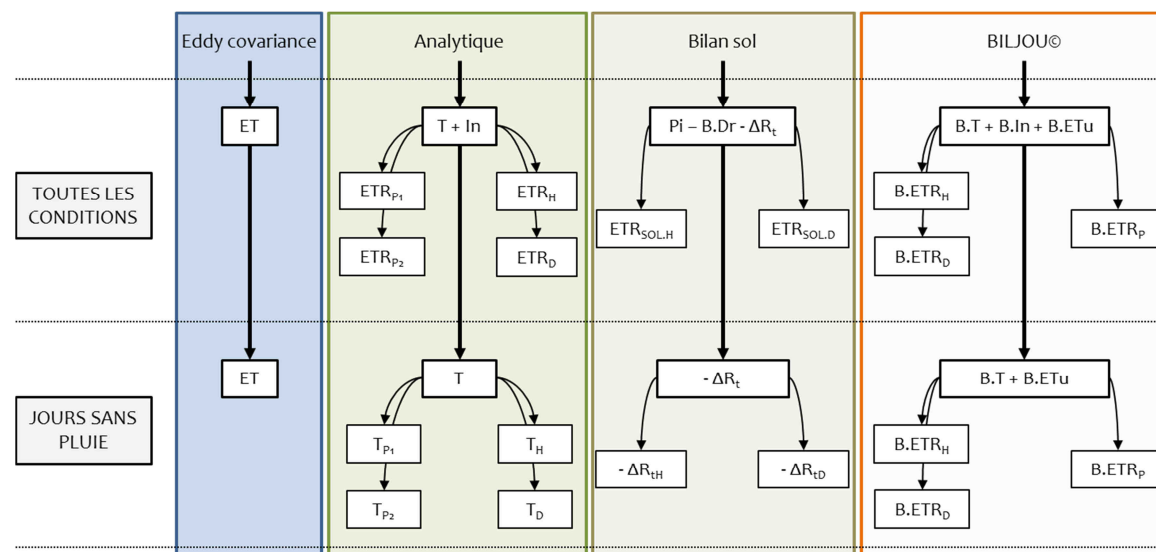


Figure II.39 : Récapitulatif des méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration réelle (ETR, mm). La méthode par eddy covariance permet une évaluation globale de l'ETR (ET) à l'échelle des sous-peuplements. Les méthodes analytique (ETR) et BILJOU© (B.ETR; modélisation), permettent la distinction des composantes de l'ETR, soit la transpiration (T ou B.T, mm), l'interception (In ou B.In, mm) et pour BILJOU© uniquement, l'évapotranspiration du sol et du sous-bois (B.ETu, mm). Avec l'utilisation du drainage modélisé par BILJOU© (B.Dr, mm), la méthode du bilan hydrique permet l'évaluation de l'ETR (ETR_{SOL}) à partir de la mesure de la pluviométrie incidente (Pi, mm) et des variations de réserve en eau disponible pour les plantes (ΔR_t, mm). Les jours sans pluie (ou à partir des 3^{èmes} jours sans pluie) sont analysés séparément permettant une simplification des calculs d'ETR. Selon la méthode, les flux sont distingués à l'échelle des sous-peuplements (hêtres, H et douglas, D) et/ou du peuplement (P). Pour la méthode analytique, l'échelle peuplement est prise en compte sans (P1) ou avec (P2) l'utilisation du modèle de footprint.

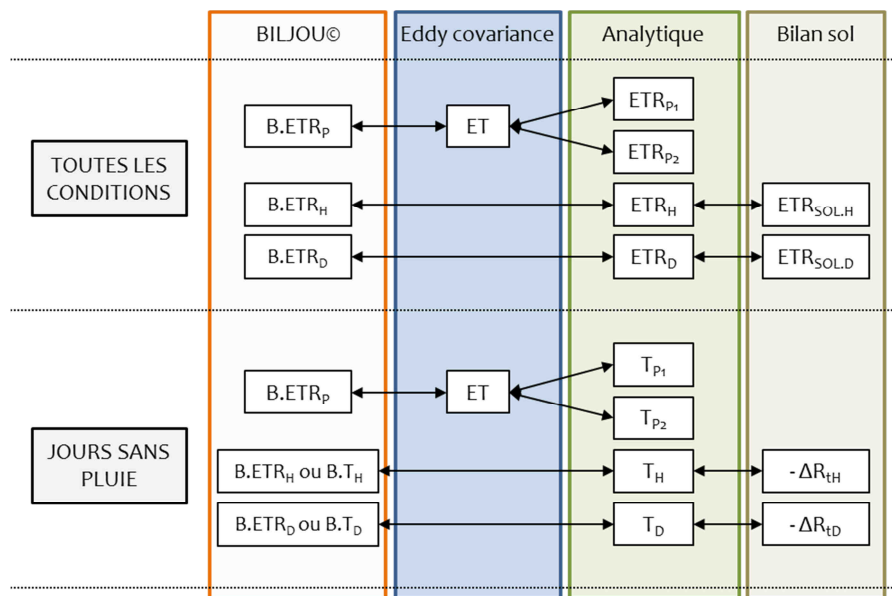


Figure II.40 : Récapitulatif des évaluations de l'évapotranspiration réelle (ETR, mm) comparées, en fonction de la méthode d'évaluation (eddy covariance, analytique, bilan hydrique du sol et BILJOU©) et de l'échelle spatiale considérée (peuplement et sous-peuplement de hêtres et de douglas), pour toutes les conditions de mesure et les jours sans pluie (ou à partir des 3^{èmes} jours consécutifs sans pluie).

III. CARACTERISATION DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES RESERVES UTILES DU SOL (RU) ET DES RESERVES EN EAU DISPONIBLE (R_t)

La quantification de la disponibilité en eau est essentielle à l'analyse des flux transpiratoires ainsi que pour évaluer les risques de stress hydrique. La RU, a en effet été identifiée comme le facteur le plus limitant lors de dépérissement et/ou de mortalité des peuplements forestiers européens (Granier et al., 2007; Manise et Vincke, 2012). Les propriétés du sol régulant la RU sont cependant très variables, dès l'échelle du décimètre. Un enjeu majeur des études visant à caractériser le fonctionnement des espèces ligneuses est alors de pouvoir quantifier correctement la variabilité spatio-temporelle de la RU et de la réserve en eau disponible pour les plantes (R_t), ce qui fait l'objet de ce chapitre. Il s'agit de répondre aux questions suivantes :

- Quelle profondeur de sol potentielle les espèces peuvent-elles coloniser et quelle est la variabilité de la profondeur et des densités racinaire entre sous-peuplements ?
- Quelle est la variabilité des teneurs en eau volumique à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent ?
- Quelle est la variabilité de la charge caillouteuse ?
- Quelle est la variabilité des teneurs en eau volumique du sol en fonction de la profondeur au sein, et entre sous-peuplements ?

Les différences potentielles entre les gammes de R_t obtenues sont analysées en fonction des caractéristiques des espèces pouvant influencer sur les entrées d'eau (interception), ou les sorties (transpiration). La R_t , obtenue par sous-peuplement en 2010-2011, est également comparée aux sorties de BILJOU© afin de vérifier la bonne concordance entre les mesures et le modèle et l'utiliser en rétrospectif par la suite.

III.1. Caractéristiques du sol

III.1.1. La profondeur de sol

Pour le calcul de la RU (Equation I.9) et de la R_t (Equation I.10), une profondeur de sol doit être déterminée. L'approche classique consiste à

considérer une profondeur de sol constante, correspondante généralement aux profondeurs racinaires observées. Cependant l'observation des racines est délicate et le développement racinaire est dynamique et évolue en fonction des besoins en eau de la plante et des propriétés du sol (Bréda et al., 2002). Il semble alors plus prudent de définir une profondeur de sol potentielle, dépendante selon Bréda et al. (2002) de la présence d'obstacles de nature mécanique, hydrique, ou chimique, comme par exemple un horizon pédologique asphyxiant, induré, carbonaté, ou la roche mère non altérée.

La variabilité de la profondeur de sol potentielle, évaluée jusque-là entre 1 et 1.5 m, a été testée sur la Parcelle témoin au travers d'une campagne de mesure GPR (Section II.6.1).

Sur les 8 images obtenues à partir des transects effectués (1 image par transect), 3 sont présentées Figure III.1. Les autres se trouvent en annexe (Annexe 3). Sur l'ensemble des images obtenues, des réflexions prononcées sont observées aux temps de propagation 40–55 ns correspondant environ à 1.5–2.5 m de profondeur, en considérant une permittivité du sol de 9. Elles sont relativement continues sur l'ensemble des transects ce qui indiquerait une transition brutale dans les propriétés du sol. Sans se prononcer pour l'instant sur la profondeur du sol, cette dernière semble constante sur l'ensemble des transects mesurés.

La correspondance entre les profondeurs estimées à partir du GPR et les profondeurs maximales atteintes par sondage à la tarière n'est pas bonne. Sur le transect du sous-peuplement de hêtres (Figure III.1, en haut), les profondeurs maximales atteintes par sondage à la tarière sont de 0.68 et 1.0 m (de gauche à droite), alors que de fortes réflexions sont estimées entre 1.5 et 2.5 m. On note tout de même, sur l'image, comme à la tarière, que la profondeur au niveau du 1^{er} sondage est moins importante qu'au niveau du second. Dans le sous-peuplement de douglas (Figure III.1, au milieu), les temps de propagation indiquant une transition brutale dans les propriétés du sol, correspondent à des niveaux de profondeurs de l'ordre de 1.5–2.5 m, ce qui représente plus du double de la profondeur maximale atteinte par sondage à la tarière (70 cm).

L'ensemble des données acquises sur le site à partir de fosses pédologiques ou de prélèvements à la tarière, nous amène à considérer une profondeur de sol maximale égale à 1.5 m. L'estimation de la profondeur de sol à partir des mesures radar est par contre supérieure, les plus fortes réflexions étant mesurées entre 2 et 2.5 m de profondeur. Par cette méthode, la profondeur de sol est calculée indirectement par la conversion du temps de propagation des ondes en fonction de la permittivité diélectrique du sol. A partir des mesures de teneurs en eau volumique du sol des réflectomètres le jour de la campagne de terrain GPR, la permittivité du sol a été évaluée à 9 afin de calculer la profondeur de sol. Cette valeur peut être remise en question pour l'évaluation de la profondeur.

Devant l'incertitude concernant la profondeur estimée par GPR, **nous avons choisi d'utiliser les résultats de profondeur de sol obtenus par une évaluation directe** (fosses ou tarière). La profondeur potentielle est alors estimée à 130 cm. Les **mesures radar nous permettent par contre de constater une profondeur de sol assez homogène** sur la Parcelle témoin (Figure III.1), en faisant alors l'hypothèse que la permittivité diélectrique du sol est également relativement homogène sur le site.

Concernant la présence éventuelle d'une nappe perchée, il n'est pas exclu que les transitions brutales de propriétés du sol observées sur les images GPR correspondent à une transition dans les teneurs en eau du sol au-dessus d'une roche mère assez perméable. Cependant aucune nappe n'est mentionnée dans les études précédentes sur le site. De plus, un tuyau de petit diamètre, percé dans sa longueur, et d'une profondeur d'environ 4 m, a été installé près de la tour lors de la construction de ses fondations en 2009. Les relevés n'ont été ni notés, ni continus, mais aucune présence d'eau n'a jamais été constatée au sein du tuyau (communication personnelle technicien UPB). Nous écartons alors pour l'instant l'hypothèse de la présence d'une nappe perchée sur le site.

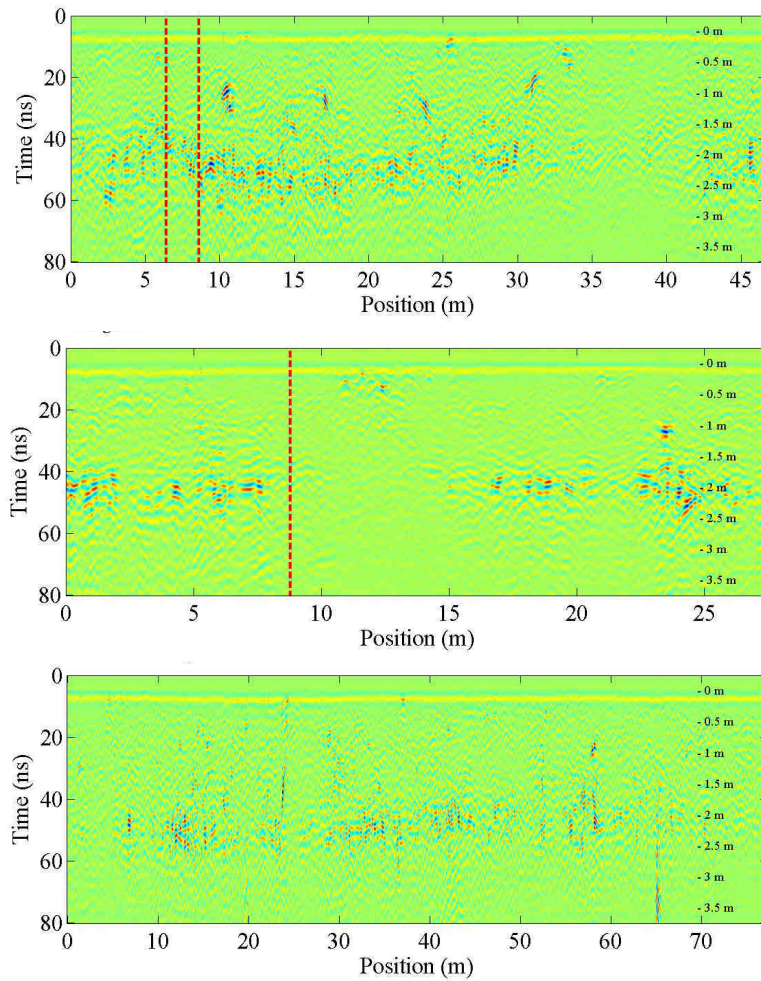


Figure III.1 : Images radar obtenues à partir de l'antenne GPR correspondant au 2^{ème} transect (Hêtres, en haut), au 7^{ème} (Douglas, au milieu) et au 8^{ème} (Longitudinal, en bas). Le temps de propagation est présenté selon l'échelle verticale (Time, ns). L'échelle de profondeur (indiquée sur la droite de l'image en m) a été évaluée en considérant une permittivité de 9, sur base des conditions d'humidité du sol observées sur le terrain. L'axe horizontal représente la position des mesures le long du transect. Les zones de couleurs bleue et rouge sur les images représentent les réflexions de plus forte intensité; l'intensité diminue à mesure que l'on se rapproche du jaune-vert. Enfin, les images ont été traitées en utilisant une fonction de gain de 2.3, permettant d'amplifier progressivement le signal radar à mesure que la profondeur augmente afin de compenser l'atténuation des ondes lors de leur propagation. Les lignes verticales rouges localisent les sondages effectués à la tarière.

III.1.2. La profondeur racinaire

La cartographie des racines fines (< 3 mm de diamètre) sur un plan vertical, permet d'évaluer leurs profondeurs jusqu'à environ 80 cm pour le sous-peuplement de douglas et 130 cm pour le sous-peuplement de hêtres (Figure III.2). La majorité des racines fines (environ 55 %), se situent dans les 20 premiers cm de sol, quel que soit le sous-peuplement. De plus, dans les 20 premiers cm, la densité de racines fines est deux fois plus grande dans le sous-peuplement de douglas (Figure III.3). Les différences s'atténuent avec la profondeur entre les deux sous-peuplements. Concernant les racines de diamètre supérieur à 3 mm, les ordres de grandeur de densité sont similaires entre les deux sous-peuplements en fonction de la profondeur de sol. En dessous de 60 cm, très peu de racines fines sont observées.

Quelle que soit l'espèce, plus de 85 % des racines fines comptabilisées sont comprises dans les 50 premiers cm de sol (Figure III.4). Pour les hêtres quelques racines sont comptabilisées entre 120 et 135 cm sur la répétition 3. Pour les douglas les racines les plus profondes ont été observées entre 70 et 80 cm, pour toutes les répétitions. Les mesures ne sont faites cependant qu'à partir de 2 fosses pédologiques et il semble assez probable, comme pour les hêtres, que les douglas aient pu coloniser le sol en dessous de 80 cm de profondeur.

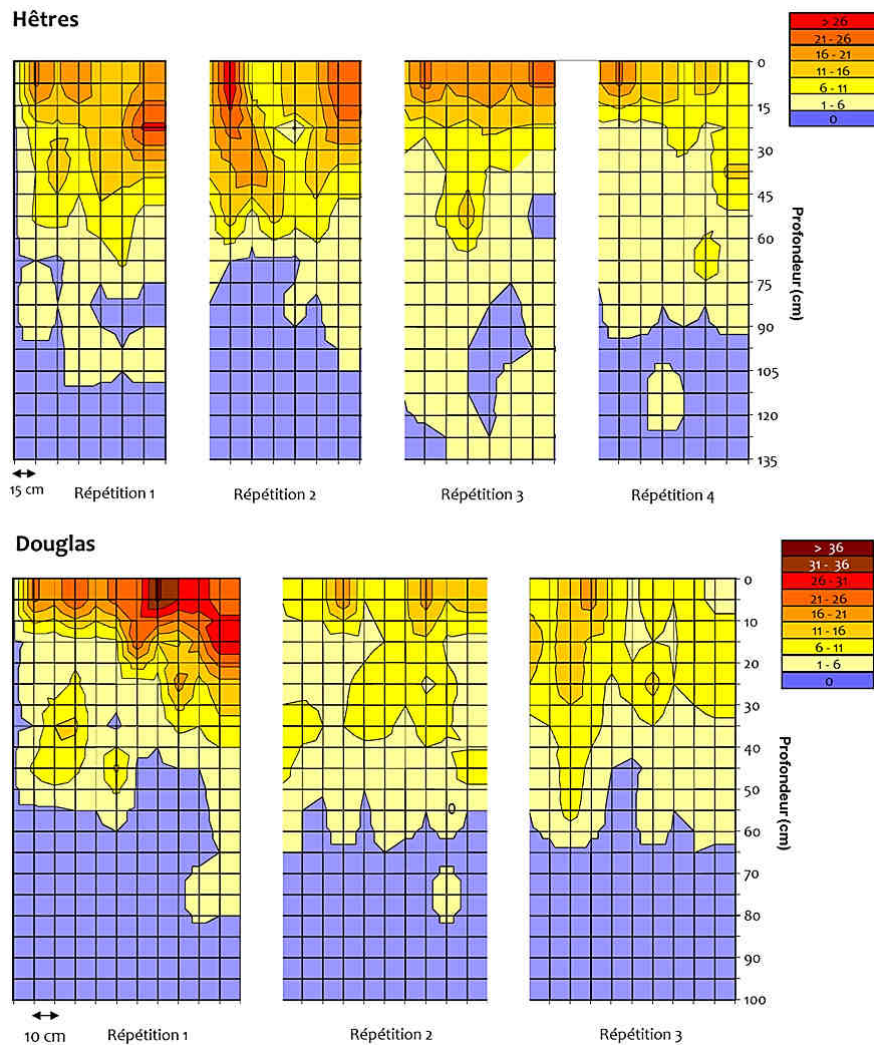


Figure III.2 : Cartographie des points d'impacts comptabilisés de racines fines (< 3 mm), en fonction du sous-peuplement, hêtres (en haut) et douglas (en bas), et des répétitions effectuées pour chacun d'entre eux (Hêtres : répétitions 1 et 2 pour la fosse Rac.H1, répétitions 3 et 4 pour la fosse Rac.H2 ; Douglas : répétitions 1 et 2 pour la fosse Rac.D1, répétition 3 pour la fosse Rac.D2 ; Figure I.1). Les couleurs correspondent à des gammes (légende en haut à droite) basées sur le nombre de racines comptées (point d'impacts) par carré (15 cm pour les hêtres ; 10 cm pour les douglas).

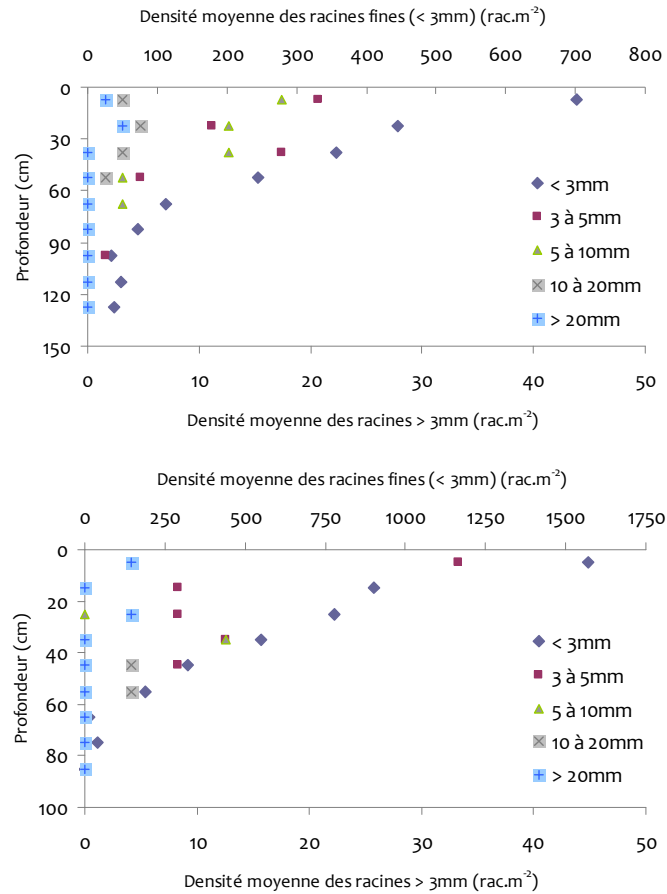


Figure III.3 : Densité racinaire moyenne (rac.m⁻²), en fonction de la profondeur et des classes de diamètre, pour les sous-peuplements de hêtres (en haut) et de douglas (en bas).

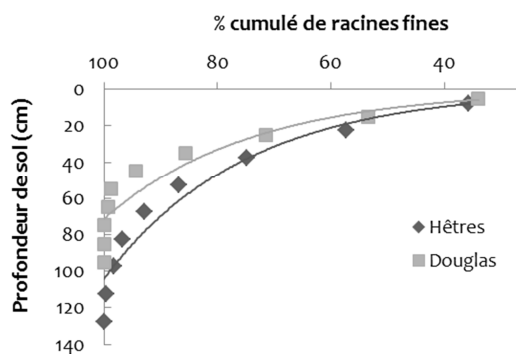


Figure III.4 : Pourcentages cumulés de racines fines (< 3 mm de diamètre) en fonction de la profondeur de sol (cm), pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas. Les pourcentages présentés sont basés sur la moyenne des valeurs obtenues par répétition, par sous-peuplement.

III.1.3. Les teneurs en eau caractéristiques du sol

Les teneurs en eau caractéristiques du sol, à savoir la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, peuvent être déterminées à partir des courbes de rétention en eau établies en laboratoire. Le point de flétrissement permanent est obtenu pour une succion équivalente à $pF = 4.2$. La capacité au champ est déterminée à partir des valeurs mesurée *in situ* (Section I.4.2 et II.3.2.5). Elles seront comparées aux valeurs issues des courbes de rétention, afin de préciser si possible le pF correspondant à la capacité au champ sur le site de Vielsalm, au sein de la gamme généralement retenue pour les sols forestiers (pF 2 à 3 ; Bréda et al., 2002).

III.1.3.1. Résultats obtenus en laboratoire : les courbes de rétention en eau

Les valeurs moyennes de teneurs en eau volumique du sol (Tableau III.1, Figure III.5) ne présentent pas de différence significative entre les deux sous-peuplements (test de Student tout horizon et pF confondus, rapport $t = 1.71$ & Prob. $> |t| = 0.0881$). Pour les 2 premiers horizons et le dernier, les teneurs en eau volumique sont légèrement plus élevées pour le sous-peuplement de hêtres (respectivement 16, 20 et 14 % sur l'ensemble des points pF).

	pF(0)		pF(1)		pF(1.5)		pF(2.0)		pF(2.47)		pF(2.98)		pF(4.05)	
	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D
Hz.1	60.9 (4.1)	53.2 (1.1)	53.6 (5.0)	48.0 (1.0)	48.9 (4.7)	43.1 (1.8)	42.0 (4.3)	35.3 (3.2)	36.5 (3.9)	31.2 (3.3)	34.0 (2.9)	26.8 (4.4)	7.6 (1.2)	6.8 (0.9)
Hz.2	56.5 (2.3)	54.4 (2.7)	50.8 (2.6)	48.1 (2.5)	45.2 (2.4)	42.8 (2.6)	40.6 (3.8)	33.3 (2.0)	37.8 (4.2)	28.2 (2.3)	35.3 (4.0)	21.3 (2.2)	7.8 (0.8)	7.7 (2.7)
Hz.3	55.7 (4.5)	57.2 (3.0)	49.3 (2.3)	50.8 (2.6)	40.5 (3.0)	43.2 (1.7)	34.0 (0.8)	33.6 (1.1)	28.8 (1.6)	28.6 (1.0)	24.7 (2.8)	22.4 (0.6)	10.6 (3.4)	7.5 (0.5)
Hz.4	49.6 (3.6)	52.6 (3.6)	46.4 (4.2)	47.6 (1.6)	40.6 (3.3)	41.2 (0.8)	34.8 (2.4)	34.2 (1.5)	30.5 (2.3)	29.6 (3.1)	25.4 (3.5)	24.3 (4.6)	9.6 (2.0)	7.8 (1.0)
Hz.5	46.4 (2.9)	46.6 (4.6)	44.1 (2.3)	43.2 (3.4)	40.2 (1.3)	39.5 (2.7)	35.8 (0.7)	35.7 (2.5)	31.5 (0.3)	33.3 (2.5)	26.0 (1.1)	32.4 (2.3)	11.8 (2.2)	10.2 (1.1)
Hz.6	42.1 (2.9)	38.4 (4.1)	39.4 (3.1)	35.9 (3.8)	36.6 (3.9)	33.5 (4.2)	35.2 (2.5)	30.8 (4.5)	32.4 (1.9)	29.0 (4.3)	27.5 (1.0)	28.2 (4.3)	14.4 (2.0)	9.8 (0.7)

Tableau III.1 : Moyennes, par sous-peuplements (hêtres, H ou douglas, D), et par horizon (Hz.1 à 6 ; Section II.3.2.3) des teneurs en eau volumique du sol ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$), mesurées en laboratoire en fonction de la succion appliquée (pF), à partir des quatre échantillons par horizon prélevés sur le terrain. Les écart-types des mesures sont donnés en-dessous de chaque valeur entre parenthèses.

III.1.3.2. Optimisation des résultats

Les mesures (Tableau III.1) sont optimisées à partir du modèle de Van Genuchten (Section II.6.4), afin d'obtenir les teneurs en eau volumique sur l'ensemble de la gamme de succion, de pF = 0 à 5 (Figure II.5), le pF = 4.2, étant la valeur retenue pour la détermination du point de flétrissement.

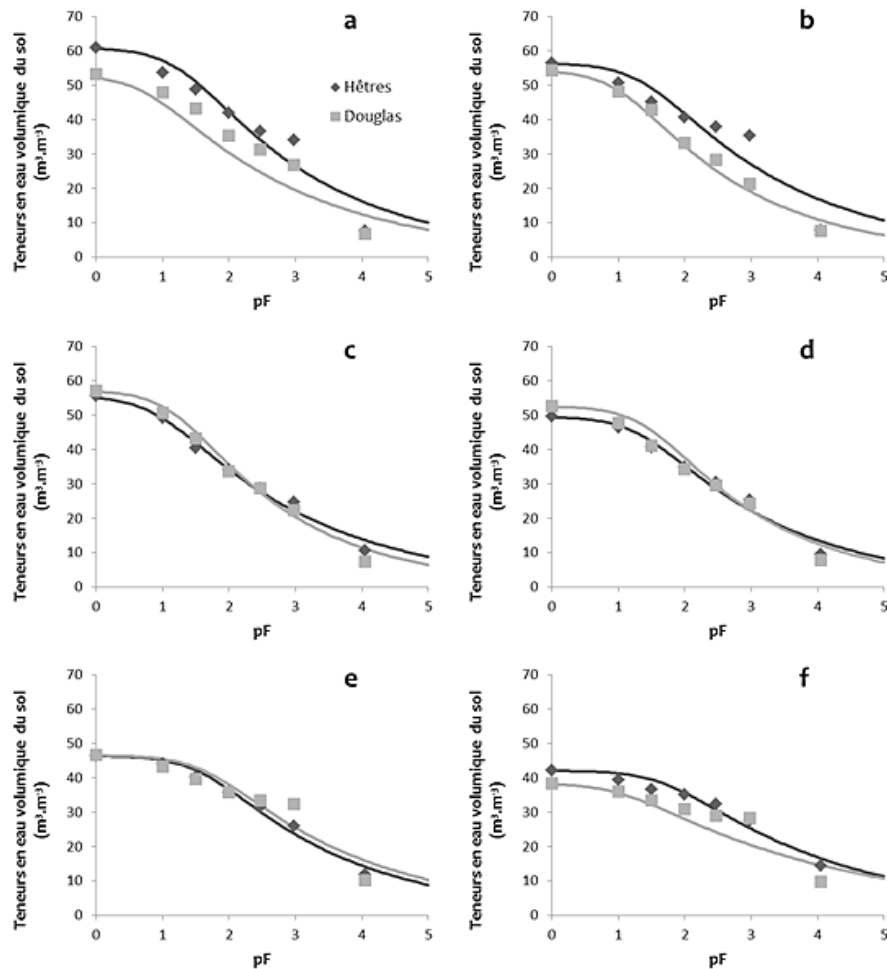


Figure III.5 : Courbes de teneurs en eau volumique du sol en fonction de la succion exercée, optimisées à partir du modèle de Van Genuchten, pour a) l'horizon 1 ([0 ; 5[), b) l'horizon 2 ([5 ; 17[), c) l'horizon 3 ([17 ; 40[), d) l'horizon 4 ([40 ; 60[), e) l'horizon 5 ([60 ; 81.5[) et f) l'horizon 6 ([81.5 ; 105[), en fonction du sous-peuplement, hêtres (lignes grises foncées) ou douglas (lignes grises claires), à partir des mesures en laboratoire (légende en a).

Les valeurs obtenues par horizon à $pF = 4.2$, sont de manière générale plus élevées pour le sous-peuplement de hêtres, mais les différences restent mineures et diminuent avec la profondeur. L'écart le plus important est observé pour l'horizon 2 (Figure III.5 b), la valeur pour le sous-peuplement de douglas étant inférieure de 36 % à celle du sous-peuplement de hêtre.

Toutes espèces et horizons confondus, on note une diminution de 19 et 21 % des teneurs en eau volumique du sol, entre les pF 2 et 2.48 et les pF 2.48 et 3 respectivement. La diminution entre les pF 2 et 4.2 de θ , est en moyenne de 63 % (Figure III.6).

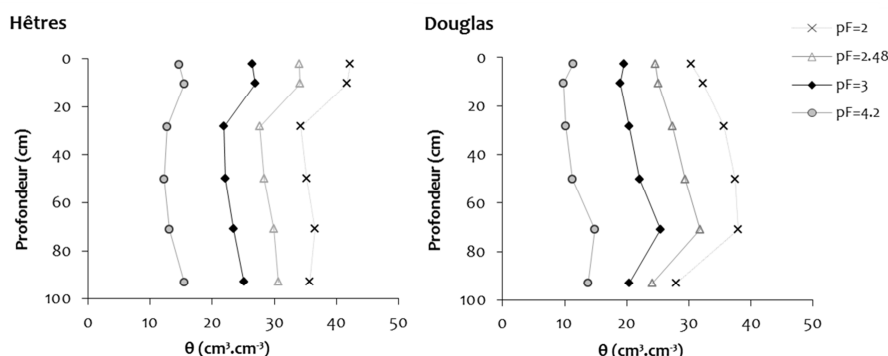


Figure III.6 : Profils des teneurs en eau volumique du sol (θ), en fonction de différentes succions (pF), par sous-peuplement, hêtres (à gauche) et douglas (à droite), obtenues à partir de l'optimisation des mesures selon le modèle de Van Genuchten (1980).

La comparaison des résultats des différentes campagnes de terrain (1996, 2010 et 2011 ; Section II.6.4), pour déterminer les profils de teneur en eau volumique du sol aux pF caractéristiques, met en avant la variabilité des résultats en fonction du lieu de l'échantillonnage (Figure III.7). A pF = 2.48 on remarque environ 25 % de différence entre les valeurs obtenues entre 2010 et 2011 jusqu'à environ 30 cm de profondeur, les valeurs de 1996 se situant entre les deux. Après 30 cm les valeurs entre les campagnes de terrain tendent à s'uniformiser. A pF = 4.2, l'évolution des profils des campagnes de terrain 2010 et 2011 est similaire mais avec un écart d'environ 20 % de 10 à 50 cm de profondeur se réduisant par contre à 70 cm. Les différences avec la campagne de terrain de 1996 sont plus importantes, les teneurs en eau en 2011 étant inférieures de -20 à -45 % environ, en fonction de la profondeur, en comparaison à celles de 1996.

Les valeurs au point de flétrissement permanent par horizon et sous-peuplement, ont été déterminées pour une succion égale à pF = 4.2. L'utilisation de tensiomètres, couplés aux mesures de teneurs en eau du sol,

permet d'établir *in situ* les courbes de teneurs en eau volumique du sol en fonction de la succion exercée. La période de mesure doit cependant être assez longue afin de caractériser l'ensemble de la gamme de succion. Cette méthode est alors la plus précise, mais la détermination en laboratoire du point de flétrissement est tout de même largement utilisée et validée. Par la méthode en laboratoire il est cependant possible que la RU évaluée à partir d'un point de flétrissement à $pF = 4.2$ soit sous-estimée. En effet il est communément admis que les arbres sont capables de puiser de l'eau pour des succions supérieures à celle équivalente à $pF = 4.2$ (Bréda et al., 2002, 2004), valeur limite établie pour les couverts herbacés et/ou les cultures. Cela n'est pas vérifiable dans le cadre de nos mesures en 2010 et 2011, les teneurs en eau volumique moyennes mesurées en fonction de la profondeur n'atteignant pas les valeurs de point de flétrissement déterminées à $pF = 4.2$ (Section III.1.5). Les variations de teneur en eau en dessous de $pF = 4.2$ sont cependant faibles. Une surestimation du pF au point de flétrissement permanent, sélectionné à 4.2, aura certainement peu de repercussions sur la détermination de la RU du sol en mm. Le pF à la capacité au champ sera déterminé dans la mesure du possible, à partir de l'analyse conjointe des courbes optimisées et des mesures *in situ* (Section III.1.5.3).

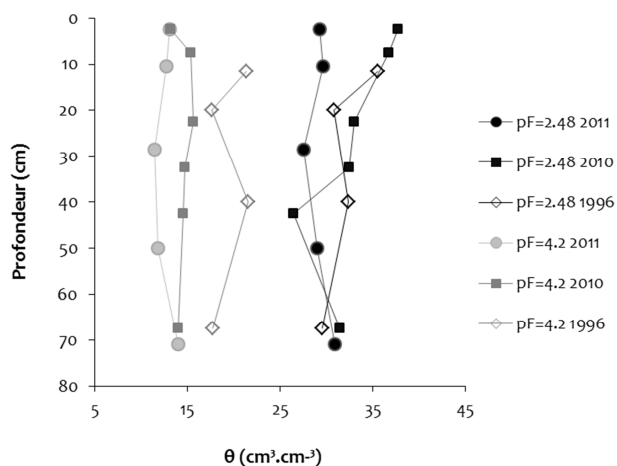


Figure III.7 : Profils des teneurs en eau volumique du sol, aux succions équivalentes à $pF = 2.48$ et 4.2 , déterminées en 2011 à partir de la moyenne de l'ensemble des valeurs optimisées obtenues (hêtres et douglas), en 2010 par une équipe allemande et en 1996 par une équipe de l'UPB (Section II.6.4).

III.1.3.3. Densité du sol et densité racinaire

Quelle que soit la profondeur de mesure, il n'y a pas de différences significatives entre les densités apparentes du sol (ρ_s) des sous-peuplements de hêtres et de douglas. La densité du sol augmente avec la profondeur, passant en moyenne (hêtres et douglas) du simple au double entre la surface et 1 m de profondeur (0,9 à 1,78 g.cm⁻³ respectivement ; Figure III.8).

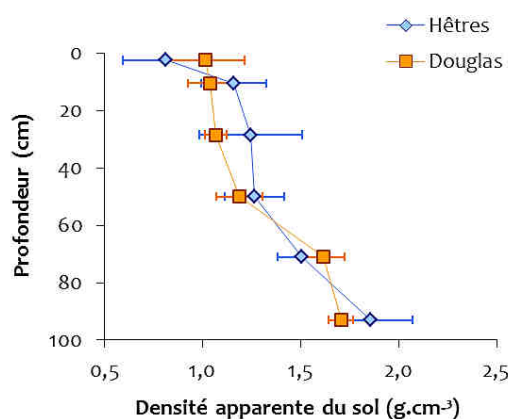


Figure III.8 : Densité apparente du sol (moyennes et écarts-types de 4 échantillons prélevés par horizon) en fonction de la profondeur, déterminée pour chaque sous-peuplement, hêtres et douglas.

Les valeurs de densité racinaire (ρ_{rac}) mesurées sur le terrain (racines fines ; rac.cm⁻²) ont été mises en relation avec la densité apparente par horizon du sol. Les régressions établies et les R² obtenus élevés (0,93 pour le sous-peuplement de douglas et 0,83 pour les hêtres) reflètent la corrélation importante entre ces deux variables (Figure III.9). L'ensemble des points pour les hêtres sont bien modélisés par une régression linéaire (Figure III.9). Cependant, la densité apparente mesurée du 1^{er} horizon est faible et une erreur de mesure n'est pas exclue. On constate sans ce point (Figure III.9 losange vide), que les modèles pour les hêtres et les douglas sont similaires, de la forme : $\rho_{rac} = 1 / [1 + a_1 * \exp(a_2 * \rho_s)]$. Le caractère reproductible de ce genre de relations, en fonction des stations et des espèces ligneuses, pourrait être testé, en vue de mettre en place des estimateurs simples de densités racinaires.

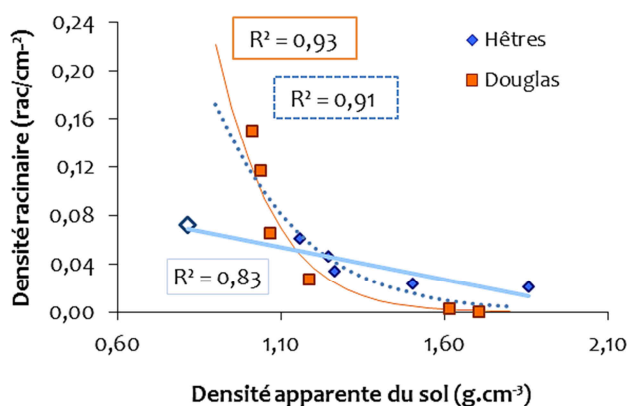


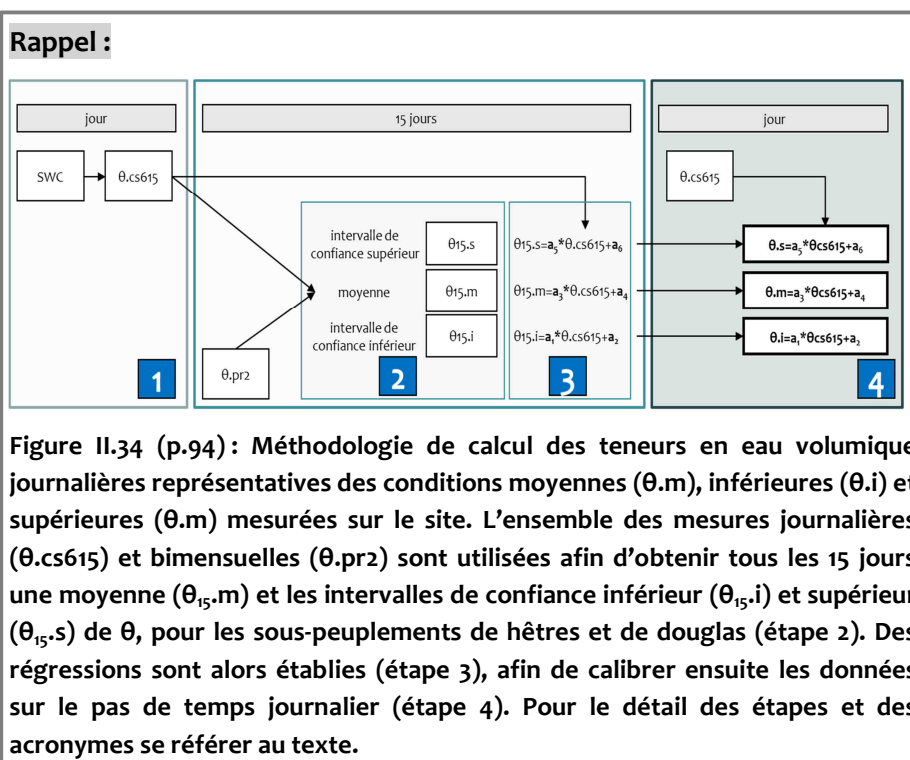
Figure III.9 : Densités racinaires en fonction des densités apparentes du sol déterminées par horizon de sol et pour chaque sous-peuplement. Les régressions (linéaire ou non pour le hêtre et non linéaire pour le douglas) sont représentées sur le graphe et accompagnées de leur R^2 respectifs.

III.1.4. La charge caillouteuse

Nous avons évalué la charge caillouteuse afin de pouvoir calculer la réserve utile et en eau disponible et paramétrer le modèle BILJOU®. Les résultats sont moyennés en fonction des 3 horizons déterminés pour les calculs de RU. Les valeurs retenues sont identiques pour les deux sous-peuplements. Elles sont respectivement de 1, 2 et 15 % pour les tranches de sol de $[0 ; 20[$, $[20 ; 60[$ et $[60 ; 130[$ cm pour les hêtres et les douglas.

III.1.5. Les teneurs en eau volumique du sol

En intégrant la variabilité temporelle et spatiale des différentes mesures de teneur en eau volumique du sol (réflectomètres CS615 en continu et Système PR2 tous les 15 jours environ ; Section II.6.5), une gamme de valeurs journalières est obtenue par sous-peuplement, hêtre et douglas (Figure II.34). La capacité au champ est déterminée *in situ* à partir de cette gamme de valeurs, lors de la saison hivernale (Section II.6.5). Les valeurs de capacité au champ et le suivi journalier des teneurs en eau volumique sont nécessaires à l'évaluation de la RU et de la R_t (Equations I.9 et I.10).



III.1.5.1. Variabilité spatio-temporelle des mesures de teneur en eau volumique du sol

Les teneurs en eau du sol calculées par sous-peuplements à partir des mesures des réflectomètres ($\theta.cs615$; Figure II.34, étape 1 et Figure III.10) correspondent pour rappel, à la moyenne de 2 sondes par profondeur de mesure (dont les sondes de la fosse SWC.T utilisées pour les 2 sous-peuplements ; Section II.6.5 ; Figure II.33). Les écarts-types de $\theta.cs615_H$ et $\theta.cs615_D$ sont fournis Figure III.10, cependant **la variabilité spatiale, à 20 et 40 cm de profondeur, est principalement caractérisée par les mesures bimensuelles, $\theta.pr2$** . A 20 et 40 cm, les mesures PR2 incluent environ 15 tubes par sous-peuplement. A 90 cm, la représentativité spatiale des mesures est améliorée en comparaison aux études antérieures mais reste limitée, avec seulement, 3 réflectomètres et 3 tubes de mesure PR2 à l'échelle de la Parcelle témoin.

Les deux types de mesures, θ_{cs615} et θ_{pr2} , sont bien corrélées (coefficient de corrélation de 0.90 à 20 et 40 cm et 0.70 à 90 cm quel que soit le sous-peuplement ; Figure III.10). En moyenne pour les hêtres, θ_{pr2} équivaut à -12, +19 et -23 % de θ_{cs615} , à 20, 40 et 90 cm respectivement, et -21, +15 et +16 % pour les douglas. Le décalage observé entre les 2 types de mesures, est certainement dû à la variabilité spatiale des teneurs en eau dans le sol et à la représentativité spatiale des mesures. Les mesures PR2 présentent également des variations de plus grandes amplitudes que celles des réflectomètres, accentuant par période, les décalages entre les deux mesures (Figure III.10).

Les teneurs en eau volumique calculées tous les 15 jours à partir de l'ensemble des mesures ($\theta_{15.m}$; Figure II.34, étape 2) présentent une forte hétérogénéité spatiale quel que soit le sous peuplement ($\theta_{15.m_H}$ et $\theta_{15.m_D}$; Figure III.11). La variabilité mesurée y est grande, avec des écarts-types allant de ± 0.03 à ± 0.14 . Les écarts-types et les moyennes sont similaires entre sous-peuplement (Figure III.10 et III.11). Les coefficients de corrélations entre $\theta_{15.m_H}$ et $\theta_{15.m_D}$ sont de 0.9 à 20 et 40 cm et 0.7 à 90 cm de profondeur. En moyenne, $\theta_{15.m_D}$ équivaut à +2, +4 et -5 % de $\theta_{15.m_H}$. Seul à 90 cm, $\theta_{15.m_H}$ et $\theta_{15.m_D}$ sont significativement différents (test de Student : $t = 2.30$; $\text{Prob.} > |t| = 0.025$).

Ces derniers résultats reflètent l'hétérogénéité des teneurs volumique en eau du sol que l'on peut rencontrer sous couvert forestier, mais avec, dans notre cas, vraisemblablement peu d'effets « espèce ». Cette hétérogénéité est modulée par les entrées d'eau, dépendantes de l'irrégularité et des contrastes du couvert forestier, par la capacité de rétention en eau du sol en fonction de la porosité, par le type d'enracinement et par la transpiration de la végétation.

Figure III.10 : Moyennes journalières et écarts-types des teneurs en eau du sol, i) θ_{cs615} (Figure II.34, étape 1), mesurées par les réflectomètres (fosse SWC) sur le pas de temps de 30 min (de 2009 DOY 181 à 2011 DOY 304) et ii) θ_{pr2} mesurées par le système PR2 environ tous les 15 jours (tubes de 40 cm et de 100 cm ; de 2009 DOY 161 à 2012 DOY 12, à 20 et 40 cm et de 2010 DOY 98 à 2012 DOY 12 à 90 cm), pour les sous-peuplements de hêtres (H, à gauche) et de douglas (D, à droite), par profondeur de mesure (de haut en bas 20, 40 et 90 cm).

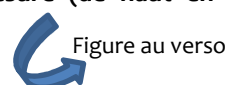
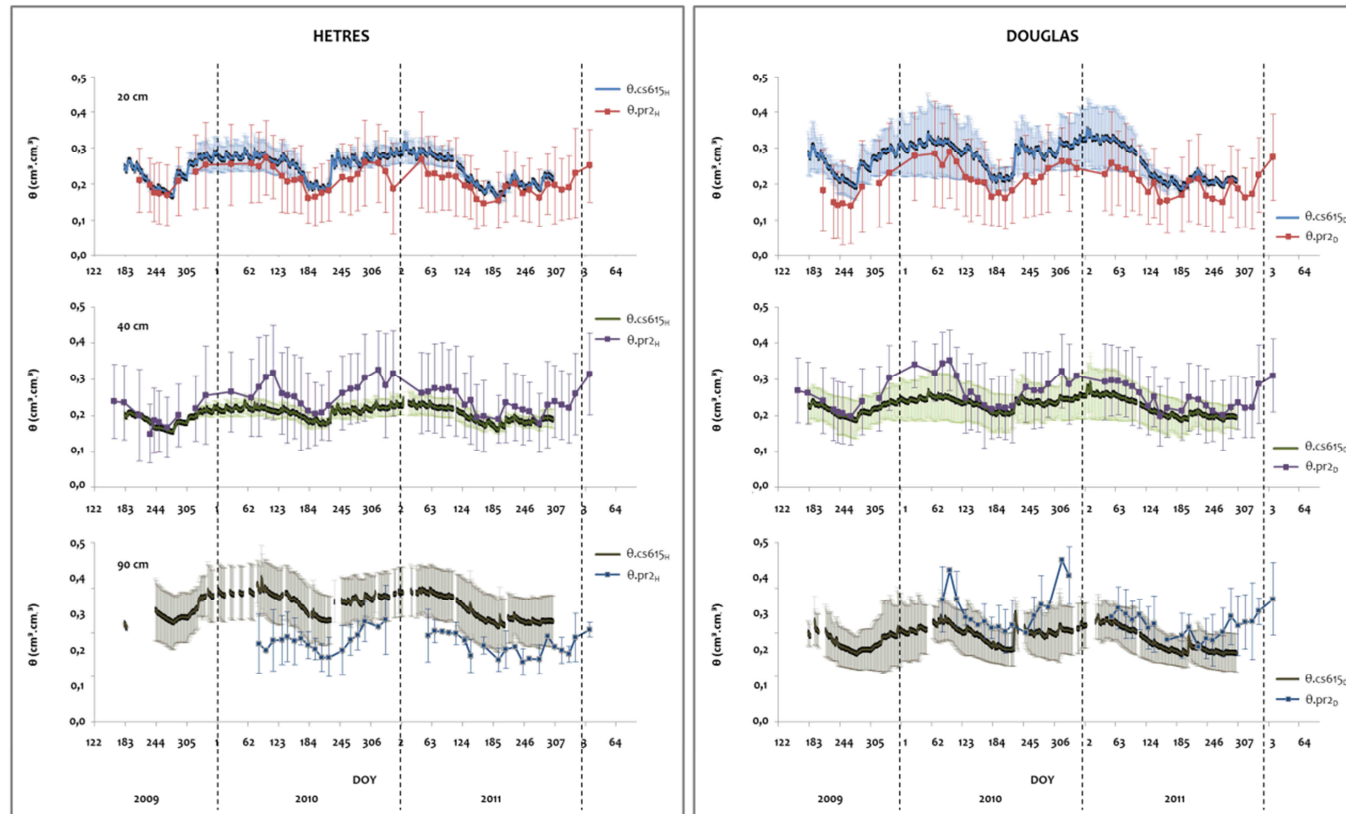


Figure au verso

Chapitre III



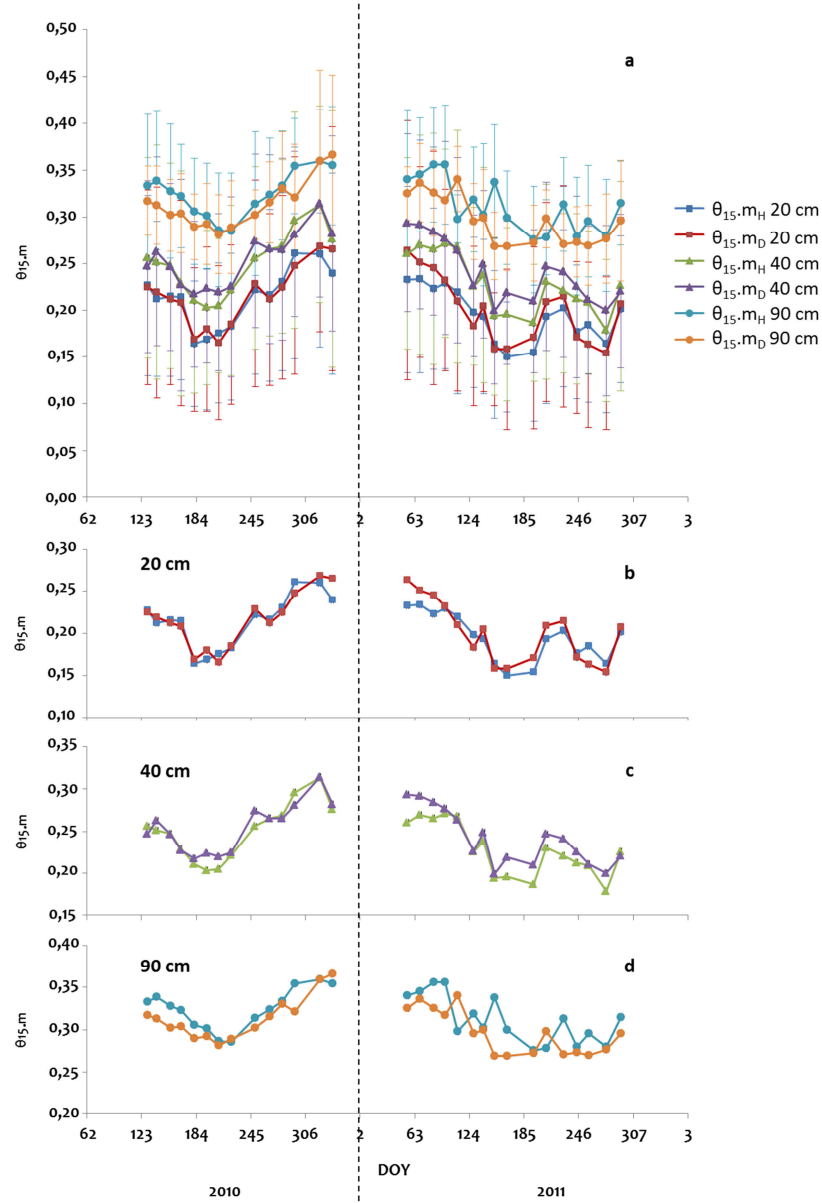


Figure III.11 : Moyennes journalières (a, b, c et d) et écarts-types (a) des teneurs en eau du sol $\theta_{15.m}$ (Figure II.34, étape 2), calculées environ tous les 15 jours, à partir de l'ensemble des mesures de teneur en eau volumique du sol (θ_{cs615} et θ_{pr2}), pour les sous-peuplement de hêtres (H) et de douglas (D), à 20 cm (a et b), 40 cm (a et c) et 90 cm (a et d) de profondeur.

Variabilité temporelle : mesures avec les réflectomètres

Il s'agit ici de la comparaison, entre fosses et par profondeur de mesure, des variations journalières des teneurs en eau volumique du sol, $\Delta\theta$, mesurées par les réflectomètres (fosses SWC.H, D et T). Elle correspond à la différence d'un jour à l'autre, des moyennes (sur 24 h à partir de minuit) des teneurs en eau du sol volumique mesurées toutes les 30 min. Les variations analysées sont comprises entre - 0.005 et 0.005, sur l'ensemble des mesures (de 2010 DOY 91 à 2011 DOY 304).

A 40 et 90 cm, $\Delta\theta_{\text{SWC.H}}$ et $\Delta\theta_{\text{SWC.T}}$ ne sont pas significativement différentes (Tableau III.3 a). Ce sont cependant des horizons pour lesquels les variations sont globalement plus faibles qu'à 20 cm. A 20 cm, les valeurs de $\Delta\theta_{\text{SWC.D}}$ ne sont pas significativement différentes de $\Delta\theta_{\text{SWC.H}}$ et $\Delta\theta_{\text{SWC.T}}$, ce qui ne se vérifie pas entre ces deux dernières (Tableau III.3).

a)	20 cm		40 cm		90 cm	
	Z	P value	Z	P value	Z	P value
SWC.H-SWC.D	-1.21	0.2270	-3.48	0.0005***	-2.71	0.0066**
SWC.T-SWC.H	2.38	0.0175*	1.48	0.1396	-1.15	0.2490
SWC.T-SWC.D	0.74	0.4574	-2.40	0.0163*	-5.23	< 0.0001***

b)	SWC.H		SWC.D		SWC.T	
	Z	P value	Z	P value	Z	P value
40-20 cm	5.38	< 0.0001***	5.52	< 0.0001***	5.32	< 0.0001***
90-20 cm	5.40	< 0.0001***	4.98	< 0.0001***	3.60	0.0003***
90-40 cm	0.58	0.56	0.36	0.72	-2.00	0.045*

Tableaux III.3 : Résultats des tests statistiques Z (variances inégales ; test de Wilcoxon pour chaque paire) et les P-values associées, entre les valeurs des variations journalières de teneur en eau volumique du sol mesurées par les réflectomètres CS615 a) en fonction des fosses SWC.H, D ou T, par profondeur de mesure (20, 40 et 90 cm) et b) en fonction des profondeurs par fosse. Les moyennes significativement différentes sont indiquées par des étoiles (* : faiblement significatif ; ** : significatif ; * fortement significatif).**

Les variations des teneurs en eau volumique du sol sont différentes entre 20 et 40 cm quel que soit le profil (Tableau III.3 b). Entre 40 et 90 cm, elles ne sont pas significativement différentes pour le profil hêtre et douglas

(Tableau III.3 b). Cela est sans doute le reflet de la variation de la densité racinaire en fonction de la profondeur. La majorité des racines fines se situent dans les premiers cm du sol, engendrant alors de plus fortes fluctuations des teneurs en eau du sol sur un pas de temps journalier dans cet horizon.

III.1.5.2. Teneurs en eau volumique du sol journalières : intégration de la variabilité spatiale sur les mesures en continu

Les teneurs en eau volumique du sol journalières (Figure II.34, étape 4), sont caractérisées par leur moyenne, $\theta.m$, leur limite inférieure, $\theta.i$ et leur limite supérieure, $\theta.s$ (Section II.6.5). Elles sont obtenues à partir de régressions linéaires entre l'ensemble des mesures bimensuelles par sous-peuplement ($\theta_{15.i}$, $\theta_{15.m}$ et $\theta_{15.s}$, H ou D), exprimées en fonction de $\theta.cs615_H$ et $\theta.cs615_D$ (Figure II.34, étape 3 et Figure III.12).

Les moyennes de $\theta.cs615_H$ et de $\theta.cs615_D$ sont significativement différentes, quelle que soit la profondeur de mesure (Tableau III.4), malgré la non dépendance des données (Figure II.33). Cela reflète l'hétérogénéité des propriétés du sol entre les 3 profils de mesures. Les variations journalières de $\theta.cs615_H$ et $\theta.cs615_D$ ($\Delta\theta.cs615_H$ et $\Delta\theta.cs615_D$) sont significativement différentes uniquement à 40 cm ($Z = -2.63$; $\text{Prob.}>|Z| = 0.0085^{**}$).

	Z ou t	Prob.> Z ou t
20 cm	-2.29	0.0218**
40 cm	-3.66	0.0002***
90 cm	10.61	< 0.0001***

Tableau III.4 : Résultats des tests statistiques t (variance égales ; test de Student, lignes grises) ou Z (variances inégales ; test de Wilcoxon) et les P-values associées, entre les valeurs moyennes de teneur en eau du sol mesurées par les réflectomètres pour les sous-peuplements de hêtres ($\theta.HCS615$) et de douglas ($\theta.DCS615$) en fonction de la profondeur de mesure. Les moyennes significativement différentes sont indiquées par des étoiles (* : faiblement significatif ; ** : significatif ; *** fortement significatif).

Les valeurs de teneur en eau volumique obtenues (Figure III.13) θ_i , θ_m et θ_s sont significativement différentes entre sous-peuplement. Malgré une différence statistique, les résultats restent dans un ordre de grandeur similaire (Figures III.13 et III.14). Les différences sont le plus marquées de manière générale en 2011, à 40 et 90 cm (Annexe 4). En début de saison, on observe une tendance des teneurs en eau volumique du sol (θ_m) sous les douglas à diminuer plus rapidement que sous les hêtres (particulièrement en 2011 ; Figure III.13 et Annexe 4), puis en pleine saison de végétation, θ_{m_H} décroît plus rapidement que θ_{m_D} (particulièrement en 2011 à 40 cm ; Figure III.13 et Annexe 4).

Pour le sous-peuplement de hêtre, les différences entre θ_{m_H} et θ_{i_H} et/ou θ_{s_H} sont de 23, 22 et 34 % à 20, 40 et 90 cm de profondeur respectivement. Pour le sous-peuplement de douglas les différences sont de 23, 19 et 26 %, à 20, 40 et 90 cm de profondeur respectivement. Le traitement des données fait alors apparaître une plus grande variabilité des teneurs en eau volumique du sol pour le sous-peuplement de hêtres, particulièrement à 90 cm de profondeur. Cet horizon est cependant celui le moins bien caractérisé spatialement. Pour la limite supérieure, un écart de 34 % à la moyenne équivaut à des teneurs en eau volumique du sol comprises entre 40 et 50 % (Figure III.14).

Quel que soit le sous-peuplement et la profondeur de mesure, suite à la méthodologie appliquée (Figure II.34 et III.12), l'amplitude des teneurs en eau volumique de θ_s est supérieure à celle de θ_m , elle-même supérieure à celle de θ_i (Figure III.14). Au minimum pour θ_{i_H} et θ_{i_D} à 90 cm, quel que soit le sous peuplement, les teneurs en eau volumique du sol varient de 6 % sur l'ensemble de la période de mesure (Figure III.14). Au maximum, pour θ_{s_H} et θ_{s_D} à 40 cm, elles varient de 18 et 17 % respectivement sur l'ensemble de la période de mesure (Figure III.14).

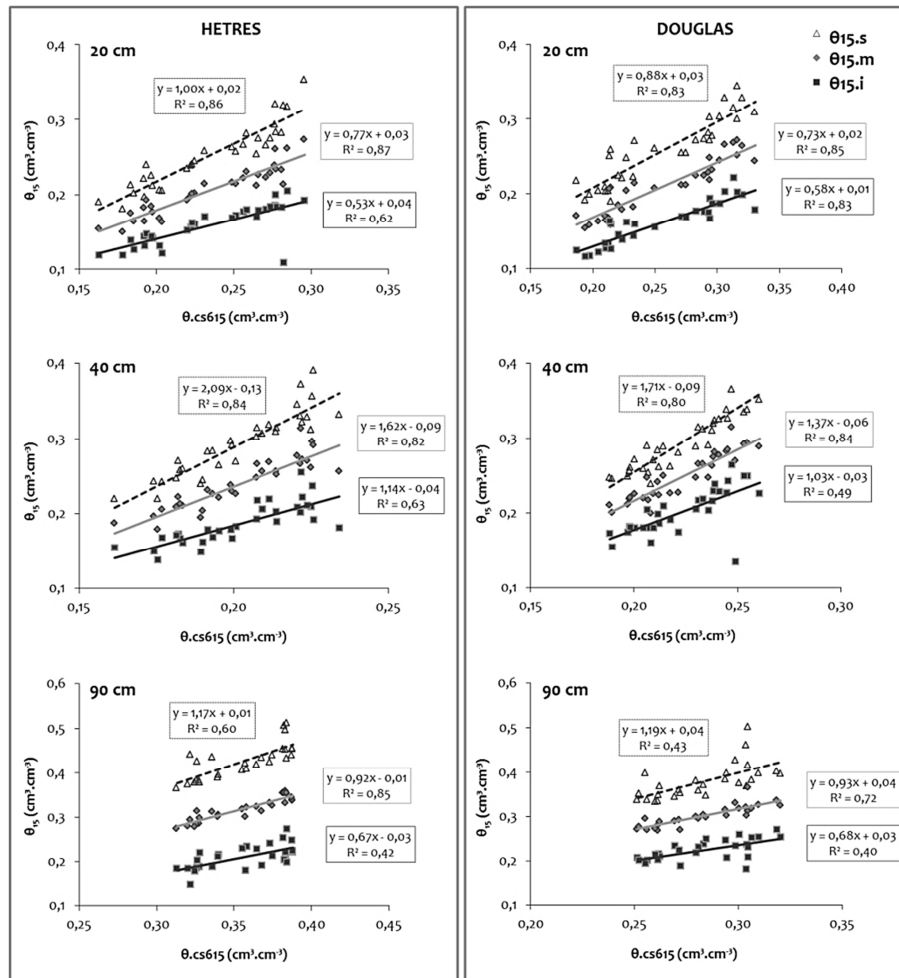


Figure III.12 : Moyennes journalières de teneur en eau du sol $\theta_{15.i}$, $\theta_{15.m}$ ou $\theta_{15.s}$ (établies tous les 15 jours en fonction de l'ensemble des mesures $\theta.cs615$ et $\theta.pr2$; Figure II.34, étape 2) en fonction des moyennes journalières $\theta.cs615$ (établies à partir des mesures de teneur en eau du sol par les réflectomètres ; Figure II.34, étape 1), pour les sous-peuplements de hêtres (H, à gauche) et de douglas (D, à droite) et par profondeur de mesure (de haut en bas : 20, 40 et 90 cm). A chaque relation correspond une régression linéaire (équation et R^2 précisés sur le graphique). Le calcul de ces régressions correspond à l'étape 3 de la Figure II.34.

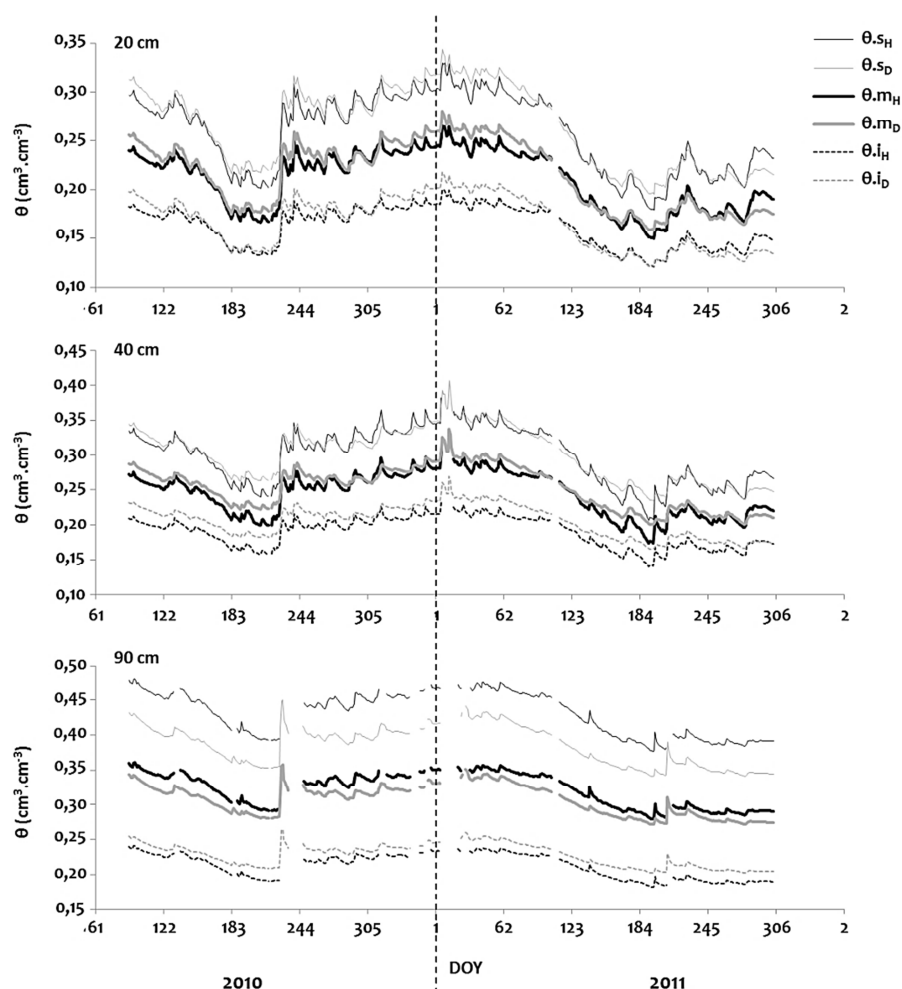


Figure III.13 : Évolution journalière, de 2010 (DOY 91) à 2011 (DOY 304), par sous-peuplement (Hêtres : H ; Douglas : D) et profondeur de mesure (20, 40 et 90 cm), des teneurs en eau volumique du sol mesurées, caractérisées par les valeurs moyennes ($\theta.m$) et les limites inférieures ($\theta.i$) et supérieures ($\theta.s$). Elles sont obtenues à partir de l'étape 4 de la Figure II.34.

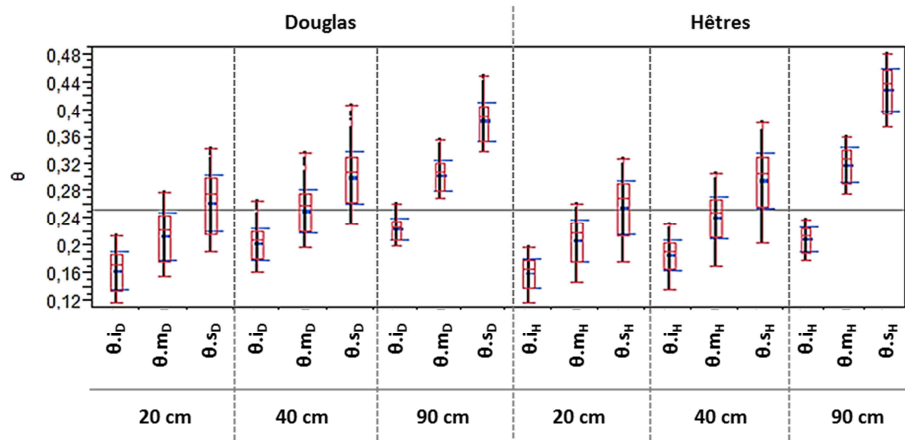


Figure III.14 : Distribution des valeurs de teneurs en eau volumique du sol journalières, pour les moyennes et les limites inférieures et supérieures, des gammes mesurées par sous-peuplements et profondeurs de mesure, de 2010 à 2011. Les traits rouges représentent la boîte à moustache de chaque distribution. Les traits bleus correspondent à la moyenne et aux écarts-types.

A Vielsalm, les coefficients de variation des mesures sont en moyenne de 42 et 43 %, à 20 et 40 cm respectivement sous le sous-peuplement de hêtres, et de 49 et 37 %, sous le sous-peuplement de douglas. A 90 cm, sur base de 4 points de mesures, les coefficients de variation sont, sous les sous-peuplements de hêtres et de douglas, respectivement de 20 et 15 %.

Certaines mesures des réflectomètres se sont avérées défectueuses lors d'importants événements pluvieux et/ou à la suite de plusieurs jours pluvieux. Le problème concerne particulièrement les sondes placées à 90 cm de profondeur et celle sous le sous-peuplement de hêtres (Fosse SWC.H). Lors de ces périodes la teneur en eau mesurée augmente, formant un pic pendant un à plusieurs jours. Ces périodes ont été éliminées. Concernant les mesures du système PR2, la présence d'eau occasionnelle au fond de certains tubes nous a conduit à éliminer des données. Comme reporté par La Spina (2011), l'eau peut provenir d'un phénomène de condensation sur la paroi des tubes, mais également de petites fissures, se formant avec le temps, au niveau des bouchons de fermeture des tubes. A la suite de

périodes pluvieuses, les tubes ont alors été régulièrement séchés afin d'éviter la présence d'eau.

III.1.5.3. Capacité au champ

Les valeurs de teneurs en eau volumique du sol à la capacité au champ sont déterminées *in situ*, à partir de θ_i , θ_m et θ_s , pour les hêtres et les douglas, à 20, 40 et 90 cm (Figure III.15 et Tableau III.6). Mis à part à 90 cm pour θ_s , les valeurs retenues de capacité au champ entre les sous-peuplements sont proches, l'écart le plus grand étant de $0.021 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (θ_i à 40 cm). A 90 cm, la représentativité spatiale des mesures est plus faible qu'à 20 et 40 cm. Lorsque les mesures de teneur en eau volumique du sol ne sont pas mesurées *in situ* en continu, la capacité au champ peut être déterminée, comme le point de flétrissement, à partir des mesures en laboratoire. La gamme de détermination du pF à la capacité au champ est par contre importante. Il est généralement admis que les valeurs de capacité au champ sont comprises entre des pF de 1.7 à 3, en fonction de la composition minéralogique et du taux d'argile.

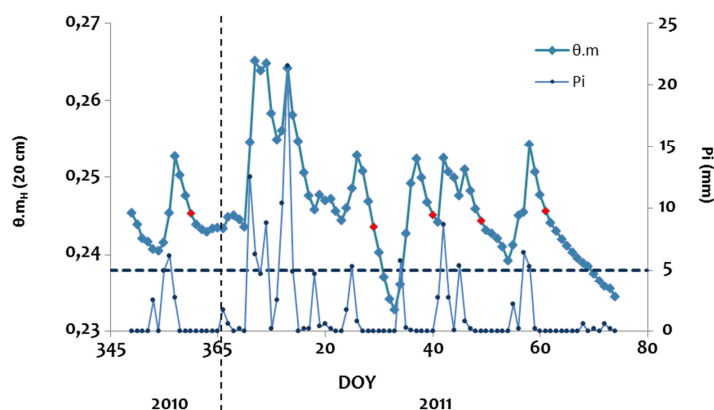


Figure III.15: Détermination de la capacité au champ (θ_{FC}) pour le sous-peuplement de hêtre, à 20 cm de profondeur, à partir de θ_{mH} . Les valeurs sont sélectionnées durant la saison hivernale 2010-2011 (DOY 349 en 2010 à 46 en 2011), 3 jours après un événement pluvieux $\geq 5 \text{ mm}$. θ_{mFC} est déterminée à partir de la moyenne de ces valeurs.

		Hêtre			Douglas		
		θ_{iH}	θ_{mH}	θ_{sH}	θ_{iD}	θ_{mD}	θ_{sD}
20 cm	$\theta_{FC} \text{ in situ}$	18.5	24.3	30.2	20.0	25.9	31.7
	pFcourbes	3.6	3.0	2.5	2.95	2.5	2.1
40 cm	$\theta_{FC} \text{ in situ}$	21.5	28.0	34.5	23.6	29.4	35.3
	pFcourbes	3.05	2.48	2.0	2.8	2.4	2.05
90 cm	$\theta_{FC} \text{ in situ}$	23.4	35.0	47.0	25.1	34.0	42.7
	pFcourbes	3.2	2.05		2.35	1.25	

Tableau III.6 : Valeurs des capacités au champ déterminées *in situ* ($\theta_{FC} \text{ in situ}$) à partir des teneurs en eau volumique du sol mesurées pour chaque sous-peuplement (hêtre et douglas), calcul de θ (θ_i , θ_m et θ_s) et profondeur de mesure (20, 40 et 90 cm). Le pF correspondant à $\theta \text{ in situ}$ (pF courbes) est déterminé sur les courbes pF optimisées (Figure III.5 et III.16) pour chaque cas de figure, dans la mesure du possible.

Les mesures *in situ* de capacité au champ ont été reportées sur les courbes pF obtenues en laboratoire (Figure III.16). Les résultats sont variables en fonction du sous-peuplement et de la profondeur de mesure (Figure III.16 et Tableau III.6).

Au regard des valeurs moyennes, les résultats à **20 et 40 cm** amènent à considérer environ un $pF = 2.5$ pour la valeur de capacité au champ, sauf à 20 cm pour le sous-peuplement de hêtres ($pF = 3.0$). Les gammes de valeurs de capacité au champ, en fonction de θ_i , θ_m et θ_s sont comprises entre $pF = 2$ et $pF = 3$, sauf à 20 cm pour les hêtres ($pF = 2.5$ à 3.6).

A 90 cm, la comparaison des 2 méthodes d'évaluation de la capacité au champ n'est pas concluante. Sous les hêtres, pour le scénario moyen de θ , la valeur de pF correspondante à la teneur en eau mesurée *in situ* est réaliste (2.05), comprise dans la gamme généralement admise. Ce n'est pas le cas par contre du sous-peuplement de douglas, pour lequel la correspondance entre les 2 méthodes indique un $pF = 1.25$ pour la capacité au champ. Pour les scénarios supérieurs de θ , quel que soit le sous-peuplement, les capacités au champ mesurées *in situ* sont supérieures aux teneurs en eau volumique mesurées en laboratoire à saturation, venant confirmer la mauvaise correspondance entre les 2 méthodes (Figure III.16).

Chapitre III

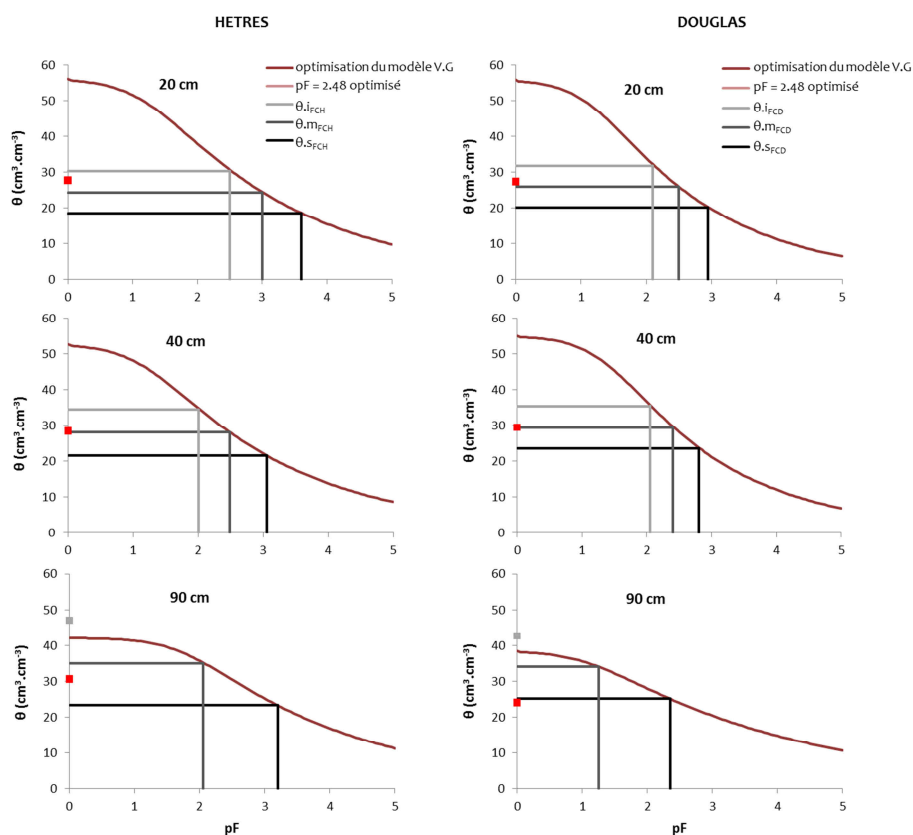


Figure III.16 : Détermination du pF correspondant sur les courbes pF optimisées (optimisation du modèle VG ; Section III.1.3.2) aux valeurs de capacité au champ mesurées *in situ* en fonction de $\theta.i$, $\theta.m$ et $\theta.s$, pour les sous-peuplements de hêtre ($\theta.i_{FCH}$, $\theta.m_{FCH}$ et $\theta.s_{FCH}$) et de douglas ($\theta.i_{FCD}$, $\theta.m_{FCD}$ et $\theta.s_{FCD}$), par profondeur de mesure (20, 40 et 90 cm). La valeur de θ pour un $pF = 2.48$ déterminée en laboratoire ($pF = 2.48$ optimisé) est indiquée par un carré rouge. A 90 cm, quel que soit le sous-peuplement, les valeurs mesurées *in situ* de capacité au champ pour les limites supérieures sont hors des gammes des courbes pF. Ces valeurs sont indiquées sur l'axe des ordonnées par un carré gris clair.

La représentativité spatiale des 2 méthodes est différente. *In situ*, à 20 et 40 cm, on compte généralement de 17 à 20 points de mesures par sous-peuplement. Ces points de mesures sont généralement espacés d'une quinzaine de mètres (sauf les points de mesures PR2 proches des réflectomètres CS615). Les coefficients de variations sont élevés. Concernant les mesures en laboratoire, par fosse entre échantillons de même

profondeur (au nombre de 4), de 0 à 50 cm de profondeur et de $pF = 0$ à $pF = 3$, les coefficients de variation calculés sont faibles. Ces points de mesures sont espacés seulement d'une vingtaine de cm (soit environ 1 m entre les points de mesures les plus éloignés sur un même horizon). Les coefficients de variation sont en moyenne de 6 % sous le sous-peuplement de hêtre et de 9 % sous le sous-peuplement de douglas.

A 90 cm, le nombre de points de mesures *in situ* est le même que le nombre de prélèvements pour le laboratoire. Cependant plusieurs mètres séparent les mesures sur le terrain, alors que les prélèvements pour le laboratoire ont été prélevés au sein d'une même fosse. *In situ*, à 90 cm, les coefficients de variation sont, sous les sous-peuplements de hêtres et de douglas respectivement de 20 et 15 %. En laboratoire, à 90 cm de $pF = 0$ à $pF = 3$, les coefficients de variation calculés sont en moyenne de 12 et 8 % pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas respectivement.

La différence de méthodologie et de représentativité spatiale, peuvent expliquer, en particulier à 90 cm, la forte variabilité et/ou la mauvaise correspondance entre les capacités au champ déterminées *in situ*, et celles déterminées en laboratoire dans la gamme de pF généralement admise.

Les sondes réflectomètres CS615 ont une précision de ± 3 %. La calibration spécifique pour un sol est recommandée lors de la présence de forte teneur en argile (> 30 %) et/ou de matière organique et/ou d'une forte conductivité électrique du sol ($> 5 \text{ dS.m}^{-1}$). Les sondes ont été placées sans calibration spécifique sur le site de Vielsalm. Pour la sonde PR2 le constructeur spécifie une gamme de mesure de 0.0 à $0.4 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ avec une précision de $\pm 0.04 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Comme pour les sondes réflectomètres la calibration originale est recommandée, sauf lors de conditions particulières. **A 90 cm, la marge de précision des sondes, n'explique pas les écarts observés entre les mesures *in situ* et celles en laboratoire, écarts dépendants alors surement de la variabilité spatiale sur le site et d'un échantillonnage trop restreint.** Concernant les sondes réflectomètres CS615, la précision de la mesure est également dépendante de la température du sol. Les constructeurs reportent cependant qu'une correction de la teneur en eau du sol en fonction de la température du sol, amène au maximum à

une différence de 1.6 %, et n'est pas nécessaire dans la plupart des cas. Nous n'avons pas apporté de correction sur les données en fonction de la température.

Par la méthode développée dans cette étude, étant donné les distances qui séparent les points de mesures, et la variabilité mesurée, il semble qu'il soit difficile de conseiller par horizon et/ou par sous-peuplement, une valeur de pF correspondante à la capacité au champ mesurée *in situ*. Cette dernière restant en théorie la plus précise, **nous conservons** quelle que soit la profondeur de mesure, **les valeurs de capacités au champ déterminées *in situ*** à partir des mesures de teneurs en eau volumiques du sol.

III.2. Réserves utiles du sol (RU), en eau disponible (R_t) et relatives (REW), mesurées et modélisées

III.2.1. Réserves utiles du sol (RU)

Les RU par sous-peuplement sont établies selon l'Equation I.9, à partir des caractéristiques suivantes de chaque horizon :

- la teneur en eau volumique au point de flétrissement permanent (θ_{WP}), déterminée à partir des courbes optimisées de teneurs en eau volumique du sol pour un pF = 4.2 ;
- les valeurs des teneurs en eau volumique à la capacité au champ, déterminées *in situ* ;
- l'épaisseur;
- la charge caillouteuse.

A partir des mesures *in situ* de capacité au champ et une profondeur de sol de 1.30 m, les réserves utiles $RU.m_H$ et $RU.m_D$ sont respectivement de 203 et 221 mm (Tableau III.7). $RU.i_H$ et $RU.s_H$ ont en moyenne ± 53 % de différence avec $RU.m_H$ (Tableau III.7). $RU.i_D$ et $RU.s_D$ ont en moyenne ± 39.5 % de différence avec $RU.m_D$ (Tableau III.7). C'est la

variabilité légèrement plus importante des mesures de teneurs en eau sous le sous-peuplement de hêtres qui nous conduit à ces résultats. Les calculs moyens de RU obtenus correspondent à de fortes réserves utiles de sol (Granier et al., 1995). Le sol pour les hêtres, selon RU.i peut par contre être classé comme un sol à faible réserve utile, présentant alors un risque lors d'années sèches (Manise et Vincke, 2012).

	Hêtres		Douglas	
	RU _H (mm)	% de RU.m _H	RU _D (mm)	% de RU.m _D
RU.i _H ou _D	98	48	133	60
RU.m _H ou _D	203	100	221	100
RU.s _H ou _D	312	154	307	139

Tableau III.7 : Valeurs moyennes (et leurs intervalles de confiance inférieur et supérieur) des réserves en eau utiles pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas. La valeur en mm de la RU pour les limites de l'intervalle de confiance est également exprimée en % de la valeur moyenne (% de RU.m).

Les résultats présentés jusqu'à présent au sein du Chapitre III ont révélé peu de différences entre les 2 sous-peuplements, que cela soit pour les mesures de teneurs en eau volumique du sol ou la charge caillouteuse. La différence entre les 2 sous-peuplements est alors due au fait que les valeurs de teneurs en eau volumique au point de flétrissement déterminées en laboratoire sont légèrement plus élevées pour les hêtres (Section III.1.3) et celles à la capacité au champ légèrement plus élevées pour les douglas (Section III.1.5.3).

À partir des **capacités au champ obtenues en laboratoire pour des suctions à $pF = 2.48$** et d'une profondeur potentielle de sol de 1.30 m, les réserves utiles du sol des hêtres et des douglas sont respectivement évaluées à 190 et 180 mm (soit environ -6 et -19 % de RU.m_H et RU.m_D). Nous obtenons donc des différences selon la méthode (*in situ* ou en laboratoire), en particulier sous le sous-peuplement de douglas, mais en restant cependant dans des gammes de RU importantes.

Etant donné la variabilité spatiale des teneurs en eau sur le site, la prise en compte d'un, ou de plusieurs points de mesure *in situ* des teneurs en eau du sol, peut également faire varier considérablement les estimations de

RU (Annexe 5). Une mauvaise évaluation de la charge caillouteuse peut également amener à des erreurs significatives dans le calcul de la RU. Nous avons testé plusieurs scénarios afin d'évaluer les conséquences d'une estimation erronée. Les conséquences sont relativement faibles.

III.2.2. Les réserves en eau disponible (R_t) et les réserves en eau relatives (REW)

La R_t par sous-peuplement (Figure III.17) est calculée selon l'Equation I.10, à partir des caractéristiques suivantes de chaque horizon :

- sa teneur en eau volumique au point de flétrissement permanent (θ_{WP}), déterminée à partir des courbes optimisées de teneurs en eau volumique du sol pour un $pF = 4.2$;
- la teneur en eau volumique du sol, déterminée *in situ* (Figure III.13) ;
- son épaisseur ;
- sa charge caillouteuse.

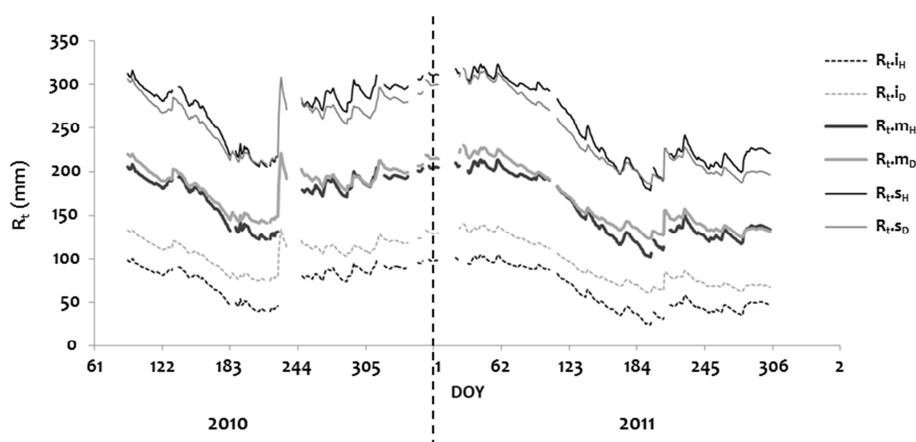


Figure III.17 : Suivi journalier de la réserve en eau disponible du sol R_t (mm), de 2010 (DOY 91) à 2011 (DOY 304), calculées en fonction des moyennes (m) et des limites inférieures (i) et supérieures (s) des teneurs en eau volumique du sol, par sous-peuplement, hêtre (H) et douglas (D).

En période de vidange du sol, la R_t a tendance à diminuer plus fortement dans le sous-peuplement de hêtres (Figure III.17 DOY 135 à 235 et 100 à 200 environ). Les vidanges journalières (en mm) du sous-peuplement

de hêtres, $\Delta R_t.m_H$, sont en moyenne supérieures à celles du sous-peuplement de douglas $\Delta R_t.m_D$ d'environ 18 % (Figure III.18). De plus, durant ces périodes, les recharges du sol journalières mesurées sont plus importantes également pour le sous-peuplement de hêtres (données non montrées). Ces résultats sont en accord avec ceux sur les flux d'interception : les douglas interceptent davantage de précipitations que les hêtres, réduisant alors l'eau arrivant au sol. Cependant, les recharges du sol et la pluviométrie incidente étant souvent différées de quelques heures, cela rend difficile l'analyse des résultats à l'échelle journalière. Par ailleurs, les recharges mesurées sont le bilan de l'eau arrivant au sol, du drainage et de l'évapotranspiration. Il est alors difficile de mettre directement en relation une variation positive de R_t mesurée journalièrement, avec la pluviométrie incidente.

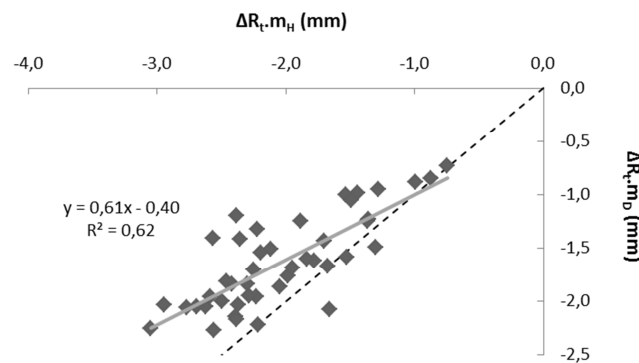


Figure III.18 : Variations journalières (mm), de la réserve en eau disponible du sol, du sous-peuplement de douglas ($\Delta R_t.m_D$) en fonction de celles du sous-peuplement de hêtres ($\Delta R_t.m_H$), durant 2010 et 2011 (DOY 500 à 600 et 830 à 930). Les moyennes des réserves en eau disponible, calculées par sous-peuplement, sont utilisées ici ($R_t.m_H$ ou D) Les données sont sélectionnées les jours sans pluie, 2 jours suivant le dernier jour pluvieux.

En relatif, selon le calcul de R_t et le sous-peuplement, la REW peut ou non présenter des périodes potentiellement stressantes pour la végétation (en dessous du seuil de 40 % de REW ; Figure III.19). L'évaluation de ces périodes potentiellement stressantes est importante afin de comprendre le fonctionnement hydrique des espèces ligneuses.

En 2010, pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas, les REW moyennes (REW.m) atteignent au minimum, respectivement 0.6 et 0.64. Les REW oscillent autour de cette valeur sur une courte durée, de fin juillet à début août. En 2010, aucune période n'est donc considérée comme stressante d'un point de vue édaphique. Nous remarquons Figure III.19, la forte recharge en eau au mois d'août 2010 (DOY 227, $P_i = 60$ mm), mois pour lequel la pluviométrie incidente a été exceptionnellement forte.

En comparaison à REW.m_H, REW.i_H a une valeur de -33 % et REW.s_H de +9 %. Pour le douglas, en comparaison au calcul moyen, le calcul inférieur de REW à une valeur de -12 % et le supérieur de +6 %.

En 2011, pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas, les REW moyennes (REW.m) atteignent au minimum, respectivement 0.5 et 0.56. Ces valeurs sont atteintes aux environs de mi-juillet. Comme 2010, en moyenne en 2011, aucune période n'est donc considérée comme stressante d'un point édaphique pour les hêtres ou les douglas.

En comparaison à REW.m_H, REW.i_H atteint une valeur minimale de 0.25 (-50 %) et REW.s_H de 0.57 (+9 %). Pour REW.i_H, les périodes avec une REW inférieure à 0.4 débutent dès mi-juin (DOY 165), et jusqu'à fin juillet (DOY 208), soit 44 jours. En comparaison à REW.m_D, REW.i_D atteint une valeur minimale de 0.46 (-18 %) et REW.s_D de 0.61 (+8 %).

La majorité des racines fines se situant dans les premières dizaines de cm de sol, une estimation précise de la R_t par horizon peut être utile pour une meilleure interprétation des résultats. Cela particulièrement lors de conditions hydriques édaphiques limitantes, amenant à d'éventuelles réallocations de carbone vers les racines, ou à des réallocations d'eau des horizons les plus profonds vers les horizons de surface via le système racinaire. Dans ces cas, le dispositif de Schwärzel et al. (2009) semble le mieux adapté, avec des mesures de teneurs en eau du sol selon une grille de 30 * 30 cm, sur un transect de 2 à 3 m de long et en fonction de la profondeur de sol totale.

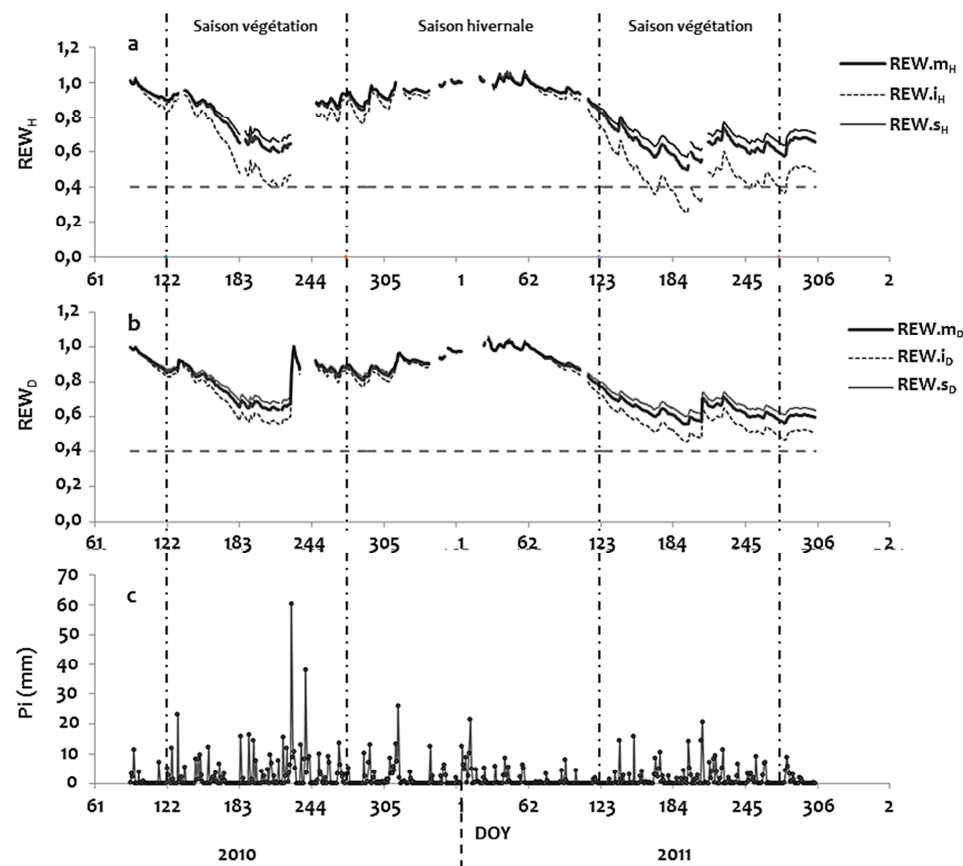


Figure III.19: Suivi journalier des moyennes (m) et des limites inférieures (i) et supérieures (s) des réserves en eau relatives du sol (REW), calculées de 2010 (DOY 91) à 2011 (DOY 304), pour a) le sous-peuplement de hêtres ($REW.i_H$, $REW.m_H$ et $REW.s_H$), et b) le sous-peuplement de douglas ($REW.i_D$, $REW.m_D$ et $REW.s_D$). En c), la pluviométrie incidente est représentée sur l'ensemble de la période de mesure. Les traits verticaux pointillés indiquent le début et la fin des saisons de végétation et de la saison hivernale. En a) et b) le trait discontinu horizontal représente la valeur de REW égale à 0.4.

III.2.3. Modélisation de la réserve en eau disponible du sol ($B.R_t$) avec le modèle BILJOU©

Les résultats présentés dans cette section ont été obtenus, pour chaque sous-peuplement (type feuillus ou résineux dans BILJOU©), à partir des jeux de paramètres présentés Tableau II.14 (Section II.7.4.2).

La comparaison des réserves en eau du sol mesurées (R_t) et modélisées ($B.R_t$), n'est pas complètement satisfaisante (Figure III.20). Toutefois, les coefficients de corrélations entre mesures et modèles sont bons, indiquant une dynamique similaire. Pour les 2 sous-peuplements, les coefficients de corrélation entre $R_{t.m}$ et $B.R_{t.m}$ sont de 0.9. Par contre, des écarts au niveau de la R_t mesurée et modélisée, quels que soit l'année ou le sous-peuplement, sont constatés (Figures III.20 et III.21).

Ces écarts au niveau de R_t apparaissent suite à des recharges et des vidanges en eau du sol mesurées et modélisées différentes. En période de végétation la décharge du sol est principalement fonction des flux transpiratoires. La recharge quant à elle dépend du taux d'interception de la pluviométrie incidente et du drainage. Cela reste difficile à généraliser mais quelle que soit l'espèce, on constate que pour des pluies supérieures à 5 mm, BILJOU© tend à modéliser une recharge en eau du sol supérieure à celle mesurée (Figure III.21). Pour les périodes à pluviométrie faible ou nulle, les résultats varient en fonction de l'espèce et/ou de l'année, mais les vidanges du sol modélisées correspondent bien dans l'ensemble à celles mesurées. En 2011, les écarts en période de vidange s'accroissent légèrement entre les DOY 150 et 200 environ (Figure III.21). Les problèmes de décharge du sol hors périodes pluvieuses seront abordés au travers des chapitres sur les flux transpiratoires des espèces (Chapitre IV) et sur l'évapotranspiration réelle (Chapitre V). Les problèmes de recharge, semblent être la source la plus importante d'erreur. La quantité d'eau modélisée arrivant au sol est alors soit trop élevée (flux d'interception trop faibles) et/ou le drainage modélisé est trop faible. Concernant les mesures, la variabilité temporelle étant caractérisée à partir des réflectomètres, soit 3 profils répartis sous les

peuplements, il est également envisageable que les capteurs se trouvent au niveau de zones à écoulements préférentiels et/ou en dessous d'une zone à forte interception, réduisant alors l'eau arrivant au sol.

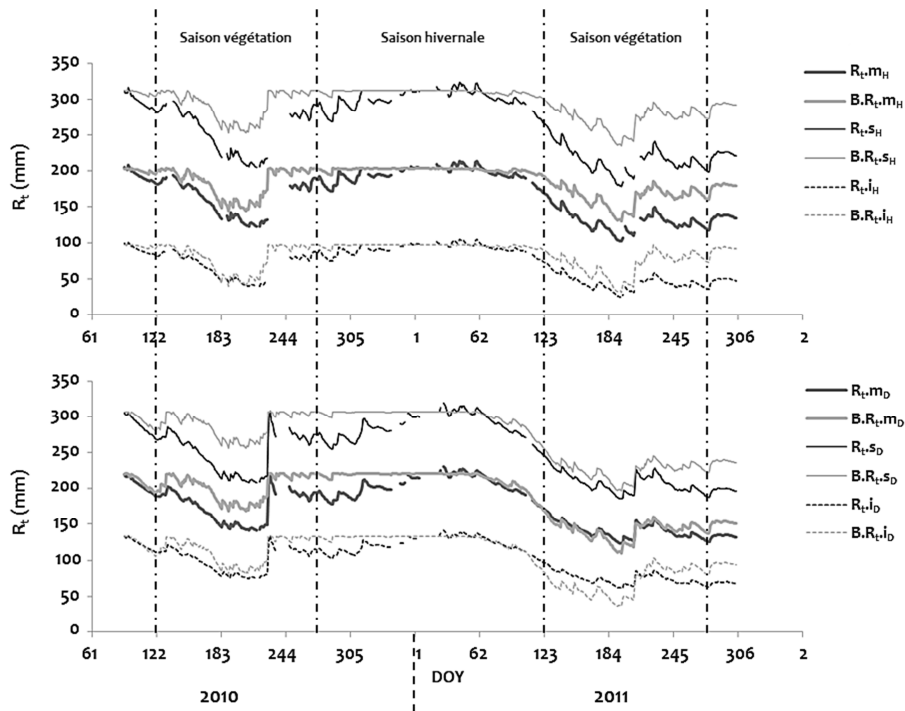


Figure III.20 : Évolutions journalières de R_t (mm), mesurées *in situ* (R_t) et modélisées par BILJOU® ($B.R_t$), représentées par la moyenne (m) et les limites inférieures (i) et supérieures (s), par sous-peuplement, hêtres (H ; en haut) et douglas (D ; en bas), de 2010 (DOY 91) à 2011 (DOY 304).

Concernant les flux d'interception, leur taux varie en fonction de l'intensité et de la durée de l'évènement pluvieux. Plus l'évènement pluvieux sera important, plus les flux d'interception seront faibles. Il semble alors peu probable que le problème de recharge du sol, rencontré particulièrement lors d'évènements pluvieux conséquents, provienne d'une modélisation trop faible de l'interception. C'est alors au niveau de l'eau drainée que les mesures et le modèle diffèrent le plus. Il est difficile d'envisager d'apporter une correction systématique au drainage modélisé, car la variabilité de la mesure de la recharge en fonction de la pluviométrie incidente est forte (Figure III.21).

Chapitre III

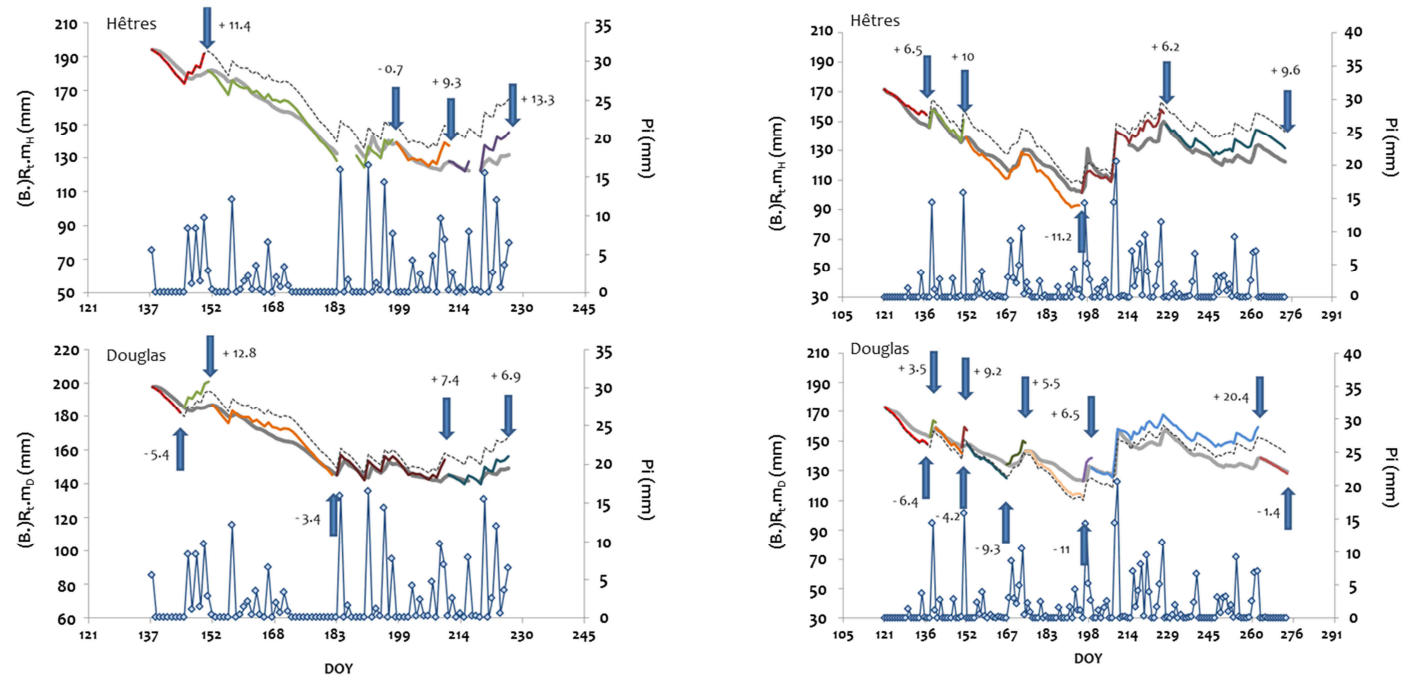


Figure III.21 : Evolution de la réserve en eau du sol moyenne mesurée ($R_{t,m}$; trait gris épais) et modélisée ($B.R_{t,m}$, trait gris en pointillés) mise à niveau de $R_{t,m}$ au DOY 137 en 2010 (à gauche, DOY 137 à 226) et au DOY 121 en 2011 (à droite, DOY 121 à 273), pour les hêtres (H, en haut) et les douglas (D, en bas). Les courbes de couleurs représentent $B.R_{t,m}$, qui à chaque changement de couleur, également indiqué par des flèches, est remise au niveau de la $R_{t,m}$ mesurée. Les différences en mm, entre $B.R_{t,m}$ et $R_{t,m}$, sont indiquées à chaque remise à niveau, à côté des flèches.

Les REW moyennes modélisées (B.REW.m), comme les mesurées, ne chutent pas en dessous du seuil de 0.4, quelle que soit l'année, ou le sous-peuplement (Figure III.22). Le modèle n'induit alors pas de régulation de la transpiration des espèces. En 2011, pour la modélisation à partir du calcul inférieur de réserve utile (RU.i), la REW du sous-peuplement de douglas se situe en dessous de 0.4 durant 45 jours. La limite inférieure de R_t évaluée par les mesures ($R_{t.i_D}$), n'est par contre pas jugée limitante vis-à-vis de l'alimentation hydrique pour les arbres. Dans ce cas-là, la différence entre mesure et modèle, se forme principalement à cause d'une modélisation de l'ETR supérieure aux valeurs mesurées, provoquant une vidange du sol plus conséquente durant la saison de végétation 2011.

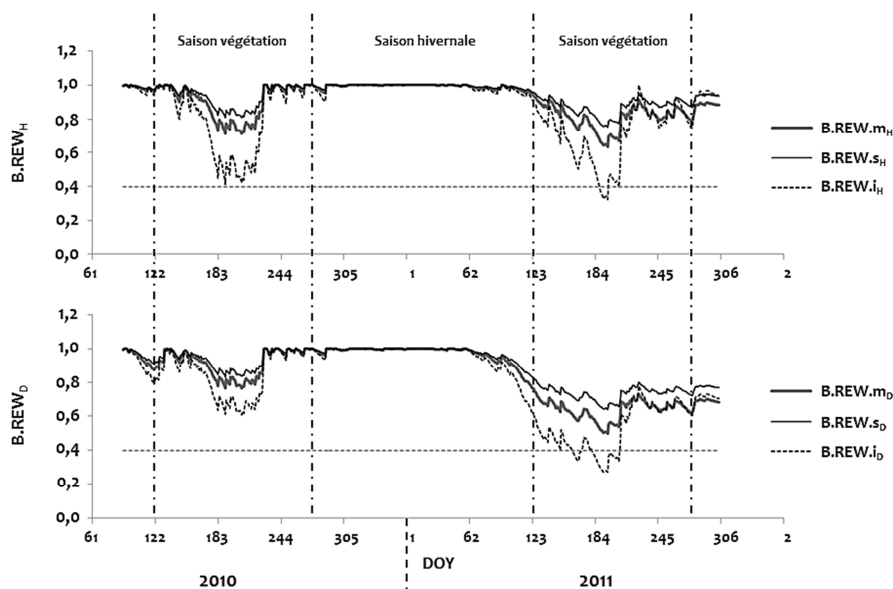


Figure III.22 : Évolutions journalières des réserves en eau relatives (REW) modélisées par BILJOU© en fonction des calculs de réserve en eau utile du sol, inférieur (B.REW.i), moyen (B.REW.m) et supérieur (B.REW.s), de 2010 (DOY 91) à 2011 (DOY 304), pour les sous-peuplements de hêtres (B.REW_H ; en haut) et de douglas (B.REW_D ; en bas). Le trait discontinu horizontal sur chaque graphe représente la valeur de REW égale à 0.4.

Qu'en est-il alors de la modélisation de R_t de manière rétrospective depuis 1998 ? Si la recharge du sol modélisée est trop importante risque-t-on de sous évaluer la présence de périodes de stress hydriques ?

Afin de tester l'effet de la recharge du sol sur la modélisation des périodes de stress depuis 1998, à partir de la simulation de BILJOU© moyenne pour les hêtres ($B.R_t.m_H$), les recharges du sol ont été modifiées, en fixant arbitrairement la quantité d'eau drainée à la moitié de la pluie incidente arrivant au sol ($1/2 P_s$) (Figure III.23 et III.24). Si seulement la moitié de l'eau arrivant au sol est conservée, les minimums saisonniers atteints sont globalement plus faibles que pour $B.R_t.m_H$, mais cependant non critiques (mis à part pour 1999 et 2003 ; Figure III.23 a). La comparaison avec les mesures en 2010 et 2011 montre que ce scénario surestime globalement le drainage, le sol en période de végétation conservant généralement davantage d'eau que la moitié de P_s (Figure III.23 b).

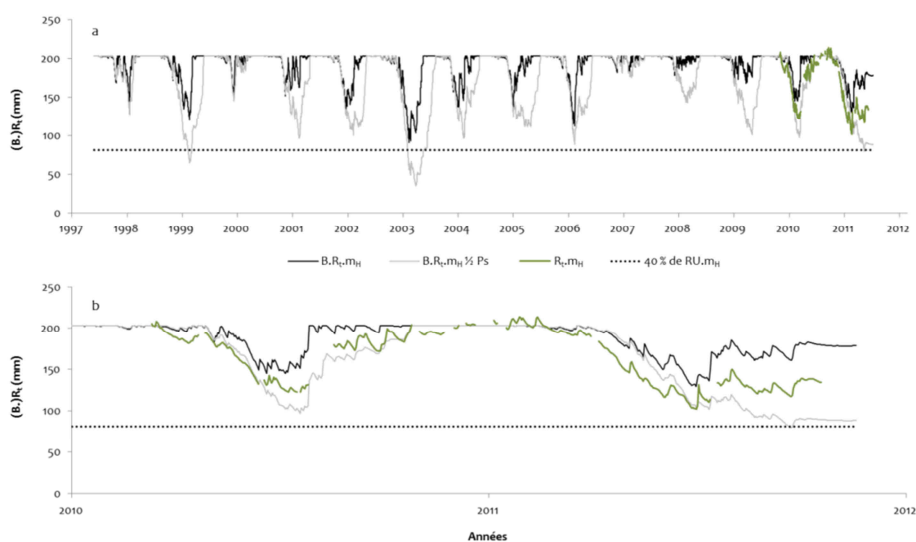


Figure III.23 : R_t moyenne (mm) du sous-peuplement de hêtres, modélisée ($B.R_t.m_H$), modélisée en fixant la quantité d'eau drainée à la moitié de la pluviométrie incidente atteignant le sol ($B.R_t.m_H \frac{1}{2} P_s$) et mesurée ($R_t.m_H$), a) de 1998 à 2011 b) de 2010 à 2011 (agrandissement du a). Le seuil de 40 % de la réserve en eau utile moyenne du sous-peuplement de hêtres ($RU.m_H$; 204 mm au total) est indiqué.

Etant donné la forte réserve utile du site, et la durée de période de végétation, les conditions climatiques doivent être particulièrement chaudes et sèches, sur de longues périodes, comme en 2003, afin que R_t devienne critique pour le fonctionnement des arbres.

Les conséquences de la prise en compte d'un drainage fixé simplement à la moitié de P_s , sont exposées pour 2003 (Figure III.24). La sortie du modèle originale ($B.R_t.m_H$), n'atteint pas le seuil critique de RU. Lorsque l'on force le drainage du sol à $1/2$ de la pluviométrie arrivant au sol, l'indice de stress modélisés (is) est de 32.5. Cependant, ce scénario-là semble sous-estimer la recharge du sol vis-à-vis des mesures en 2010 et 2011 (Figure III.23 b). Si on prend en compte le calcul de RU inférieur, alors l'indice de stress modélisé à partir de $B.R_t.i_H$ est égal à 15.5 (Figure III.24). Le scénario inférieur nous permet donc également de prendre en compte un stress hydrique cette année-là, cependant l'évolution de $B.R_t.i_H$ (ou $B.REW.i_H$) est différente de celle de $B.R_t.m_H$ $1/2$ P_s (Figure III.24).

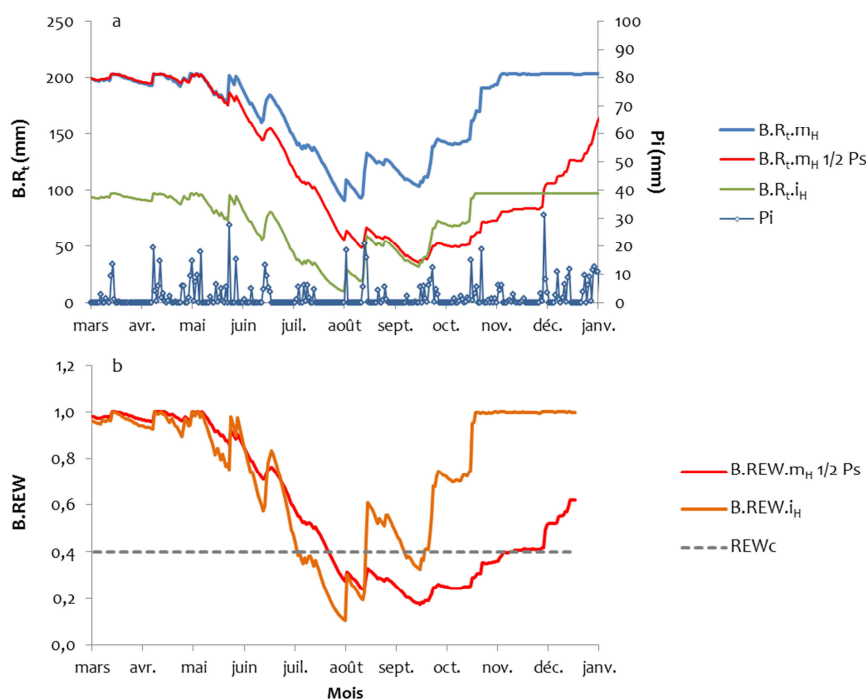


Figure III.24 : Evolution de mars 2003 à janvier 2004, en a) de la R_t du sous-peuplement de hêtres, modélisée par BILJOU© pour le calcul moyen de RU ($B.R_t.m_H$) et inférieur ($B.R_t.i_H$) et de la pluviométrie incidente (P_i) ; $B.R_t.m_H$ est modifié en périodes de précipitation en fixant la quantité d'eau drainée à la moitié de la pluie arrivant au sol ($B.R_t.m_H$ $1/2$ P_s). En b) de la REW modélisée par BILJOU© modifiée pour le calcul moyen de RU ($B.REW.m_H$ $1/2$ P_s), et modélisée par BILJOU© sans modification pour le calcul inférieur de RU ($B.REW.i_H$). La REW critique (REW_c) correspond à 40 % de la RU.

Le drainage modélisé par BILJOU© dans cette étude ne reflète donc pas systématiquement bien les recharges du sol mesurées, mais dans l'ensemble les R_t mesurées et modélisées ont une évolution similaire. De plus, une amélioration est envisageable à partir d'une version de BILJOU© davantage paramétrable. En effet, dans la version utilisée ici, les coefficients décrivant les variations de macroporosité du sol, ont été fixés pour un sol standard. En déterminant ces coefficients pour le site de Vielsalm, le drainage peut être modifié de façon importante.

Il semble peu probable, sur base de l'ensemble des résultats, que depuis 1998 les risques de stress hydriques aient été sous-estimés pour les peuplements. La modélisation des flux, à partir des valeurs de RU inférieures, peut servir d'indicateur d'années à risques. Pour ces années, il est alors intéressant d'estimer à partir des calculs de RU moyens, les erreurs potentielles dues à une recharge du sol modélisée trop importante lors d'évènements pluvieux conséquents.

EN CONCLUSION

- Une profondeur de sol peu variable, estimée à 130 cm pour les calculs de réserve en eau du sol sur la Parcelle témoin ;
- Une profondeur racinaire maximale observée de 130 cm pour les hêtres et de 80 cm pour les douglas ;
- Une charge caillouteuse de 1, 2 et 15 % pour les tranches de sol de [0 ; 20[, [20 ; 60[et [60 ; 130[cm, pour les hêtres et les douglas ;
- Peu de différences entre les teneurs en eau volumique du sol mesurées sous les hêtres et les douglas, mais une forte variabilité à l'échelle de la Parcelle témoin ;
- Une RU moyenne (RU.m) de 203 et 221 mm pour les hêtres et les douglas respectivement ;
- Peu ou pas d'épisodes de stress hydriques conséquents mesurés en 2010-2011, quel que soit le calcul de R_t et le sous-peuplement envisagé ;
- Le drainage mériterait une meilleure estimation mais cela semble induire peu de risque d'une sous-estimation conséquente des stress hydriques annuels modélisés.

IV. TRANSPIRATION DES ESPECES LIGNEUSES ET VARIABLES ASSOCIEES

Nous avons regroupé dans ce chapitre les résultats sur i) les surfaces d'aubier, ii) les indices de surface foliaire et iii) les accroissements journaliers en circonférence, permettant ensemble, *in fine*, l'analyse des flux transpiratoires iv) mesurés (2010-2011) et v) modélisés (1998-2011), en fonction des conditions environnementales (variables climatiques et ETP présentées en Annexe 6) et des paramètres biologiques des espèces.

IV.1. Surface d'aubier et surface foliaire

IV.1.1. Surface d'aubier

La régression entre le rayon d'aubier et la circonférence (sur écorce), est obtenue pour le douglas à partir du carottage de huit individus (Figure IV.1). La relation est très satisfaisante avec 92 % de la variabilité expliquée par le modèle. Le rayon d'aubier représente de 18 à 25 % du rayon total, résultats similaires à ceux de Čermák et al. (2007).

Cet échantillonnage a été complété en 2012 lors du relevé de carottes pour le volet dendrochronologique de l'étude. L'augmentation de l'échantillon modifie légèrement la pente de la relation et le R^2 associé (résultats non présentés ici). Cependant dans les classes de circonférences prédominantes, les rayons d'aubier prédits par les différentes relations sont très proches. Etant donné que la majorité des calculs avaient été réalisés sur la base du premier échantillonnage (Figure IV.1), nous n'avons pas apporté de modifications suite aux carottages effectués en 2012.

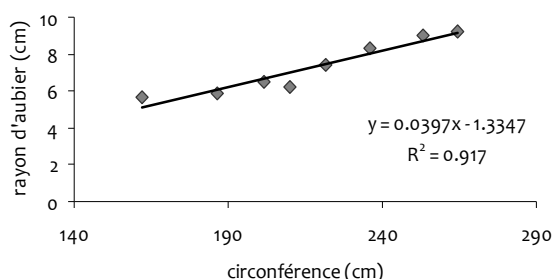


Figure IV.1: Rayon d'aubier mesuré à partir de prélèvements de carottes en fonction de la circonférence sur écorce mesurée à 1m30 au mètre ruban, pour 8 douglas. L'équation et le R^2 de la régression linéaire entre les 2 variables sont indiqués.

IV.1.2. Surface foliaire

Les différentes méthodes d'évaluation du LAI fournissent des informations complémentaires. La méthode semi-directe des bacs à litière est uniquement valable pour les hêtres. Elle fournit une évaluation annuelle du LAI_{max} . Elle est en théorie la plus précise des 3 méthodes. De par sa précision elle est généralement utilisée afin de calibrer les méthodes indirectes, telles que les capteurs PAR, nécessitant la détermination du coefficient d'extinction de la lumière (k), au-travers de la canopée (Bréda, 2003). La détermination du LAI à partir des capteurs PAR est fortement dépendante de la valeur de k sélectionnée. Les capteurs PAR, dont les mesures sont récoltées toutes les 30 min, permettent une analyse précise de l'évolution temporelle du LAI. Enfin le LAI2200, méthode indirecte également, permet une analyse de l'hétérogénéité spatiale du LAI, sur l'ensemble du site. Au travers de ce paragraphe, les 3 méthodes sont tout d'abord comparées, afin de tester la cohérence des résultats et de calibrer la valeur de k pour la détermination du LAI avec les capteurs PAR. Les années sont ensuite comparées en fonction du sous-peuplement, vis-à-vis du maximum atteint et de la date de débourrement et de la chute des feuilles pour les hêtres. Les résultats sont finalement analysés sous forme de moyennes saisonnières et/ou annuelles pour les résineux.

Comparaisons des méthodes pour les hêtres et les douglas, en 2010-2011

En 2010, la valeur mesurée pour les hêtres à partir des bacs à litières est de 3.8. En 2009 le LAI mesuré est similaire (3.9). Pour 2011, le Specific Leaf Area mesuré (SLA , $m^2.g^{-1}$) présente une valeur inférieure de 36 % par rapport à 2009 et 2010 (Tableau IV.1). Cette valeur particulièrement faible (Bréda, 2003) n'est pas utilisée. Le LAI_{max} est alors déterminé pour 2011 à partir du SLA moyen entre 2009 et 2010 (Tableau IV.1). On obtient une valeur de LAI_{max} de 3.2, plus faible que les années précédentes.

	surface (cm ²) / poids feuilles (g)
2009	195
2010	201
2011	127
Moyenne 2009-2010	199

Tableau IV.1 : SLA (Specific Leaf Area) du sous-peuplement de hêtres de 2009 à 2011, obtenus à partir des mesures de bacs à litières.

En 2010, le LAI_{max} déterminé à partir des capteurs PAR, pour $k = 0.6$, équivaut à +33 % du LAI_{max} des bacs à litières alors que pour $k = 0.8$ il est identique (Figure IV.2). En 2011, les LAI_{max} des capteurs PAR équivalent à +25 et -6 % de la valeurs des bacs à litière, pour $k = 0.6$ et 0.8 respectivement (Figure IV.2). La calibration de la valeur de k pour le sous-peuplement de hêtres vis-à-vis de la méthode des bacs à litière se rapproche alors davantage de 0.8. Par contre, pour une valeur de 0.6 la correspondance en 2010-2011 des mesures PAR et au LAI_{2200} est très bonne, avec moins de 5 % de différence en moyenne des mois de juin à septembre. Le même constat est fait pour le sous-peuplement de douglas en 2010. En 2011 pour les douglas, les résultats sont mitigés, avec des mesures au LAI_{2200} correspondant le mieux jusqu'au mois de mai à une valeur de k égale à 0.8, puis de juin à octobre à une valeur de k égale à 0.6 (Figure IV.2).

La valeur de 0.8 a été utilisée dans Aubinet et al. (2002) afin de déterminer le LAI. Cette valeur issue de Goudriaan et Van Laar (1994) semble davantage correspondre à des systèmes de culture qu'à des systèmes forestiers. Granier et al. (2000) déterminent pour une hêtraie de 22.5 m, un k égal à 0.4. Wilson et al. (2001) pour une forêt mixte de feuillus d'une hauteur maximale de 26 m, considèrent une valeur de k égale à 0.58. Bréda (2003) fournit une liste de valeurs de k pour différentes espèces. Les valeurs indiquées pour les hêtres et les douglas sont de 0.43-0.44 et 0.4 respectivement. La moyenne pour l'ensemble des résineux pris en compte est de 0.4, et de 0.47 pour les feuillus. Dans notre cas, pour des valeurs de k comprises entre 0.4 et 0.5, le LAI calculé surestime largement les mesures au LAI_{2200} , et aux bacs à litières pour les hêtres. A l'inverse pour une valeur de 0.8, les résultats semblent faibles étant donné la structure des peuplements (Gerrits et al., 2010; Runyon et al., 1994). La littérature tend vers une valeur

moyenne de k de 0.5, mais des valeurs comprises entre 0.3 et 0.7 ont été constatées par Runyon et al. (1994) ou Holst et al. (2004), et Smith et al. (1991) montrent pour une même espèce (*Pinus contorta*) qu'une valeur moyenne de k n'est pas nécessairement applicable. Nous validons alors finalement la valeur de k égale à 0.6 pour le calcul du LAI avec les capteurs PAR, correspondant le mieux aux mesures au LAI2200, et donc davantage représentative de l'ensemble des sous-peuplements (Figures IV.2 et IV.3).

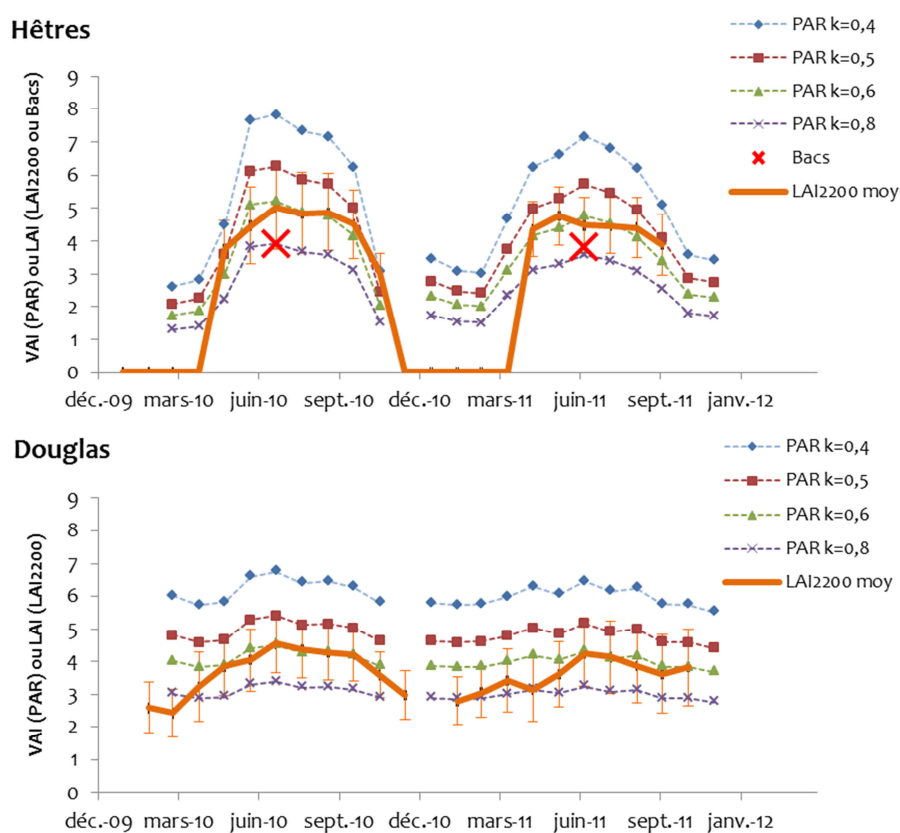


Figure IV.2 : Evolution mensuelle du LAI ou du VAI, pour les 2 méthodes indirectes (LAI2200 et PAR) et valeurs annuelles du LAI pour la méthode semi directe (Bacs : Bac à litières) en 2010-2011, par sous-peuplement. Les mesures aux capteurs PAR sont présentées en fonction des valeurs de k utilisées, soit 0.4, 0.5, 0.6 et 0.8.

Comparaisons de 2010 et 2011 pour les hêtres et les douglas

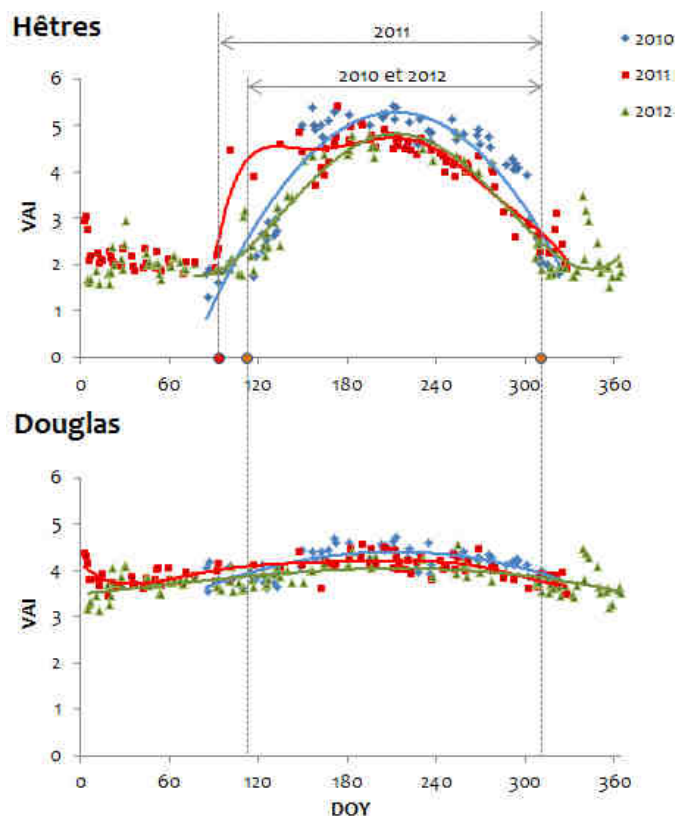


Figure IV.3 : Evolution journalière en 2010, 2011 et 2012, du LAI mesuré à partir des capteurs PAR ($k = 0.6$), pour les hêtres (en haut) et les douglas (en bas). Pour les hêtres, les points orange placés sur l'axe des abscisses correspondent aux dates de débourrement (jour 112) et de chute des feuilles (jour 310) sélectionnées pour la paramétrisation du modèle BILJOU®. Le point rouge correspond à la date approximative de débourrement des feuilles en 2011.

Concernant les mesures au LAI2200 aucune différence significative n'est constatée pour le sous-peuplement de hêtres, entre 2010 et 2011 (rapport $t = -1.19$, Prob. $> |t| = 0.2465$). Pour le sous-peuplement de douglas, le LAI de l'année 2010 est par contre significativement supérieur à celui de 2011 (rapport $t = -2.7$, Prob. $> |t| = 0.0135$). Concernant les capteurs PAR, de 2010 à 2012 quel que soit le sous-peuplement, aucune différence significative n'est observée entre les années (Hêtres : rapport $t = -1.99$, Prob. $> |t| = 0.0601$; Douglas : rapport $t = -1.38$, Prob. $> |t| = 0.1833$; Figure IV.3). Il est par

contre intéressant de constater qu'en 2011 le débourrement des feuilles semble se faire plus tôt dans l'année qu'en 2010 et 2012, et que le maximum semble être atteint plus rapidement (Figure IV.3). Cela est sûrement dû au printemps sec et chaud observé en 2011. Davantage d'années seraient cependant nécessaires afin de pouvoir juger du degré de variation de la date de débourrement en 2011. La chute des feuilles pour les hêtres arrive à terme aux alentours du jour 310, avec peu de variations sur la période d'étude.

Comparaisons des sous-peuplements, par méthodes en 2010-2011

Quelle que soit la méthode, les différences entre les sous-peuplements sont significatives, le LAI du sous-peuplement de hêtres durant la saison de végétation étant plus élevé que celui des douglas (LAI₂₂₀₀ : rapport $t = 3.92$, Prob. $> |t| = 0.0003$; PAR : $Z = 3.27$, Prob. $> |Z| = 0.0011$; Figure IV.2 et IV.3).

En conclusion

En conclusion nous retiendrons comme valeurs moyennes de LAI celles obtenues à partir du LAI 2200 pour 1) leur représentativité spatiale et 2) l'obtention d'une valeur de LAI et non de VAI, pour tout type de peuplement. Pour les hêtres, la méthode des bacs à litière est en théorie plus réaliste, mais elle fournit dans notre cas de faibles valeurs et l'utilisation du même matériel de mesure pour les deux sous-peuplements est préférable.

IV.2. Accroissement journalier en circonférence

Ce paragraphe ne traite que des hêtres et des sapins, seules espèces sur le site équipées de dendromètres (Annexe 7 et 8).

En 2010, l'accroissement annuel est évalué pour ces espèces à partir de la lecture visuelle sur les dendromètres (Annexe 7 et 8). L'accroissement en circonférence est en moyenne pour les hêtres de 1 cm (± 0.5) et de 1.8 cm (± 0.3) pour les sapins. Les potentiomètres ont été mis en route mi-juillet,

date pour laquelle la croissance des hêtres a été évaluée en moyenne à 82 % de la croissance annuelle, et à 80 % pour les sapins. En 2011, l'accroissement journalier en circonférence est mesuré tout au long de la saison (DOY 122 à 273; Figure IV.4). Sur l'ensemble de la saison, il est en moyenne de 0.2 cm (± 0.2) et 0.7 cm (± 0.6), pour les hêtres et les sapins respectivement (Figure IV.4). On distingue pour les 2 espèces, 2 phases de croissance. La première est caractérisée par un accroissement journalier rapide (DOY 122 à 183), de 0.04 et 0.13 mm en moyenne pour les hêtres et les sapins respectivement. La seconde présente des valeurs journalières moyennes d'accroissement plus lentes, à savoir de 0.002 et 0.03 mm pour les hêtres et les sapins respectivement (Figure IV.4). Au DOY 183 (début juillet), les hêtres et les sapins ont atteint en moyenne respectivement 88 et 76 % de leur croissance annuelle (Figure IV.4 a).

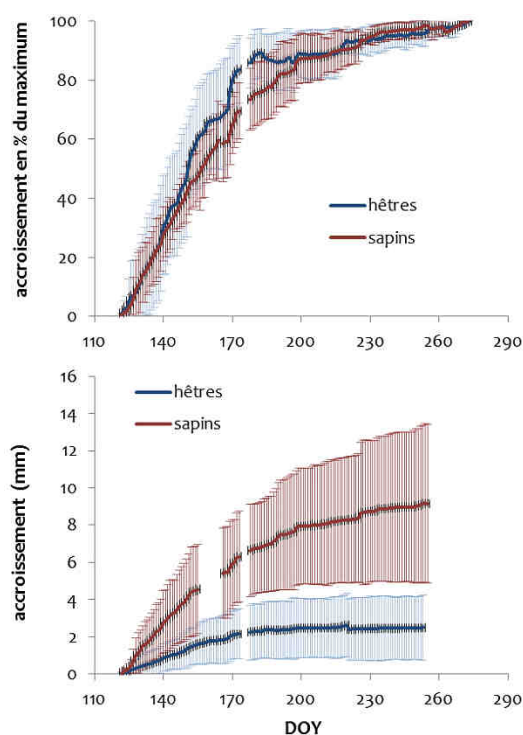


Figure IV.4 : Moyennes et écart-types des accroissements journaliers en circonférence mesurés à partir des dendromètres en 2011 (DOY 122 à 273), pour 12 hêtres (H5 et H6 exclus ; Annexe 7) et 3 sapins (Annexe 7), exprimés a) en % des accroissements totaux annuels, et b) en mm.

En Allemagne en 2002, Skomarkova et al. (2006), pour des hêtres d'âge comparable, mesurent une croissance continue de mai à août, avec environ 50 % de la croissance annuelle réalisée début juillet. En 2003 par contre, la croissance débute dès le mois d'avril et atteint aux environs de mi juin plus de 80 % de la croissance annuelle. La Spina (2011) mesure en 2010 sur des hêtres de circonférence similaire en forêt de Soignes (Belgique), une croissance continue atteignant fin août environ 90 % de la croissance moyenne annuelle. Michelot et al. (2012), en forêt de Fontainebleau (France), mesurent à partir de microcores en 2009, pour des hêtres d'âge et de taille comparables, un profil de croissance similaire, débutant début mai après le débourrement foliaire, et atteignant mi-juillet plus de 80 % de la croissance annuelle. La période de croissance que ce soit pour le hêtre ou le sapin semble donc assez courte à Vielsalm en comparaison par exemple aux résultats obtenus en forêt de Soignes, mais reste comparable à d'autres sites en Europe.

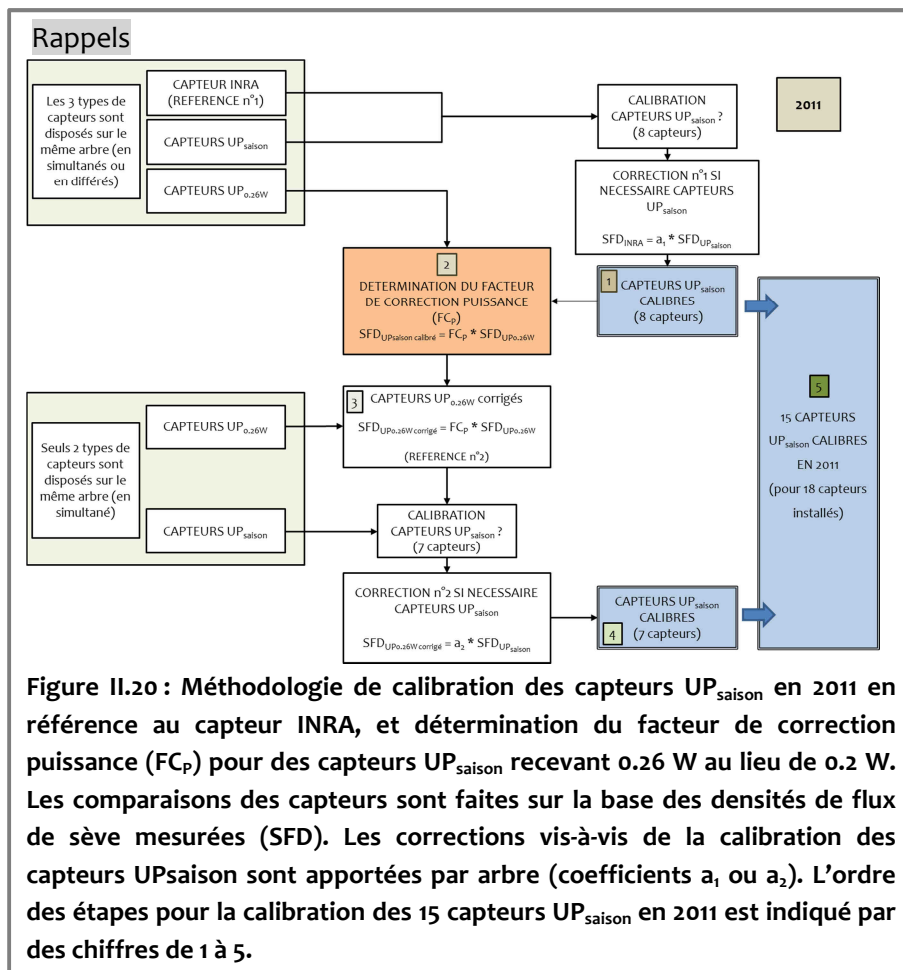
IV.3. Mesure des flux transpiratoires

La méthode de dissipation thermique a été utilisée afin de déterminer dans les 2 premiers cm du xylème, les densités de flux de sève des hêtres, douglas et sapins (Section II.4). La première partie de ce chapitre se concentre sur la validation des densités de flux de sève mesurées, en fonction de l'ensemble des conditions de mesures et des diverses controverses existantes sur la validité de la méthode de dissipation thermique (Section II.4.1). Dans une seconde partie, les résultats sur la détermination du profil radial de flux de sève des douglas sont présentés. La transpiration de chaque sous-peuplement est alors analysée dans une troisième partie. Puis les mesures de transpiration de 2010-2011 sont comparées aux transpirations modélisées par BILJOU© et analysées en fonction des conditions climatiques et édaphiques. Finalement, suite au paramétrage du modèle BILJOU© sur les années 2010 et 2011, la variabilité interannuelle de 1998 à 2011 de la transpiration modélisée est analysée, au regard des indices de stress hydriques annuels associés (Section I.6.4).

IV.3.1. Densités de flux de sève

Lors des 2 années de mesure, il a fallu faire face à divers problèmes de calibration, afin d'obtenir une estimation des densités de flux de sève. Les expériences sur le terrain en vue de rectifier ces problèmes, se sont déroulées en 2011. La première expérience avait pour but d'établir un coefficient de correction pour des capteurs de flux de sève recevant une puissance de 0.26 W, au lieu de 0.2 W. Ce fut le cas des capteurs installés en 2010. En parallèle, ayant en notre possession un capteur fabriqué par l'INRA, la calibration des capteurs UP, recevant 0.2 W en 2011, a été testée sur le terrain, sur le maximum d'arbres possible. Face à l'observation de différences significatives entre le capteur INRA et les capteurs UP, les densités de flux de sève mesurées en 2011 sont corrigées. Après correction des densités de flux de sève mesurées en 2010 à partir du facteur de calibration « puissance », ces dernières sont également corrigées vis-à-vis des écarts de calibration constatés entre les capteurs INRA et UP. L'ensemble des étapes menant à l'établissement des différents facteurs de calibration, et l'analyse des densités de flux de sève corrigées sont fournies dans les paragraphes suivants.

IV.3.1.1. Calibration des capteurs saisonniers (UP) et test de la puissance fournie en 2011



Calibration directe capteurs UP_{saison} avec capteur INRA (Figure II.20 étape 1)

Huit capteurs UP_{saison} , sur les 15 utilisés au cours des expériences de calibration (Tableau II.10, Figure II.20 et II.21), ont été comparés durant la saison de végétation 2011 avec le capteur INRA. Pour trois d'entre eux les densités de flux de sève enregistrées sont similaires à celles mesurées par le capteur INRA (Figure IV.5). Pour les cinq autres, nous constatons des sous-estimations des capteurs UP_{saison} plus ou moins conséquentes (Figure IV.6) : les densités de flux de sève mesurées par le capteur INRA, sont de 1.24 à 2.41 fois supérieures à celles mesurées par les capteurs UP_{saison} .

A partir des régressions obtenues, les mesures de densités de flux de sève des cinq capteurs présentant des calibrations différentes de celle du capteur INRA ont été corrigées. Les équations des régressions linéaires (pente forcée à 0 ; Figure IV.6) sont utilisées pour cette correction.

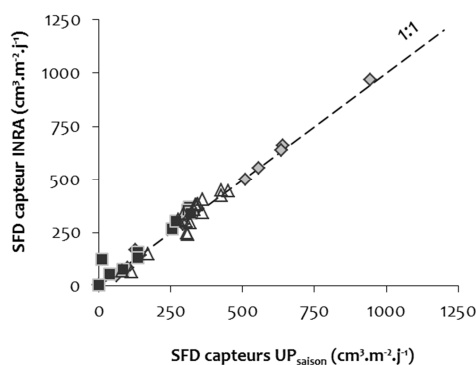


Figure IV.5 : Sommes journalières de densités de flux de sève mesurées sur deux hêtres (losanges et carrés) et un douglas (triangles), du capteur fourni par l'INRA (capteur INRA), déplacé d'arbre en arbre et alimenté par une puissance de 0.2 W, en fonction de celles des capteurs UP_{saison}, installés durant la saison de végétation 2011 et alimentés également par une puissance de 0,2 W.

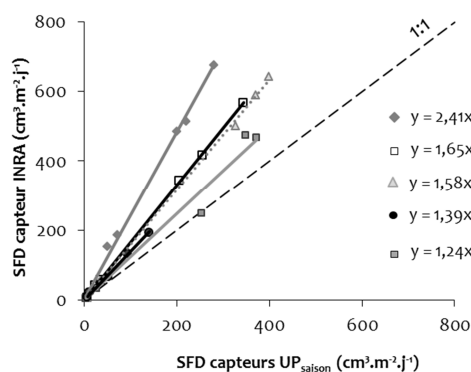


Figure IV.6 : Sommes journalières de densités de flux de sève mesurées sur deux hêtres (losanges bleus et carré orange) et trois douglas (triangles verts, ronds rouges et carrés gris), du capteur fourni par l'INRA (capteur INRA), déplacé d'arbre en arbre et alimenté par une puissance de 0.2 W, en fonction de celles des capteurs UP_{saison}, installés durant la saison de végétation 2011 et également alimentés par une puissance de 0,2 W. Les équations des régressions linéaires obtenues par arbre (ordonnée à l'origine forcée à 0) sont précisées.

Calibration des capteurs $UP_{0,26\text{ W}}$ (Figure II.20 étape 2)

Afin de calibrer les capteurs UP ayant reçu une puissance de 0.26 W en 2010 au lieu de 0.20 W, les résultats en 2011 de 6 capteurs UP_{saison} sur 8, préalablement calibrés si nécessaire avec le capteur INRA (Figure IV.5 et IV.6), sont comparés aux résultats des capteurs placés sur les mêmes arbres, recevant 0.26 W ($UP_{0,26\text{ W}}$; Tableau II.10 et Figure II.21). Les comparaisons sont faites sur la base des sommes journalières de SFD de chaque capteur.

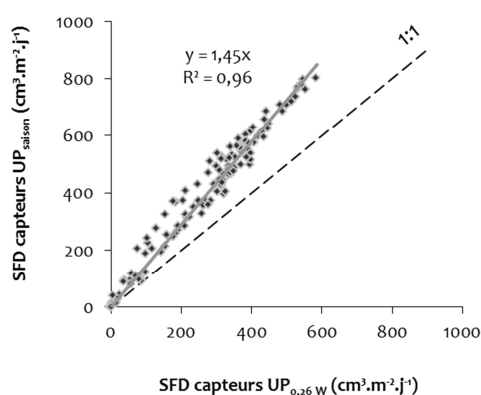


Figure IV.7 : Sommes journalières des densités de flux de sève mesurées sur six arbres (2 hêtres et 4 douglas), des capteurs UP_{saison} , installés durant la saison de végétation 2011 et alimentés par une puissance de 0,2 W, en fonction de celles des capteurs $UP_{0,26\text{ W}}$ alimentés par une puissance de 0,26 W. Les capteurs saisons ont été au préalable calibrés si nécessaire par le capteur INRA (Figure IV.5 et IV.6). L'équation de la régression linéaire obtenue (ordonnée à l'origine forcée à 0) est précisée.

La régression linéaire obtenue entre les mesures de SFD des capteurs $UP_{0,26\text{ W}}$ et UP_{saison} , tous arbres confondus, est présentée Figure IV.7. La pente de la droite est forcée à 0. Nous obtenons une relation stable avec un R^2 de 0.96. Les capteurs $UP_{0,26\text{ W}}$ sous-estiment les densités de flux de sève des capteurs UP_{saison} calibrés. Une puissance de 0.26 W fournie au capteur, au lieu de 0.2 W, amène à une sous-estimation d'environ 30 % des densités de flux de sève mesurées. Les densités de flux de sève, mesurées en 2010 par les capteurs saisonniers, ont alors été multipliées par le facteur de calibration établi, égal à 1.45 (Figure IV.7). Il sera désigné par la suite comme le facteur de calibration « puissance ».

Calibration indirecte des capteurs UP_{saison} (Figure II.20 étapes 3 et 4)

Sur les 15 capteurs UP_{saison} utilisés lors de ces expériences de calibration, 7 d'entre eux n'ont pas été calibrés par le capteur INRA, mais ont été comparés aux capteurs $UP_{0,26\text{ W}}$ (Figure IV.8). À la vue des résultats présentés Figure IV.7, nous faisons l'hypothèse qu'en multipliant les mesures des capteurs $UP_{0,26\text{ W}}$ par le facteur de calibration « puissance » de 1.45, nous obtenons l'équivalence de la mesure d'un capteur de référence (Figure II.20 étape 3). Nous utilisons ces résultats (« $UP_{0,26\text{ W}}$ corrigés ») afin de calibrer les sept capteurs UP_{saison} restants (Figure II.20 étape 4 ; Figure IV.9).

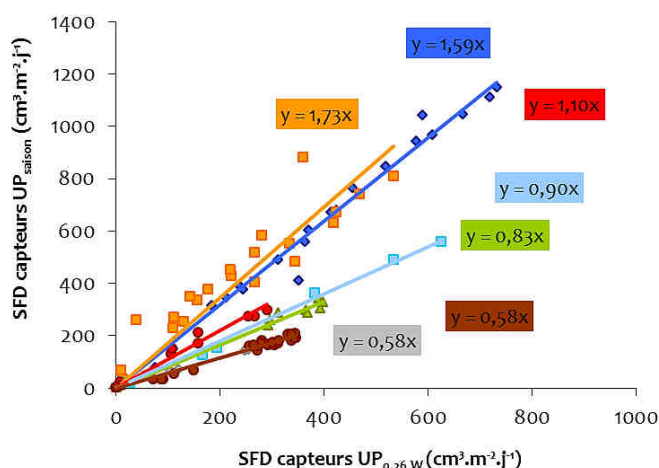


Figure IV.8 : Sommes journalières de densités de flux de sève mesurées sur sept arbres (3 hêtres, 2 douglas et 2 sapins), des capteurs UP_{saison} , installés durant la saison de végétation 2011 et alimentés par une puissance de 0,2 W, en fonction de celles des capteurs $UP_{0,26\text{ W}}$, alimentés par une puissance de 0,26 W. Les capteurs UP_{saison} sont ceux non calibrés par le capteur INRA. Les équations des régressions linéaires obtenues pour chaque arbre (ordonnée à l'origine forcée à 0) sont précisées.

Nous constatons de nouveau des écarts de mesures plus ou moins conséquents entre les capteurs UP_{saison} et $UP_{0,26\text{ W}}$ corrigés (assimilés au capteur INRA). Nous restons dans le même ordre de grandeur que pour les capteurs directement calibrés, avec des coefficients de calibration allant de 0.81 à 2.5. Le facteur de calibration ne semble pas dépendre de l'espèce (Figure IV.10). Les facteurs de calibration calculés, moyennés en fonction de

l'espèce, sont proches (1.36 pour les hêtres et 1.66 pour les douglas et sapins).

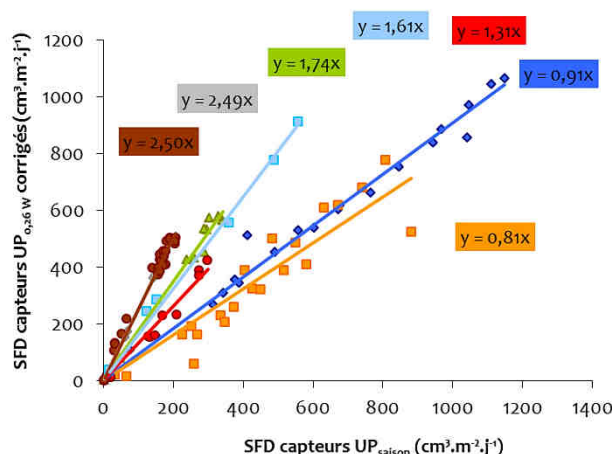


Figure IV.9 : Sommes journalières de densités de flux de sève, mesurées sur sept arbres (3 hêtres, 2 douglas et 2 sapins), des capteurs $UP_{0.26W}$ corrigés, (c'est à dire alimentés par une puissance de 0,26 W mais corrigés par le facteur de calibration « puissance »), en fonction des capteurs UP_{saison} , installés durant la saison de végétation 2011 et alimentés par une puissance de 0,2 W. Les capteurs UP_{saison} sont ceux non calibrés par le capteur INRA. Les équations des régressions linéaires obtenues pour chaque arbre (ordonnée à l'origine forcée à 0) sont précisées.

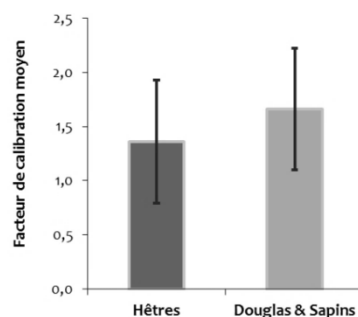


Figure IV.10 : Moyennes et écart-types respectifs, des facteurs de calibration mesurés d'une part pour les hêtres, d'autre part, pour les douglas et les sapins, en 2011.

Les résultats obtenus au cours de ces expériences ont été assez surprenants. Il nous paraissait logique d'obtenir des différences de mesures vis-à-vis du problème de puissance, mais ne nous attendions pas à obtenir des différences si prononcées, et variables, suite à la comparaison des

capteurs UP et du capteur INRA. La sous-estimation du SFD mesurée par le capteur UP, peut aller jusqu'à 60 % par rapport au SFD du capteur INRA. En moyenne en 2011, pour l'ensemble des capteurs testés, la sous-estimation de SFD par les capteurs UP est de 33 %. Pour 2 capteurs, le SFD est cependant surestimé, jusqu'à 23 % en plus de la valeur enregistrée par le capteur INRA.

Le facteur de calibration « puissance » est également conséquent puisqu'il amène à une sous-estimation des SFD mesurées de 31 %. Les 3 capteurs utilisés pour l'expérience en 2011, recevant une puissance de 0.26 W, n'ont pas été calibrés en comparaison au capteur INRA, à puissance égale. Cependant la « régularité » de la relation obtenue entre ces 3 capteurs et les capteurs saisonniers, préalablement calibrés, ou non par le capteur INRA (Figure IV.7), semble confirmer l'hypothèse d'une calibration équivalente, entre capteurs, et avec le capteur INRA.

L'hypothèse d'une calibration d'origine (Granier, 1985), identique entre espèces, semble être soutenue ici, du moins entre les hêtres, les douglas et les sapins. Il persiste, au sein de cette expérience, des doutes concernant l'influence des effets du forage, et de la variabilité azimutale des densités de flux de sève au sein du tronc, sur les facteurs de calibration calculés par arbre. Cependant, mis à part pour 2 capteurs, les densités de flux de sève mesurées par les capteurs UP sont soit équivalentes, soient inférieures à celles du capteur de référence. En cas d'une influence majeure de la variabilité azimutale sur les mesures, il semblerait alors plus logique d'observer un « équilibre » entre des écarts positifs et négatifs entre capteurs. L'hypothèse soutenue par Lu et al. (2004) d'une erreur de calibration due au mode de fabrication des capteurs et aux matériaux utilisés, semble alors la plus probable. Des problèmes de contacts thermiques et de pertes thermiques peuvent en être la cause. Une différence trop faible entre les diamètres des sondes UP et les tubes en aluminium, pouvant amener à de mauvais contacts thermiques, a déjà été signalée au constructeur (communication personnelle d'André Granier).

IV.3.1.2. Calibration des capteurs saisonnier en 2010

Une fois les mesures de 2010 corrigées pour le problème de puissance (facteur de calibration « puissance » de 1.45), la méthodologie développée Section II.4.1.2 est appliquée (Figure II.22 et II.23). Les résultats graphiques des calibrations, par arbre, sont présentés Annexe 9.

Espèces	C ₁₃₀ (cm)	Facteurs de calibration
Hêtres	97.5	0.375
	105	0.8
	115	1.45
	123	2.05
	129	1.2
	147.5	0.85
	164	1.5
Douglas	181	2.95
	206	2.95
	220	1.75
	232	3.4
	242	2.05
	250.5	2.6
Sapins	164	2.25
	222	1.3

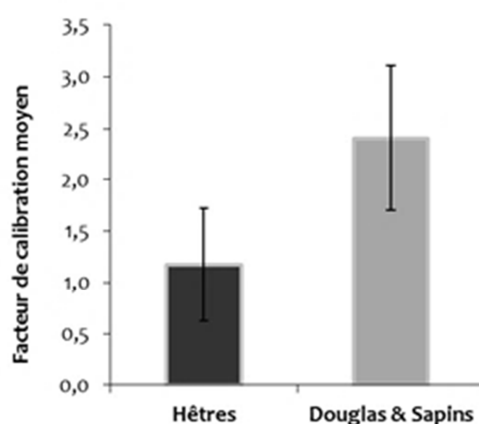


Figure IV.11 : Moyennes et écart-types, des facteurs de calibration mesurés d'une part pour les hêtres, d'autre part, pour les douglas et les sapins, en 2010.

Tableau IV.2 : Valeurs par espèce et par arbre (représentés par leurs circonférences, C₁₃₀, en cm) des facteurs de calibration utilisés pour chaque capteur afin de corriger les mesures de 2010 (Annexe 9).

Pour les 7 capteurs installés sur les hêtres, la moyenne des facteurs de calibration calculée est nettement plus faible que celle des 8 douglas et sapins (Figure IV.11). Seuls des capteurs placés sur les hêtres présentent des facteurs de calibration inférieurs à 1, dont un particulièrement faible pour l'arbre de plus petite surface d'aubier (Tableau IV.2). Pour les douglas et les sapins, au contraire, 6 arbres sur 8 présentent un facteur de correction

supérieur à 2, dont le facteur de correction le plus élevé, toutes espèces confondues, égal à 3.4 (Tableau IV.2).

La méthode de calibration employée ici pourrait être qualifiée de « peu banale », mais face à la variabilité des facteurs de calibration calculés en 2011 en fonction de l'arbre, l'utilisation d'un facteur de calibration moyen n'était pas plus réaliste. Nous partons de l'hypothèse que la réponse moyenne au VPD est identique d'une année à l'autre, pour ces 2 années présentant un LAI similaire et peu, ou pas, de déficit hydrique. La modélisation de la transpiration se base souvent sur ce genre de relation, et de nombreux modèles dont BILJOU© ont déjà prouvé leur efficacité. L'année 2011 présente tout de même un printemps particulièrement sec et chaud, en comparaison en 2010. Cependant les mesures de LAI ne sont pas significativement différentes entre les 2 années (Section IV.1.2), et les périodes de déficit hydrique ($REW < 0.4$), ne concernent que le sous-peuplement de hêtres en 2011, sur une courte durée, et pour le calcul de RU le plus faible (Section III.2.2, Figure III.20).

L'effet espèce constaté en 2010 (Figure IV.11) est difficilement explicable. En moyenne, toutes espèces confondues, les capteurs UP_{saison} , une fois corrigés pour la puissance, sous-estiment les SFD de 44 %, soit 10 % de plus qu'en 2011. Les résultats ne sont cependant pas indépendants et la comparaison reste alors difficile. Les résultats restent très variables en fonction du capteur.

IV.3.1.3. Densités de flux de sève calibrées

Comparaison intra et interspécifique

La variabilité intra-spécifique des SFD est plus importante pour les hêtres que pour les douglas (Figure IV.12), pouvant être dû au fait que l'échantillonnage chez les hêtres couvre proportionnellement une plus grande gamme de circonférences (+ 68 % au maximum de la plus petite circonférence échantillonnée) que chez les douglas (+ 38 %).

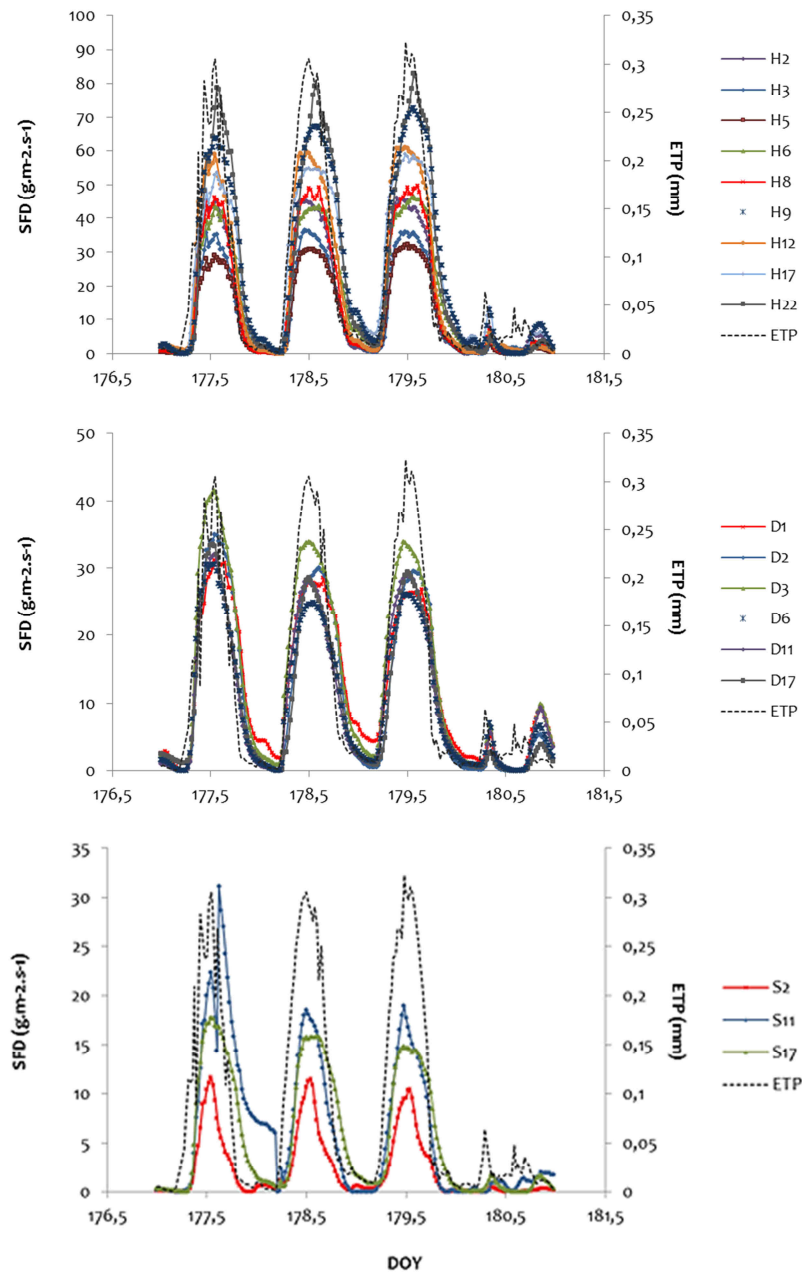


Figure IV.12 : Densités de flux de sève mesurées ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), sur un pas de temps de 30 min, pour les hêtres (en haut), les douglas (au milieu) et les sapins (en bas), durant 4 jours consécutifs en juin 2011 (DOY 177 à 181), pour une période avec un LAI_{max} et une REW supérieure à 0.4. La demande évaporative pour les 3 premiers jours est forte (ETP de 4.5 à 6 mm) et faible pour le dernier (ETP = 1.2 mm).

Pour les hêtres, les maximums journaliers sont compris entre 30 et 80 $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Durant les 3 premiers jours, entre 10 et 15 h (plage horaire durant laquelle les maximums de SFD sont mesurés), le coefficient de variation des mesures entre les hêtres est en moyenne de 27 %. Les douglas ont des maximums compris entre 29 et 40 $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Le coefficient de variation des mesures entre 10 et 15 h pour les 3 premiers jours est en moyenne de 11 %. Les sapins présentent les SFD les plus faibles avec des maximums compris entre 10 et 30 $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Pour les sapins le nombre d'arbres équipés est insuffisant pour estimer une variabilité intra-spécifique. Quelle que soit l'espèce, la dynamique journalière des densités de flux de sève entre les arbres est généralement similaire. Les gammes de SFD mesurées, sont du même ordre de grandeur que celles observées pour le hêtre dans Granier et al. (2000), Hölscher et al. (2005), Lüttschwager et Remus (2007) ; pour le douglas dans Granier (1987), Domec et al. (2006), Phillips et al. (2002), Fernández et al. (2009) ; et pour le sapin dans Fiora et Cescatti (2006).

Comme Lüttschwager et Remus (2007) et Fiora et Cescatti (2006), pour les douglas et les sapins nous n'observons pas de relations significatives entre la surface d'aubier de l'arbre et les SFD mesurées (Figure IV.13). Pour les hêtres, le R^2 de la relation présentée pour l'ensemble des individus est faible ($R^2 = 0.3$). Cependant en retirant l'arbre H9 de l'analyse, le R^2 est alors de 0.71. Chez les hêtres, la gamme de circonférences couverte nous permet donc d'observer un effet de la taille de l'arbre sur les densités de flux de sève mesurées dans les 2 premiers cm du xylème. Des résultats identiques ont été constatés sur le hêtre dans Granier et al. (2000), Peiffer (2005), ou sur d'autres espèces (Granier et al., 1996; Oren et al., 1999). La relation SFD-circonférence peu disparaître à la suite d'élagage (Peiffer, 2005).

Pour les DOY 177 à 181, les SFD moyennes entre espèce, sont significativement différentes (variances différentes ; Test de Wilcoxon pour chaque paires), avec dans l'ordre décroissant SFD Hêtres > SFD Douglas > SFD Sapins. Nous observons chez le sapin, en début et en fin de journée, des pentes plus faibles que pour les hêtres et les douglas (Figure IV.12). Sur l'ensemble des mesures 2011 (DOY 126 à 282), les corrélations avec l'ETP sont bonnes pour les 3 espèces (0.85, 0.81, 0.76 pour les hêtres, douglas et sapins respectivement).

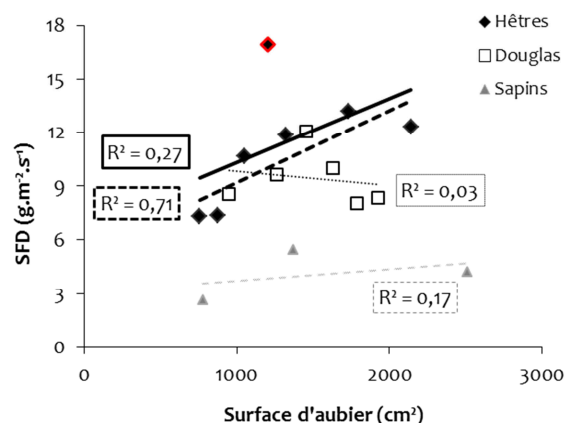


Figure IV.13 : Moyennes des densités de flux de sève, sur l'ensemble des mesures 2010-2011, par arbre, en fonction de leur surface d'aubier respectives. Les régressions linéaires sont calculées en fonction de l'espèce. Les R^2 sont indiqués en fonction de chaque régression. Pour les hêtres une régression linéaire est présentée sans l'arbre H9 (losange entouré de rouge, $R^2 = 0,71$).

En ce qui concerne la réponse du SFD à l'évapotranspiration potentielle (ETP, mm ; Figure IV.14), les R^2 des ajustements polynomiaux sont compris entre 0.8 et 0.9. Les hêtres présentent une réponse moyenne journalière à l'ETP supérieure à celle des douglas, elle-même supérieure à celle des sapins. Les différences entre espèces sont toutes significatives (variances différentes ; Test de Wilcoxon pour chaque paires). Nous notons tout de même une P-value relativement forte entre les hêtres et les douglas, égale à 0.047, indiquant une différence faiblement significative.

Les différences entre le hêtre et les deux espèces résineuses, peuvent être expliquées par les différences d'anatomie du bois, les vaisseaux (diamètre moyen de 10 à 300 μm) permettant une circulation de la sève plus rapide que les trachéides (diamètre moyen de 15 à 35 μm) et également par le pourcentage d'éléments conducteurs au sein de la section d'aubier. Pour une anatomie de bois similaire, tel que chez le douglas et le sapin, les densités de flux de sève mesurées peuvent présenter des différences importantes.

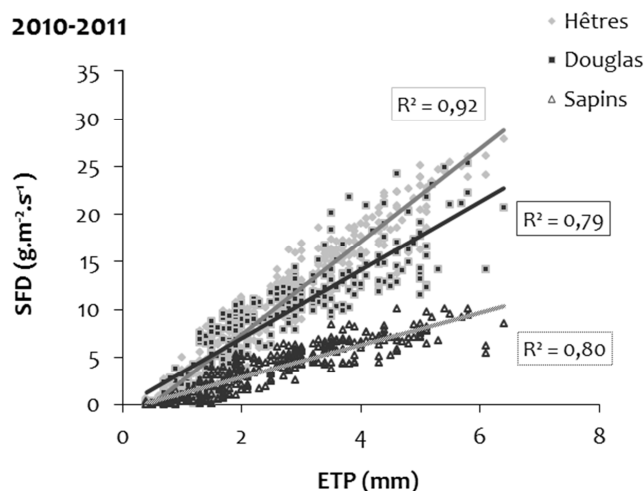


Figure IV.14 : Densités de flux de sève journalières moyennes par espèce en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP, mm) journalière, pour l'ensemble des jours de mesure en 2010 et 2011. Les courbes de tendances sont des régressions linéaires. Les R^2 des équations sont précisés en fonction des couleurs des courbes.

Comparaison intra-annuelle

Pour les espèces résineuses, les densités de flux de sève en 2010 après calibration, présentent une réponse moyenne à l'ETP supérieures à celles de 2011, pour des ETP journalières supérieures à 4 mm environ (Figure IV.15). Les R^2 sont plus élevés en 2010, attestant cette année-là d'une meilleure réponse des flux transpiratoires aux conditions climatiques, en comparaison à 2011. Pour les hêtres, les réponses des SFD à l'ETP est similaire entre 2010 et 2011. Cependant les 2 années de mesures ne sont pas indépendantes, les résultats de 2010 dépendants des corrections apportées à partir des résultats de 2011 (Section II.4.1.2).

Les moyennes de SFD annuelles sont significativement différentes uniquement pour les douglas. Quelle que soit l'espèce, les analyses portant sur une éventuelle régulation des SFD en réponse à des variables telles que la température, le rayonnement, et la réserve en eau utile relative du sol (REW), pouvant être limitantes pour le fonctionnement hydrique, ne fournissent pas de relations significatives (résultats non présentés).

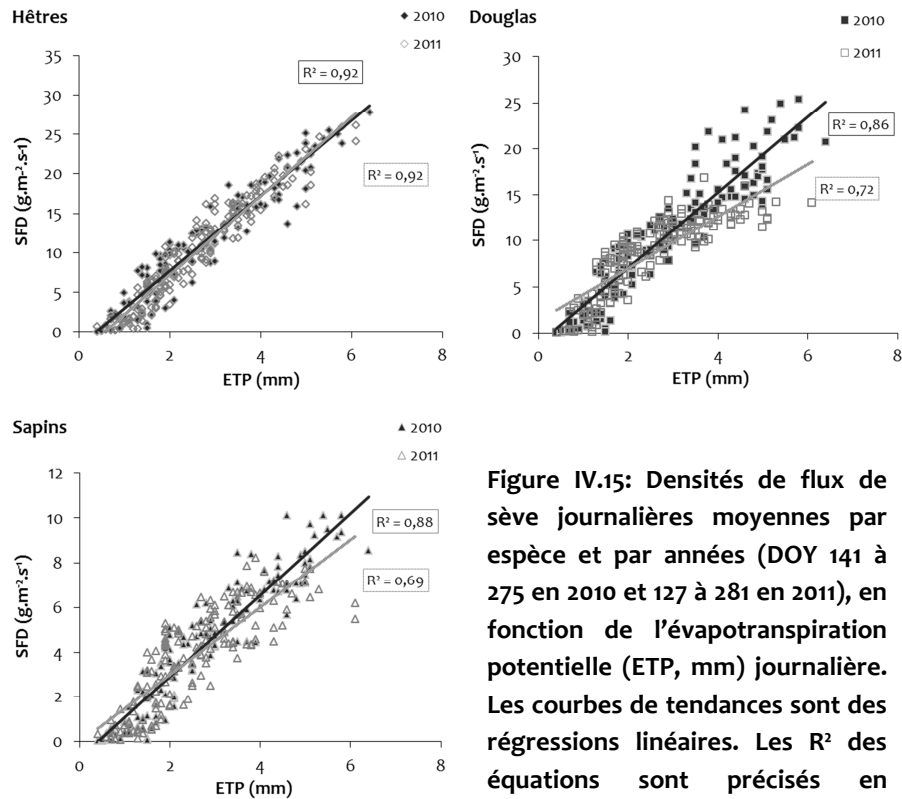


Figure IV.15: Densités de flux de sève journalières moyennes par espèce et par années (DOY 141 à 275 en 2010 et 127 à 281 en 2011), en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP, mm) journalière. Les courbes de tendances sont des régressions linéaires. Les R^2 des équations sont précisés en fonction des couleurs des courbes.

IV.3.2. La transpiration

IV.3.2.1. Profil radial de densité de flux de sève chez le douglas

Mesure du rapport R

Pour rappel, le rapport R est établi par arbre, à partir du rapport entre les sommes journalières de SFD mesurées par le capteur mobile, et celles du capteur de référence (capteur UP_{saison} ; Section II.4.2.1). Un exemple de cinétiques journalières du SFD, par arbre, pour les deux types de capteurs est fourni Figure IV.16.

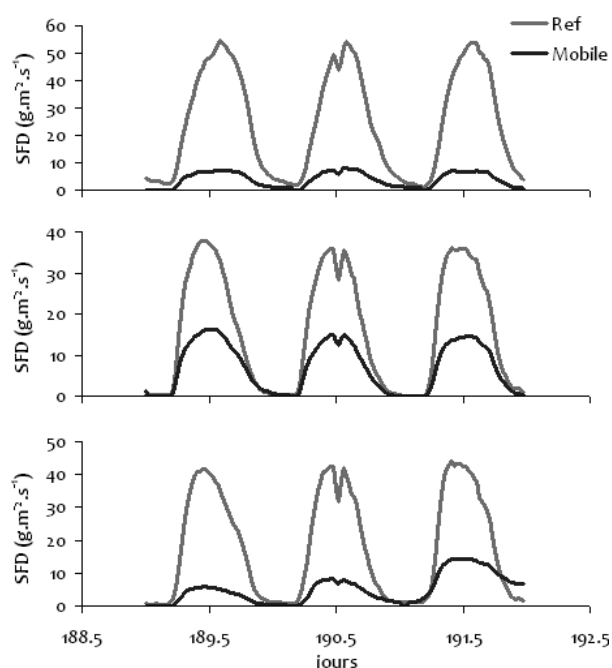


Figure IV.16 : Dynamiques journalières (données bi-horaires) des SFD mesurées sur les 3 arbres échantillonnés (de haut en bas : D2, D11 et D17) pour les capteurs de référence (Ref) et mobile pour la position 3 (55 mm) face nord.

	D2		D11		D17	
	Rapport t	Prob.> t	Rapport t	Prob.> t	Rapport t	Prob.> t
Sud-Nord	1.1258	0.2776	0.4626	0.6474	0.5614	0.5789

Tableau IV.3 : Résultats statistiques des tests t, appliqués pour chaque arbre sur les valeurs journalières de R, en fonction de la face nord ou sud, toutes positions confondues.

Quel que soit l'arbre, aucune différence significative n'est constatée entre les mesures moyennes de R en fonction de la face (nord ou sud ; Tableau IV.3). Les profils obtenus par arbre à partir de la moyenne de R face nord et sud, ne présentent pas de différence significative (Figure IV.17 ; Tableau IV.4), résultat identique à Granier et al. (2000) pour le hêtre. Pour la suite, un profil moyen sera alors utilisé en fonction des profondeurs relatives moyennes le long du rayon d'aubier, soit 0, 13, 19, 45, 70 et 100 % (Figure IV.18), le 0 correspondant à la limite avec le cambium.

L'extrapolation des mesures dans les 10 premiers mm, nous amène à considérer un rapport R , à la limite du cambium, d'une valeur comprise entre 2 et 2.5 en fonction de l'arbre. Selon cette hypothèse, le gradient de SFD dans les 2 premiers cm du rayon d'aubier est donc important, alors que la valeur diminue peu par la suite.

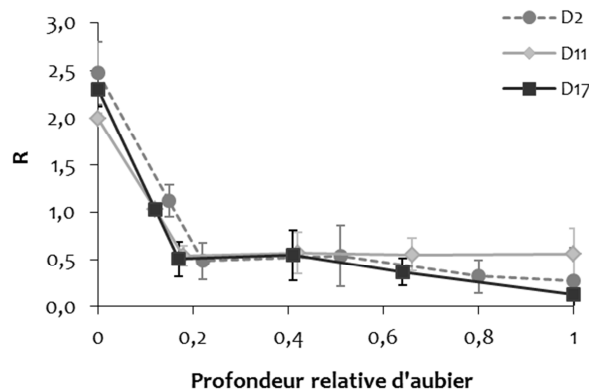


Figure IV.17 : Valeurs de R moyennes mesurées, faces nord et sud confondues, en fonction de la profondeur relative sur le rayon d'aubier pour chaque arbre échantillonné. Les écart-types pour chaque position de mesure sont représentés.

	Rapport t	Prob.> t
Arbres D2-D11	-0.3202	0.7496
Arbres D2-D17	0.2895	0.7729
Arbres D17-D11	-0.6319	0.5291

Tableau IV.4 : Résultats statistiques des tests t , sur les valeurs journalières de R , toutes positions confondues, en fonction de l'arbre.

Dans la littérature les profils radiaux de flux de sèves mesurés sont multiples, que cela soit chez les conifères, les espèces à pores diffus ou à zone poreuse marquée. Les formes les plus communes sont, i) un profil Gaussien, avec un pic se situant généralement entre 10 à 30 % du rayon d'aubier, à partir du cambium, et une décroissance plus ou moins rapide vers le centre (Čermák et al., 1992; Čermák et Nadezhdina, 1998; Fiora et Cescatti, 2006; Ford et al., 2004; Gebauer et al., 2008; Lüttschwager et Remus, 2007; Nadezhdina et al., 2002), ou ii) un profil décroissant plus ou moins rapidement, comme observé dans notre cas (Domec et al., 2005; Fiora et Cescatti, 2006; Gebauer et al., 2008; Granier et al., 2000; Phillips et al., 1996). Dans Gebauer et al. (2008) pour le profil du hêtre, la valeur de R au niveau du cambium est également considérée comme supérieure à 1. Domec et al.

(2005) décrivent pour le douglas un profil décroissant vers le centre avec une pente douce et à peu près constante, contrairement à nos résultats décrivant dans les 2 premiers cm une forte chute de la densité de flux de sève. Leur expérience est cependant réalisée sur de jeunes arbres de 24 ans, cela pouvant expliquer la différence de profil. Nadezhdina et al. (2009) mesurent les densités de flux de sève sur l'ensemble du rayon d'aubier sur un douglas (53 ans, DBH = 35.6 cm), à partir de la méthode HFD, à 13 h, lors d'une journée à forte demande atmosphérique. La première position de mesure est située à 5 mm de profondeur, à partir du cambium. Le profil augmente très légèrement jusqu'à environ 15 mm, puis décroît pour atteindre à environ 45 mm, une valeur inférieure de 58 % à celle mesurée à 5 mm. Contrairement aux résultats présentés ici, la décroissance se fait alors au-delà des 2 premiers cm, et plus progressivement. La décroissance d'environ 60 % de la valeur de SFD entre la première et la dernière position de mesure est équivalente à nos résultats. Les auteurs montrent également que le profil peut être variable en comparaison à d'autres journées, à la suite d'un test d'irrigation, et d'une période de sécheresse, témoignant alors de la difficulté d'obtenir un profil général. Une fois de plus la différence d'âge et de circonférence entre l'arbre échantillonné dans Nadezhdina et al. (2009) et ceux dans cette étude, peuvent en partie expliquer le peu de concordance des résultats. La décroissance que l'on décrit dans les 2 premiers cm est forte, et la valeur à 0 largement supérieure à 1. Cependant la mesure intégrée de 10 à 20 cm diminue de moitié en comparaison à celle intégrée de 0 à 20 cm. Dans l'hypothèse que la calibration des capteurs est correcte, ce cas de figure semble alors rester réaliste.

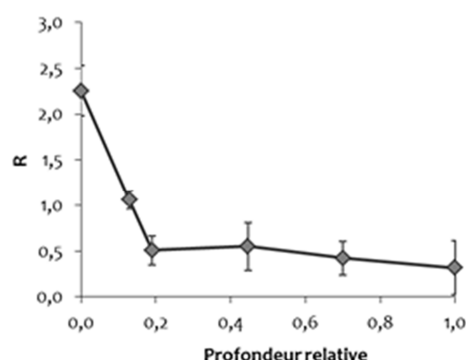


Figure IV.18 : Valeurs de R moyennes et écart-types, mesurés pour tous les arbres et faces confondues, en fonction des profondeurs relatives moyennes sur les rayons d'aubier.

Variabilité de R et conditions climatiques

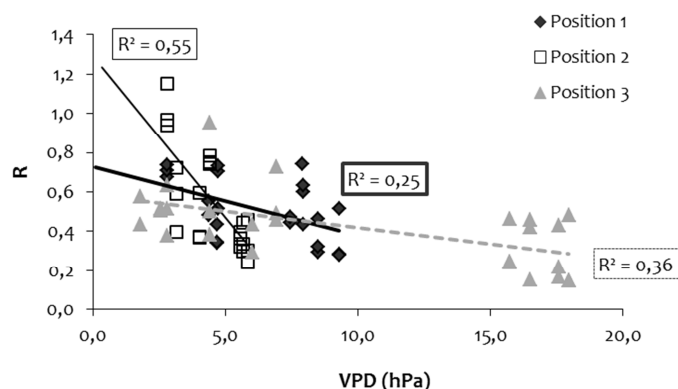


Figure IV.19 : Valeurs de R journalières en fonction du VPD journalier (hPa), par position de mesure (Tableau II.11), tous arbres confondus. Les R^2 des régressions linéaires établies par position de mesure sont indiqués.

Nous constatons Figure IV.17, que les écart-types des différentes positions de mesures sont relativement importants. Qui plus est, mis à part pour quelques jours faisant exception, les variations inter-journalières de R sont similaires entre les 3 arbres échantillonnés (données non présentées ici). Afin d'expliquer au mieux cette variabilité, l'effet des conditions climatiques a été testé, à partir de la réponse de R au VPD moyen journalier, par position de mesure (Figure IV.19). Les journées sont classées en fonction de la gamme de VPD journalier soit 1) de 0 à 5 hPa, 2) de 5 à 10 hPa et 3) de 10 à 20 hPa. Les positions 1 et 2 ne sont représentées que pour les classes de VPD 1 et 2. La position 3 par contre couvre toutes les classes.

Pour la position 2 la différence est significative entre les classes de VPD 1 et 2. Pour la position 3, les résultats pour la classe de VPD 3 sont significativement différents de ceux des classes 1 et 2. Le rapport R tend légèrement à diminuer avec une augmentation du VPD mais compte tenu du manque de représentativité des données sur l'ensemble de la gamme de VPD cela reste difficile à valider. Des résultats similaires sont constatés dans Fiora et Cescatti (2006) et Nadezhdina et al. (2002), qui décrivent des pics plus prononcés dans les premiers cm du rayon d'aubier lors de journées ensoleillées et un profil davantage uniforme pour des journées plus nuageuses. Sur l'ensemble des mois de mai à septembre en 2010 et 2011, la

Chapitre IV

classe 1 de VPD moyen journalier (< 5 hPa) représente à elle seule 69 % des jours. À la vue de tous ces résultats, une valeur moyenne de R pour chaque position, obtenue à partir de l'ensemble des données, est conservée.

Calcul de la surface d'aubier corrigée, SA_c

Pour cette dernière étape, le profil de R est exprimé en fonction de la position relative sur le rayon total des arbres (Figure IV.20). La surface d'aubier est alors considérée égale à 21 % du rayon, et les flux comme nul au-delà. Le profil est divisé en 2 parties. De 0 à 4 % du rayon, il est caractérisé par une forte décroissance ($R = 225 - 43 X_r$, Equation IV.1), puis de 4 à 21 % par une décroissance progressive ($R = 60.4 - 1.3 X_r$, Equation IV.2). La somme de l'intégration des Equations IV.1 et IV.2 sur la surface du tronc, permet la détermination d'une surface d'aubier corrigée (SA_c) égale à $0.22 \pi \cdot DBH^2$, soit 22 % de la surface totale de l'arbre.

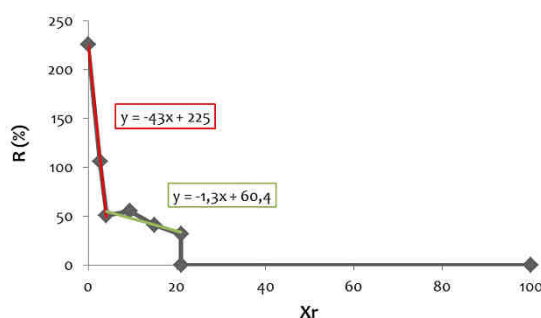


Figure IV.20 : Profil de R , mesuré à partir de tous les arbres et faces (nord-sud) échantillonnés, en fonction de la profondeur relative sur le rayon total moyen (X_r).

IV.3.2.2. Transpiration des sous-peuplements

La transpiration à l'échelle des sous-peuplements est calculée en fonction de l'inventaire de la Parcelle C100 (Section II.4.3, Figure II.27 et Tableau II.12). Pour les 2 années de mesure, jusqu'au DOY 200, les valeurs journalières de transpiration du sous-peuplement de hêtres (T_H) sont généralement supérieures à celles du sous-peuplement de douglas (T_D ; Figure IV.21). Les moyennes journalières de T_H et T_D durant cette période sont respectivement de 2.4 et 1.9 mm en 2010 (59 jours) et 2.0 et 1.3 mm en 2011 (76 jours). A partir du DOY 200, les conditions climatiques sont moins favorables (chute de l'ETP journalière en particulier en 2010). Les mesures

ont alors tendance à s'uniformiser (Figure IV.21). Les moyennes journalières de T_H et T_D à partir du DOY 200 sont respectivement de 1.2 et 1.0 mm en 2010 (76 jours) et 1.0 mm pour les deux en 2011 (82 jours).

En 2010, des DOY 141 à 245, T_H est estimée à 227 mm et T_D à 183 mm. Les moyennes journalières sont alors respectivement de 1.7 et 1.4 mm. En 2011, des DOY 127 à 281, T_H est estimée à 222 mm et T_D à 175 mm. Les moyennes journalières sont alors respectivement de 1.5 et 1.1 mm.

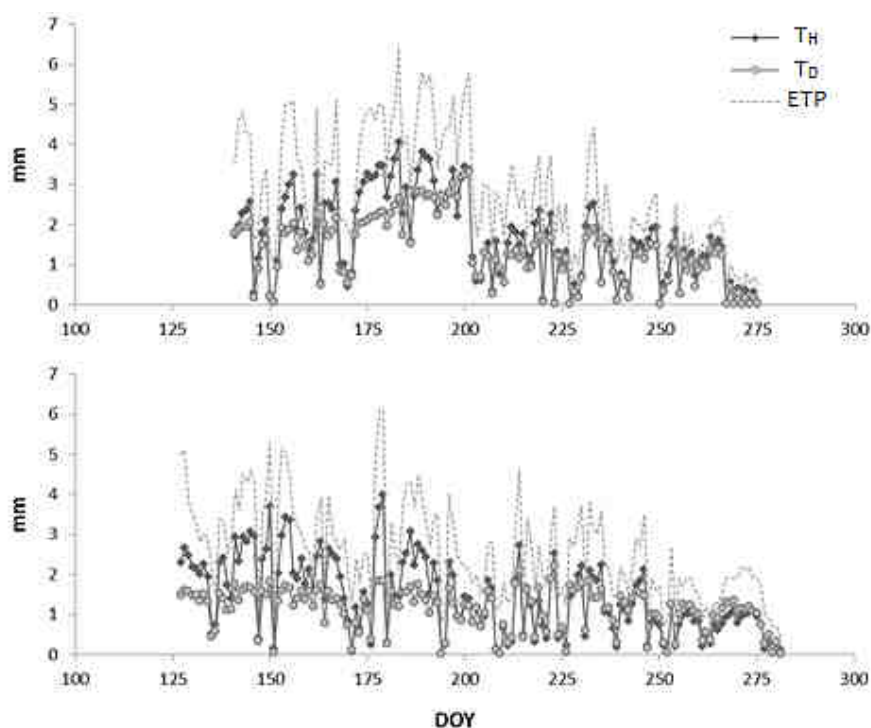


Figure IV.21 : Transpiration mesurée (méthode de dissipation thermique) pour les sous-peuplements de hêtre (T_H , mm) et de douglas (T_D , mm) et évapotranspiration potentielle (ETP, mm) calculée à partir de la formule de Penman, en 2010 DOY 141 à 245 (en haut) et en 2011 DOY 127 à 281 (en bas).

En 2010, les quantités mensuelles transpirées par le sous-peuplement de hêtres (T_H), sont systématiquement supérieures, de 13 à 28 % selon le mois, à celles du sous-peuplement de douglas (T_D ; Figure IV.22). En 2011, la transpiration des hêtres est supérieure à celle des douglas pour les mois de juin et juillet (37 et 26 % respectivement), égale au mois d'août, puis la tendance s'inverse pour la fin de la saison (T_H égal à -13 % de T_D en

septembre ; Figure IV.22). Les différences en pourcentage entre les sous-peuplements, pour la période de juin à septembre, restent similaires entre les deux années (-20 % en 2010 et -18 % en 2011 pour le douglas) malgré une évolution saisonnière différente. Schipka et al. (2005) fournissent une série de valeurs de transpiration annuelle pour le hêtre, en Europe centrale sur différents sites, dérivées de mesures de flux de sève, du bilan hydrique du sol, ou de mesures météorologiques. Les valeurs annuelles sont comprises entre 213 et 421 mm (Benecke, 1984; Bücking et Krebs, 1986; Gerke, 1987; Granier et al., 2000; Heil, 1996; Herbst et al., 1999; Lang, 1999; Leuschner, 1994). Les valeurs mesurées sont comprises dans la gamme relevée par Schipka et al. (2005), malgré que les saisons de végétation ne soient pas prises entièrement en compte.

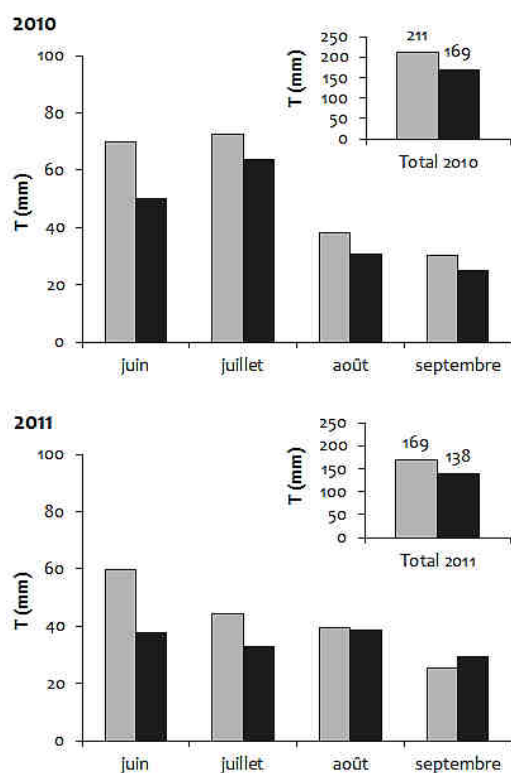


Figure IV.22 : Suivi mensuel et total saisonnier (juin à septembre) en 2010 (en haut) et en 2011 (en bas), de la transpiration ligneuse calculée à partir de la méthode de dissipation thermique, pour le sous peuplements de hêtres, T_H (gris clair) et de douglas, T_D (noir).

IV.4. Modélisation des flux transpiratoires par BILJOU©

IV.4.1. Période 2010-2011

Les résultats présentés dans cette section ont été obtenus, pour chaque sous-peuplement (type feuillus ou résineux dans BILJOU©), à partir des jeux de paramètres Tableau II.14 (Section II.7.4.2).

Pour le peuplement de feuillus (hêtres), le modèle simule un très faible stress hydrique uniquement pour le calcul de RU inférieur (RU.i) en 2011. Les conséquences sur les sommes saisonnières modélisées en fonction du calcul de RU utilisé sont très faibles (différences inférieures à 0.5 % entre les sommes saisonnières de B.T.i_H, B.T.m_H et B.T.s_H). B.T.m_H est alors uniquement conservé pour la suite des analyses. Pour les résineux (douglas), BILJOU© simule également en 2011 un stress hydrique pour le calcul de RU inférieur. La différence sur les cumuls saisonniers est de 4 % entre B.T.i_D (170 mm) et B.T.m_D (176 mm). Nous conservons pour les analyses B.T.i_D et B.T.m_D. Les comparaisons des transpirations mesurées et modélisées sont présentées pour des valeurs de T modélisées par BILJOU© supérieures à 0.3 mm (Figure IV.23), cela afin d'avoir une meilleure évaluation de la relation mesure/modèle pour des valeurs ayant un poids conséquent dans le bilan. En effet, lors de journées pluvieuses BILJOU© considère la transpiration comme quasi, voire nulle, sur la journée. Si l'événement pluvieux n'a eu lieu en réalité que sur une seule partie du jour, une transpiration, non négligeable, aura pu être par contre enregistrée par les capteurs de flux de sève sur l'ensemble de la journée.

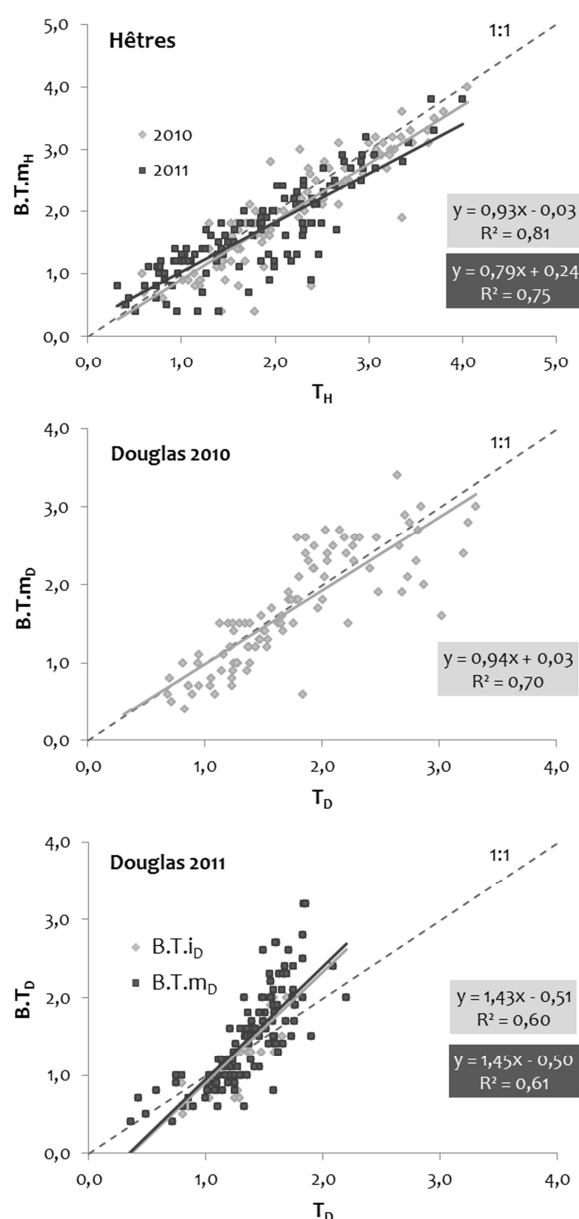


Figure IV.23: Transpiration journalière (mm) modélisée par BILJOU© (B.T) en fonction de la transpiration mesurée (T), pour : i) le sous-peuplement de hêtres, H, en 2010 et 2011. La transpiration modélisée est obtenue à partir de RU.m ; ii) le sous-peuplement de douglas, D, en 2010. La transpiration modélisée est obtenue à partir de RU.m ; et iii) le sous-peuplement de douglas, D, en 2011. La transpiration modélisée est obtenue à partir de RU.i ou de RU.m. Les équations et R^2 de chaque courbe de tendance sont indiqués (couleurs correspondantes aux courbes).

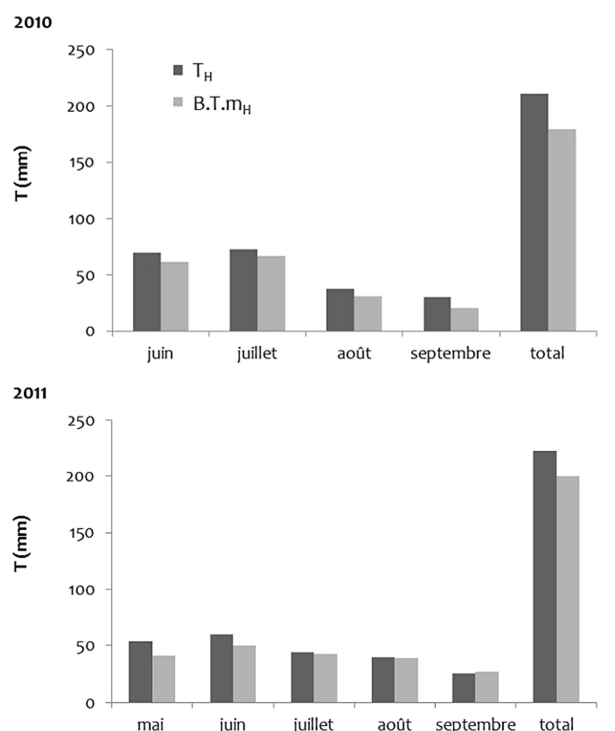


Figure IV.24 : Sommes mensuelles et saisonnières des valeurs journalières de transpiration, mesurées pour le sous-peuplement de hêtres (T_H) et modélisées par BILJOU© à partir du calcul de RU moyen (B.T.m_H), pour un peuplement de feuillus, en 2010 (DOY 152 à 273) et en 2011 (DOY 127 à 273).

Pour le sous-peuplement de feuillus, les régressions linéaires obtenues entre les mesures et les modèles ont un R^2 de 0.8 et de 0.75 en 2010 et 2011 respectivement, avec une pente proche de 1 (Figure IV.23). À noter tout de même que globalement les mesures sont supérieures aux valeurs modélisées, écart qui s'accroît pour les fortes valeurs de transpiration journalière. Ces écarts se retrouvent sur les sommes saisonnières de transpiration, mesurées et modélisées, pour les deux années (Figure IV.24). Sur la saison (juin à septembre inclus), B.T.m_H représente respectivement, en 2010 et en 2011, 85 et 90 % de T_H . En 2010 quel que soit le mois, les mesures sont supérieures au modèle, B.T.m_H représentant de 67 à 92 % de T_H . En 2011, les valeurs modélisées représentent de 77 à 107 % les valeurs de T_H , les écarts diminuant au fil des mois.

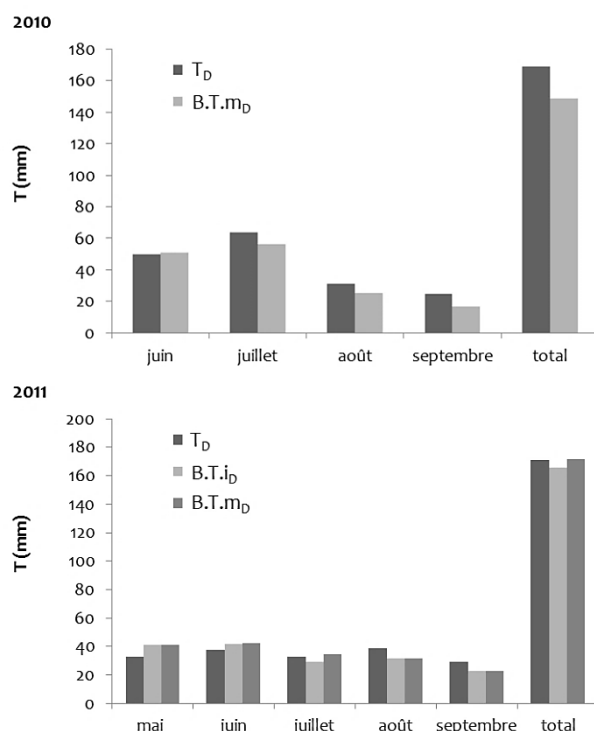


Figure IV.25 : Sommes mensuelles et saisonnières des valeurs journalières de transpiration, mesurées pour le sous-peuplement de douglas (T_D) et modélisées par BILJOU© pour un peuplement de résineux, en fonction du calcul de RU moyen ($B.T.m_D$), en 2010 (DOY 152 à 273) et moyen et inférieur ($B.T.i_D$) en 2011 (DOY 127 à 273).

Pour le sous-peuplement de douglas, la régression est satisfaisante entre les mesures et le modèle en 2010, avec un R^2 de 0.7 (Figure IV.23). En 2010, $B.T.m_D$ à l'échelle de la saison, représente 89 % de T_D . Les écarts mensuels entre les mesures et le modèle s'accroissent au fil des mois passant de +2 à -33 % (juin à septembre ; Figure IV.25). Les régressions à l'échelle journalière en 2011 sont moins bonnes qu'en 2010, pour les 2 calculs de RU (Figure IV.23). Quel que soit le calcul utilisé ($RU.i_D$ ou $RU.m_D$, présentant finalement peu de différences concernant la transpiration), les valeurs journalières mesurées plafonnent aux alentours de 2 mm, alors que les valeurs modélisées atteignent 3 mm. Ces écarts journaliers ont par contre peu de conséquences à l'échelle mensuelle ou saisonnière (Figure IV.25). En 2011, à l'échelle de la saison $B.T.m_D$ et $B.T.i_D$ équivalent respectivement à 101

et 97 % de T_D . Mensuellement, les résultats sont plus contrastés qu'en 2010, $B.T.m_D$ et $B.T.i_D$ étant supérieurs à T_D en début de saison durant les mois de mai et juin (Figure IV.25), période avec de manière générale une demande évaporative importante (Annexe 6), pouvant éventuellement être la source de ces différences.

IV.4.2. Période 1998-2011

Les transpirations annuelles modélisées de 1998 à 2011, pour les calculs de RU inférieurs et moyens et pour chaque sous-peuplement, sont exposées Figure IV.26.

Pour le sous-peuplement de feuillus, $B.REW.m_H$ ne chute pas en-dessous du seuil de 40 % au cours des 14 années. $B.T.m_H$ n'est alors à aucun moment régulée par un déficit hydrique édaphique. Pour $B.REW.i_H$ par contre, 8 années présentent des périodes de stress. Les indices de stress sont cependant très faibles, le plus fort, de 15, étant enregistré en 2003. Sur l'ensemble de la Wallonie, au travers de 21 sites (chênes, hêtres, douglas et épicéas), Manise et Vincke (2012) calculent un indice moyen de stress en 2003 de 23. En 1976, l'indice moyen de stress en Wallonie est de 46 (5 peuplements échantillonnés présentant des indices supérieurs à 70), mais à Vielsalm il est plus faible qu'en 2003 (Manise et Vincke, 2012). En Lorraine, Bréda et al. (2004) calculent pour un peuplement feuillu de LAI = 5, des indices de déficits hydriques de 61.2 et 50.3 en 1976, et de 78.6 et 65.3 en 2003, sur des sols possédant une RU de 130 et 175 mm respectivement. Le site de Vielsalm pour les feuillus a donc été peu touché par la sécheresse en 2003, en comparaison à l'échelle de la Wallonie ou de la France.

Pour le sous-peuplement de douglas, $B.REW.m_D$ ne chute pas non plus en-dessous du seuil de 0.4 durant les 14 années, et seules 2 années présentent de courtes périodes en dessous de ce seuil pour $B.REW.i_D$. Il s'agit de 2003 et de 2011. Les indices de stress associés restent cependant faibles également, voire insignifiant. En 2003, il est de 1.5. Cette année-là, en Lorraine, Bréda et al. (2004) calculent pour un peuplement de conifères, de LAI = 7.5, des indices de déficits hydriques de 155.5 et 145.1 sur des sols possédant une RU de 130 et 175 mm respectivement. Dans la même étude les indices calculés en 1976 sont de 114.9 et 115.3 pour les 2 sols. En 2011, il est

de 5.1. Cet indice est associé au printemps sec et chaud de 2011, les conifères débutant la photosynthèse dès le début du printemps. Chez les feuillus, dont la date de débourrement est fin avril, la sécheresse printanière a moins de conséquence sur la simulation, et l'indice de stress associé à l'année, pour $B.REW.i_H$, est insignifiant (1.1).

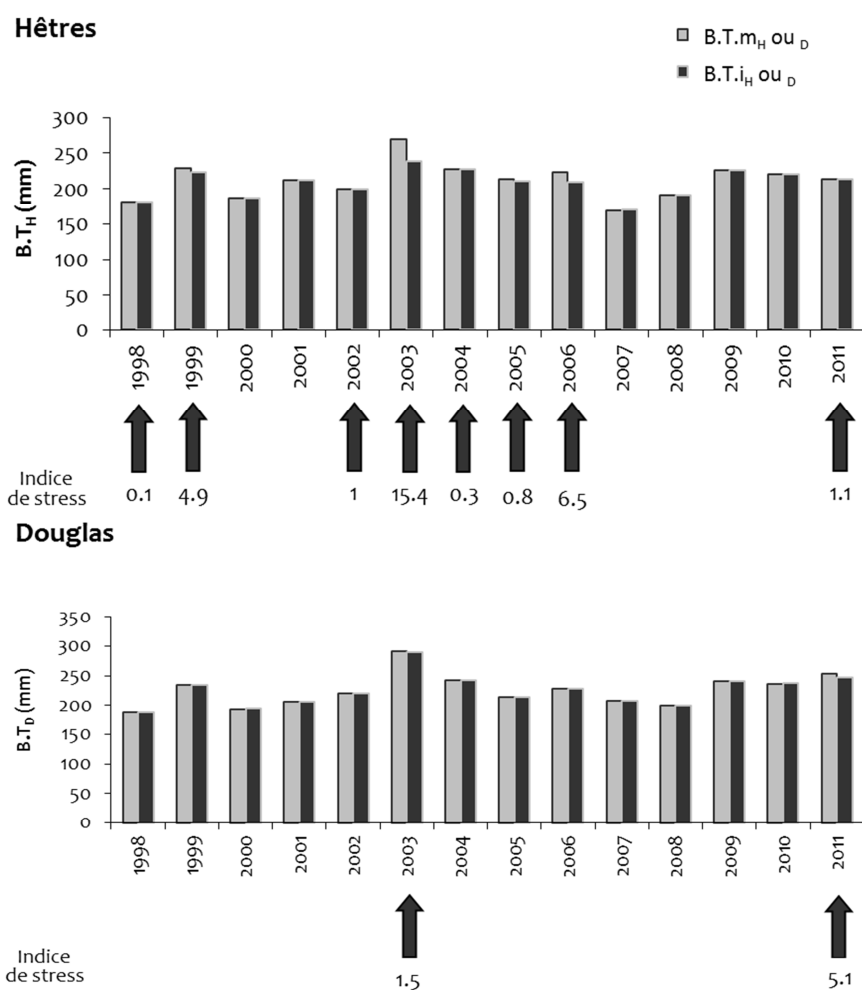


Figure IV.26 : Transpiration annuelle modélisée par BILJOU® de 1998 à 2011, en fonction des calculs de RU inférieur ($B.REW.i$) et moyen ($B.REW.m$), pour les peuplements de hêtres (feuillus, en haut) et de douglas (résineux, en bas). Pour les années concernées les indices de stress calculés (sans dimension) par BILJOU® sont indiqués, la couleur des flèches correspondant à la couleur des 2 calculs de RU.

À partir de ces simulations, que ce soit pour les feuillus ou les conifères, il semble que les sous-peuplements à Vielsalm n'ont pas subi de stress hydrique important ces 14 dernières années. De 1998 à 2011, la transpiration annuelle modélisée des hêtres est de 212 mm en moyenne pour le calcul de RU moyen et de 208 mm pour le calcul inférieur. Pour les douglas, elle est de 225 mm pour les deux. Il est cependant important de noter que le LAI est constant sur la période de simulation. Pour une forêt adulte, on peut supposer que le LAI en 14 années, sans perturbations extérieures, n'affiche pas de grandes variations. Cependant pour les hêtres, entre 1999 et 2001, suite à des attaques de pathogènes (Section II.1.1), les effectifs sur la Parcelle témoin ont été diminués de près de 40 %. On peut supposer que le LAI du peuplement était différent avant ces années-là, et sûrement supérieur à celui déterminé entre 2010 et 2011. Il est alors possible qu'avant 2001, la transpiration modélisée soit sous-estimée pour le sous-peuplement de feuillus, et donc également les indices de stress.

Chapitre IV

EN CONCLUSION

- Le printemps 2011 est sec et chaud et les années 2003 à 2006 sont globalement défavorables d'un point de vue climatique pour les stations à faible RU ;
- Les LAI_{max} sont d'environ 5 pour les hêtres et de 4 pour les douglas ;
- De faibles accroissements saisonniers pour les hêtres et les sapins sont observés en 2011 ;
- Un facteur de correction de 1.45 est appliqué aux capteurs de flux de sève saisonniers alimentés en 2010 avec une puissance de 0.26 W ;
- La forte variabilité de calibration entre les capteurs saisonniers est corrigée en 2011 à partir du capteur INRA et en 2010 à partir des relations $SFD=f(VPD)$;
- $SFD_{Hêtres} > SFD_{Douglas} > SFD_{Sapin}$;
- La densité de flux de sève (SFD) mesurée sur les 2 premiers cm de l'aubier du douglas peut-être appliquée telle quelle sur 22 % de la surface des douglas ;
- La transpiration des hêtres est supérieure à celle des douglas en période de végétation ;
- Bonne correspondance entre la transpiration mesurée et modélisée en 2010 et 2011 ;
- Les transpirations moyennes annuelles modélisées sur la période 1998-2011 sont de 212 mm pour les hêtres et de 225 mm pour les douglas, pour les calculs de RU moyens.

Chapitre V

V. EVALUATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR)

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats des différentes méthodes développées pour l'estimation de l'ETR. La méthode du bilan hydrique du sol, la méthode analytique et l'eddy covariance sont comparées en 2010 et 2011 sur des pas de temps communs et en prenant en compte les effets de représentativité spatiale, dans le but i) de valider les flux de vapeur d'eau mesurés par eddy covariance et de pouvoir les utiliser de manière rétrospective et ii) de tester si la distinction des espèces à partir de la mesure par eddy covariance est réalisable. La mesure par eddy covariance (ET) est finalement analysée en comparaison aux sorties du modèle BILJOU© de 1998 à 2011. L'Annexe 13 présente, sur cette base, et à partir des flux de carbone, une première estimation de la WUE de 1998 à 2008.

Les méthodes de bilan hydrique du sol et d'eddy covariance évaluent l'ETR sans distinction de ses composantes, alors que la méthode analytique précise la contribution des flux de transpiration et d'interception. Les estimations de l'ETR par la méthode du bilan hydrique du sol se basent sur les mesures réalisées au niveau du sol, analysées au Chapitre III. Concernant la méthode analytique, les résultats sur les flux d'interception sont développés dans ce chapitre. Les résultats sur les flux transpiratoires, composante principale de l'ETR dans les écosystèmes forestiers, ont été développés dans le Chapitre IV. L'analyse des flux de vapeur d'eau mesurés par eddy covariance (ET) est présentée dans ce chapitre. La variabilité interannuelle d'ET et les relations ET-climat sont analysées de 1998 à 2011.

V.1. La méthode par eddy covariance (ET)

L'acquisition de 15 années de mesures d'évapotranspiration réelle sur le site de Vielsalm, peu ou pas exploitées jusqu'à lors, a été une motivation importante pour initier ce doctorat. Avant de pouvoir exploiter cette base de données, plusieurs questions se sont posées. Quelle est la validité des données? Quelle est la représentativité des mesures? La distinction des espèces est-elle réalisable à partir de la mesure d'ET? Le

changement de tour en 2009 apporte-t-il une modification dans la mesure d'ET ?

L'évolution annuelle d'ET et la cohérence des données, vis-à-vis de la littérature et des variables climatiques sont analysées de 1998 à 2011 au paragraphe suivant. Les questions de représentativité spatiale et de la validation des données sont abordées au paragraphe V.4, au travers de la comparaison des différentes méthodes d'évaluation de l'ETR.

L'analyse d'ET et la comparaison avec les autres méthodes d'évaluation de l'ETR, sera réalisée en distinguant les jours avec ou sans pluie, de façon à cibler soit les flux transpiratoires, soit l'ensemble des flux d'évapotranspiration (Equation 2). A partir de la méthode analytique, pour laquelle nous ne prenons pas en compte ET_u, nous faisons l'hypothèse les jours sans pluie qu'ET est équivalente aux flux transpiratoires.

V.1.1. Analyse d'ET : variabilité interannuelle et changement de la tour

Les analyses interannuelles d'ET, de 1998 à 2011, révèlent des différences significatives à partir de 2009, avec l'ensemble des autres années (Figures V.1 à V.3). Les comparaisons annuelles ou saisonnières ne prennent pas en compte l'année 2009, en raison du pourcentage important de données absentes suite au changement de la tour. En 2010 et 2011, l'ET mesurée est supérieure à la moyenne de 27 % (Figure V.1), alors que les écarts maximums enregistrés sont environ de ± 15 %, de 1998 à 2008. Cette surestimation se retrouve sur l'ensemble des mois de mars à octobre (Figure V.2). De mai à septembre, la moyenne 2010-2011 est supérieure d'environ 26 % à celle de 1998-2008. Pour les mois de mars, avril et octobre, les surestimations sont de 85, 63 et 97 % respectivement.

Dans le but de s'affranchir au maximum des conditions climatiques pour la comparaison interannuelle d'ET, l'ET journalière moyenne est analysée par classe de VPD moyen journalier (Tableau V.1 ; Figures V.3 et V.5). La réponse d'ET au VPD est supérieure de 2009 à 2010, écartant alors l'hypothèse d'une demande climatique plus importante ces 3 dernières

années (Figure V.3). Cela se vérifie également par le nombre de jours pour les classes à fort VPD (classes 3 à 5) de ces 3 années, qui sont en moyenne identiques aux autres années (Figure V.4). Quelle que soit la classe de VPD, l'année 2009 présente une hausse des valeurs de ET supérieure à celle de 2010 et 2011. Le changement de tour, et donc de hauteur de mesure, semble donc avoir apporté une modification dans l'évaluation de ET. Cette hausse semble toutefois évoluer entre 2009 et 2010-2011, ainsi qu'en fonction des classes de VPD (Figures V.3 et V.5).

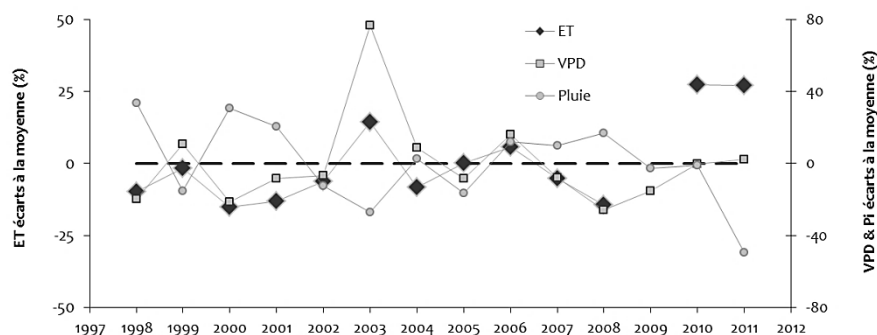


Figure V.1: Ecart annuel à la moyenne de 1998 à 2011 exprimés en %, de l'évapotranspiration réelle (ET; sommes de mars à octobre), du VPD (moyennes de mars à octobre) et de la pluviométrie (sommes de mars à octobre). En 2009, les données d'ET ne sont pas représentées.

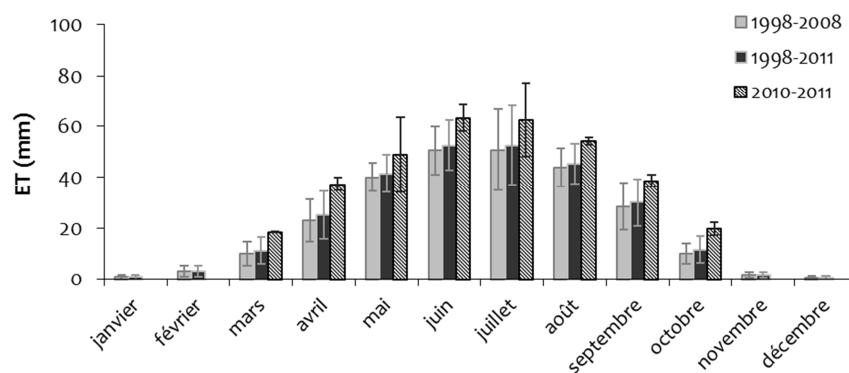


Figure V.2 : Evolution moyenne et écart-types mensuels de 1998 à 2008, de 1998 à 2011 et de 2010 à 2011, de l'évapotranspiration réelle mensuelle mesurée par eddy covariance (ET).

	VPD1	VPD2	VPD3	VPD4	VPD5
Classes VPD (hPa)	≤ 1	$]1 ; 3]$	$]3 ; 5]$	$]5 ; 7]$	>7
Moyenne ETP	0,4 (0,3)	1,2 (0,7)	2,4 (0,8)	3,2 (0,8)	4,1 (0,8)

Tableau V.1 : Classes de VPD journalier (hPa) et moyenne et écart-type de l'ETP journalière calculée pour les jours correspondant à chaque classe de 1998 à 2011.

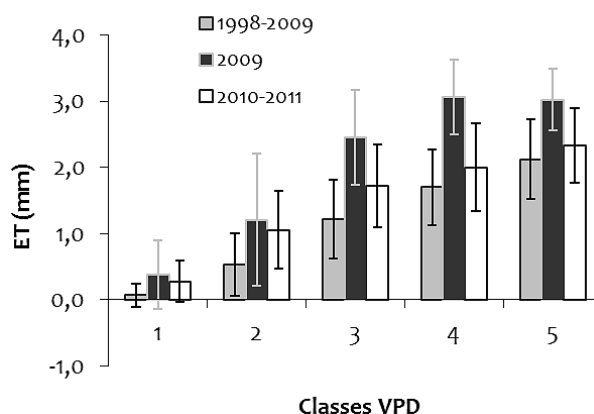


Figure V.3 : Moyennes de janvier 1998 à mars 2009, de juillet à décembre 2009 et de 2010 à 2011 de l'évapotranspiration réelle, ET, journalière, par classe de VPD. Les écart-types sont indiqués sur chaque barre de l'histogramme.

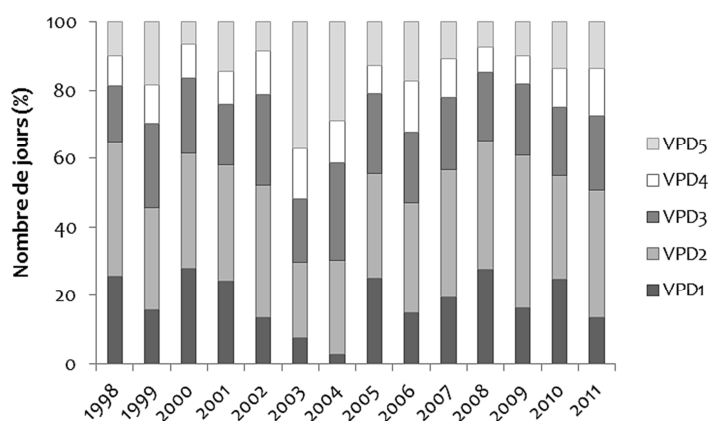


Figure V.4 : Nombre de jours de mars à octobre, en % par années, en fonction des classes de VPD de 1998 à 2011. L'année 2009 dans cette analyse ne compte que 133 jours (données manquantes), contrairement aux autres qui en comptent 245.

Jusqu'à la classe de VPD2, et en particulier pour VPD1, les années 2009 à 2011, présentent des écarts à la moyenne d'ET en valeur absolue (moyenne de 1998 à 2008), largement supérieurs aux autres années : en comparaison en valeur absolue, à l'écart à la moyenne le plus important mesuré de 1998 à 2008 (77 et 51 % pour les classes de VPD 1 et 2 respectivement), les années 2009 à 2011 présentent des écarts supérieurs en moyenne de +119 et +25 % pour les classes de VPD 1 et 2 respectivement (Figure V.5).

À partir de la classe de VPD3, l'année 2009 se distingue de 2010 et 2011. Cette année-là correspondant à l'année du changement de la tour nous ne la prendrons pas en compte dans les analyses futures. Pour 2010 et 2011, les écarts à la moyenne à partir de VPD3 sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés de 1998 à 2008. En 2011, la réponse d'ET au VPD est de manière générale plus faible qu'en 2010 (Figure V.5) en particulier pour la dernière classe de VPD.

Pour les classes 1 à 4 de VPD de 1998 à 2008, à partir des relations des écarts à la moyenne annuels d'ET en fonction des sommes journalières de VPD annuelles, les écarts à la moyenne de 2009 à 2011 sont modélisés (Figures V.6 et V.7). Pour les classes de VPD 3 et 4, les écarts à la moyenne mesurés sont supérieurs aux modèles (respectivement de 27 et 18 % en 2010 et de 28 et 13 % en 2011 ; Figure V.7). Ces écarts restent dans l'ordre de grandeur des résidus observés sur les relations de 1998 à 2008, pour chaque classe de VPD (Figure V.6). À partir de VPD3 il n'est alors pas possible de conclure sur un changement de la mesure en 2010 et 2011, en comparaison à la période 1998-2008. Les modèles viennent par contre confirmer la surestimation des mesures en 2009, quelle que soit la classe de VPD. Cependant, ces différences peuvent être dues à la différence d'effectifs pris en compte entre 2009 et les autres années (-45 %).

À la vue de ces résultats il est alors intéressant de se demander ce qui distingue les 2 premières classes de VPD des autres, pouvant expliquer la surestimation d'ET constatée en 2010-2011 pour ces dernières. Un facteur distinguant les 2 premières classes de VPD des autres est le nombre de jours pluvieux (Figure V.8). Les classes 1 et 2 de VPD comprennent sur la période de 1998 à 2011, respectivement 90 % et 70 % de jours pluvieux.

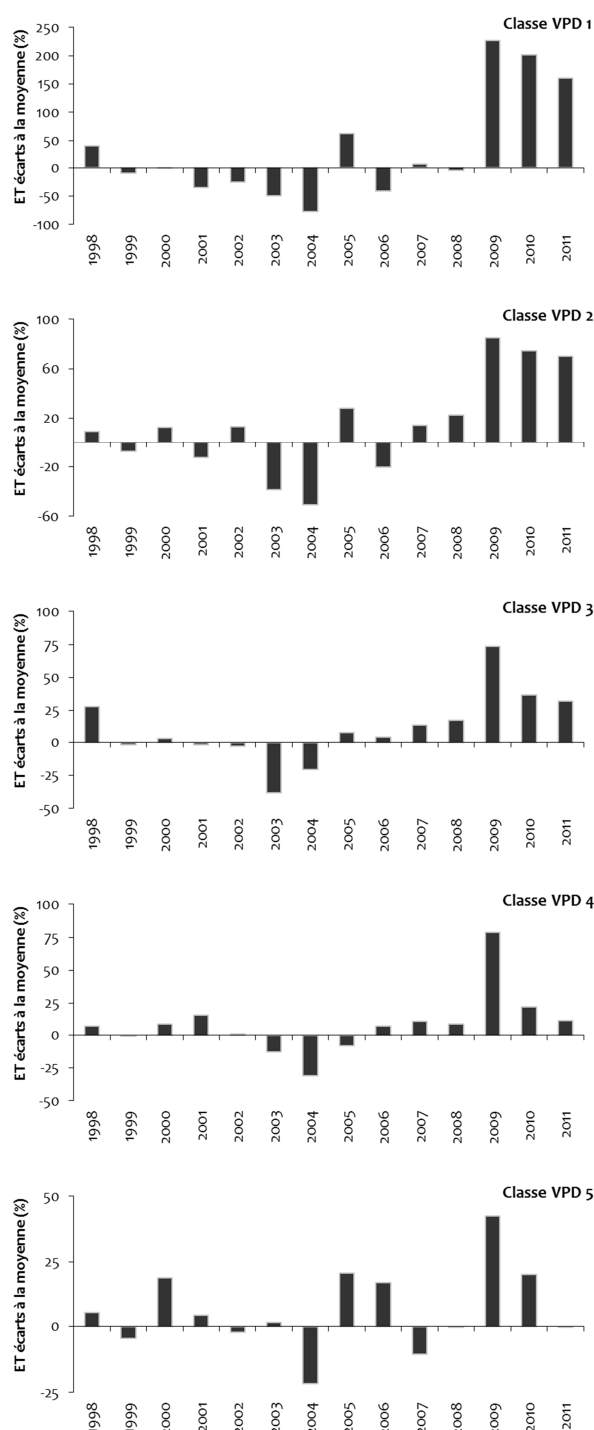


Figure V.5 : Évolution interannuelle, de 1998 à 2011, par classe de VPD, de l'écart à la moyenne (moyenne calculée de 1998 à 2008) de l'évapotranspiration réelle journalière (ET) mesurée par eddy covariance, exprimé en pourcentage. Les données annuelles correspondent aux flux mesurés de mars à octobre.

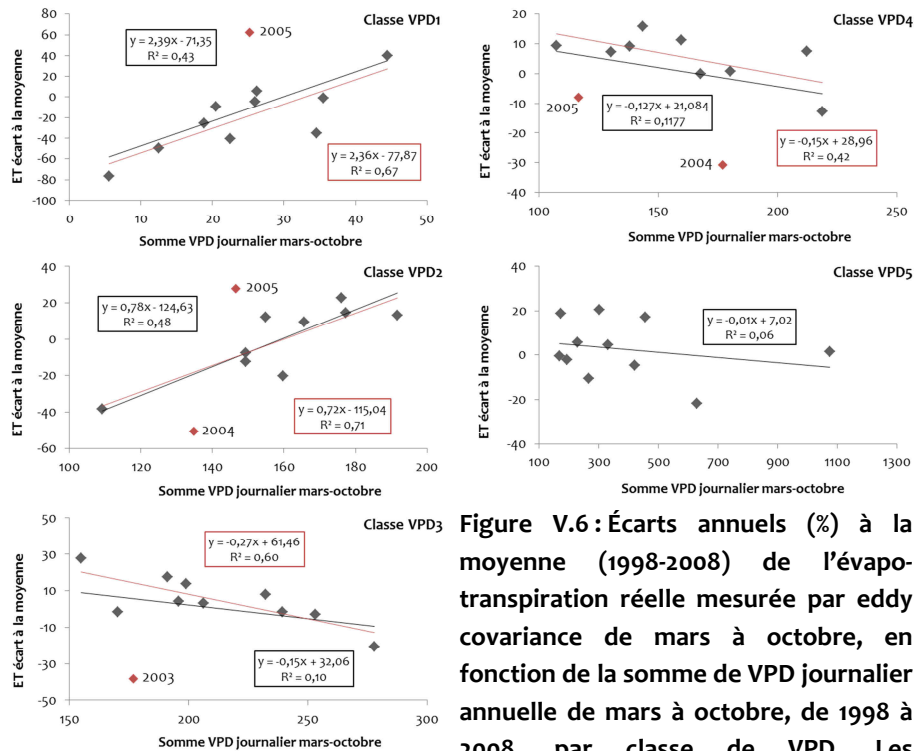
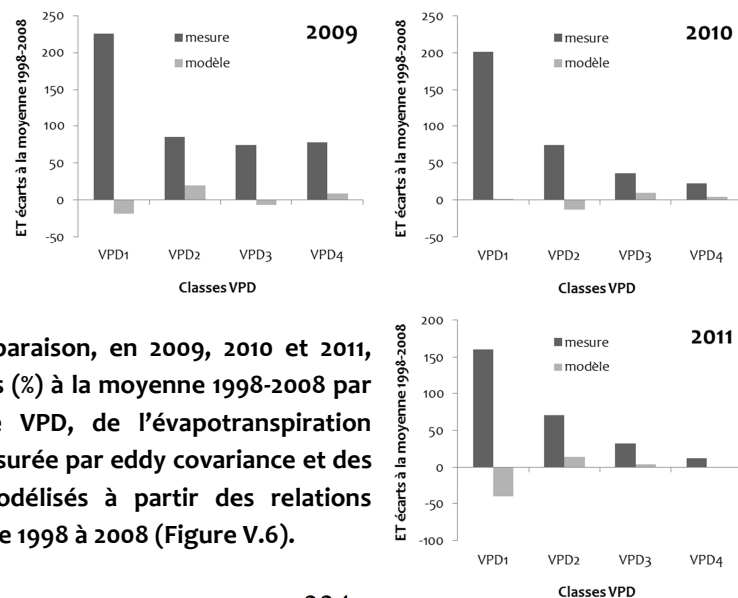


Figure V.6: Écarts annuels (%) à la moyenne (1998-2008) de l'évapotranspiration réelle mesurée par eddy covariance de mars à octobre, en fonction de la somme de VPD journalier annuelle de mars à octobre, de 1998 à 2008, par classe de VPD. Les régressions linéaires sont établies avec ou sans les losanges rouges (années indiquées).



V.7: Comparaison, en 2009, 2010 et 2011, des écarts (%) à la moyenne 1998-2008 par classe de VPD, de l'évapotranspiration réelle mesurée par eddy covariance et des écarts modélisés à partir des relations établies de 1998 à 2008 (Figure V.6).

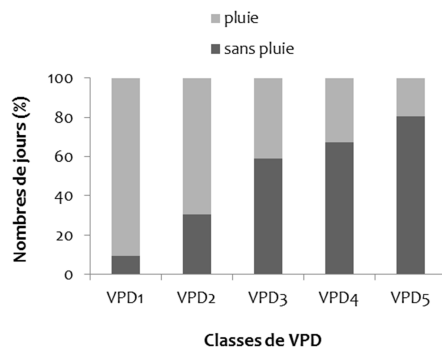


Figure V.8 : Proportion au sein de chaque classe de VPD, des nombres de jours avec et sans pluie, de 1998 à 2011.

Granier et al. (2000) constatent entre l'évaluation de l'ETR par eddy covariance et la méthode analytique de meilleures relations pour les jours sans pluie. Les auteurs expliquent ce phénomène soit par une sous-estimation des flux de vapeur d'eau à certaines fréquences par la méthode d'eddy covariance, soit par une sous-estimation de la mesure lorsque l'anémomètre est mouillé, les jours de pluie. Meiresonne et al. (2003) reportent également de possibles difficultés du système d'eddy covariance à mesurer les flux de vapeur d'eau lors de journées pluvieuses, en raison de l'accumulation de l'eau à l'entrée de la pompe, humidifiant alors le filtre. Une autre explication peut provenir des routines de remplacement des données absentes (Oishi et al., 2008). Lorsque les capteurs restent humides la proportion de données non valides augmente. Ces données sont remplacées à partir de relations obtenues lors de conditions sèches, ne pouvant alors pas complètement tenir compte des taux d'évaporation potentiellement élevés de la canopée et du sol à la suite d'évènements pluvieux.

Pour les classes de VPD 2 à 4, les jours avec ou sans pluie ont été séparés pour l'analyse des écarts à la moyenne d'ET (Figure V.9). Les classes de VPD 1 et 5, n'ont pas été prises en compte en raison des faibles effectifs de jours avec (classe 5), ou sans pluie (classe 1). Pour les journées sans pluie, de VPD 2 à 4, les écarts d'ET à la moyenne calculés en 2010 et 2011 sont compris dans la gamme des écarts observés entre 1998 et 2008 (Figure V.9). Pour les journées pluvieuses par contre, les écarts restent hors de la gamme observée entre 1998 et 2008 (+20 à +100 %, de l'écart le plus important observé entre 1998 et 2008 en valeur absolue, selon l'année et la gamme de VPD). Le changement de mesure à partir de 2009 semble donc bien en partie lié aux évènements pluvieux. Ces résultats seront plus amplement discutés à

la suite de cette section, avec la comparaison des différentes mesures de l'ETR sur le site en 2010 et 2011 et de ET avec la modélisation de l'ETR par BILJOU© depuis 1998, afin de pouvoir juger quelle période, avant ou après le changement de la tour, semble donner les estimations d'ET les plus fiables lors d'évènements pluvieux.

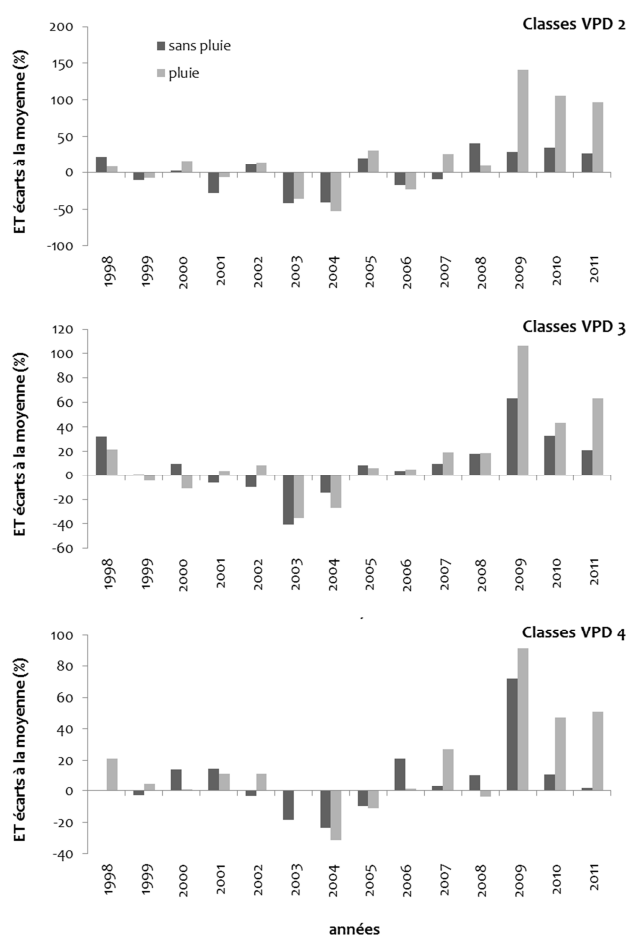


Figure V.9 : Évolution interannuelle, de 1998 à 2011, par classe de VPD, de l'écart à la moyenne (moyenne calculée de 1998 à 2008) de l'évapotranspiration réelle journalière, ET, exprimé en pourcentage. Les données annuelles correspondent aux flux mesurés de juin à septembre.

En écartant les 3 dernières années de mesures des analyses, les écarts à la moyenne sont relativement faibles, de 1998 à 2008, excepté pour 2003 (+20 % ; Figure V.10), année présentant la demande évaporative la plus

importante sur l'ensemble de la saison de végétation, et reconnue comme sèche sur une grande partie de l'Europe (Bréda et al., 2006; Granier et al., 2007). Ces observations sont bien corrélées avec les écarts à la moyenne du VPD (données journalières de 1998 à 2008 : corrélation = 0.87). L'ET moyenne annuelle de 1998 à 2008 est de 263 mm. En 2003 elle atteint 316 mm.

Les écarts à la moyenne de l'ET journalière, par classe de VPD, des années 2003 et 2004 sont négatifs de la classe de VPD 1 à 4, et également pour VPD5 en 2004 (Figure V.5). En valeur absolue, les écarts à la moyenne mesurés en 2004 sont les plus importants de 1998 à 2008 pour les classes de VPD 1 à 2 et 4 à 5. Pour VPD3, l'année 2003 présente l'écart à la moyenne le plus fort. A l'opposé, l'année 2005 présente généralement une ET moyenne journalière par classe de VPD supérieure à la moyenne (Figure V.5). Ces 3 années-là sont celles qui, par classe de VPD, s'écartent des relations établies entre les écarts d'ET à la moyenne et les sommes de VPD journalières (Figure V.6, losanges rouges). Pour 2004, l'écart est significativement différent des autres années à partir de VPD4. Pour VPD3, la différence n'est pas significative uniquement avec 2003. Pour ces deux années l'hypothèse d'une limitation de la réponse des arbres à la demande évaporative de l'air semble être pouvoir envisagée. Malgré une réponse plus faible d'ET au VPD en 2003, l'ET annuelle mesurée cette année est la plus forte entre 1998 et 2008. Cela est dû au nombre de jours pour des classes de VPD élevées, plus important en 2003 (Figure V.4).

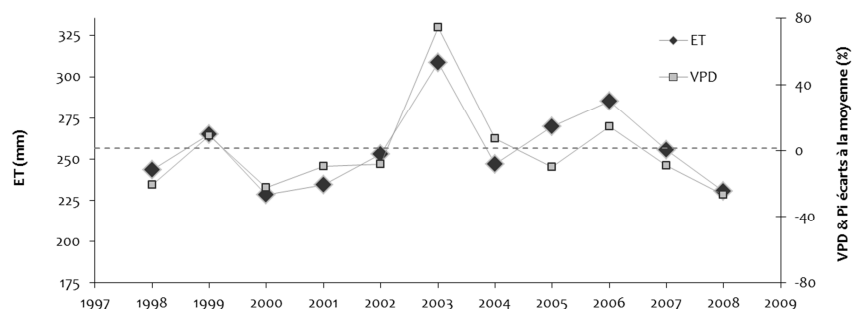


Figure V.10 : Ecarts annuels à la moyenne 1998-2008, de l'évapotranspiration réelle (ET, mm ; sommes de mars à octobre), du VPD (% ; moyennes de mars à octobre) et de la pluviométrie (% ; sommes de mars à octobre), de 1998 à 2008.

V.1.2. Analyse d'ET : distinction de la provenance des flux

Afin de pouvoir distinguer un effet « espèce » dans le traitement des flux d'évapotranspiration issus de la mesure par eddy covariance, ces derniers ont été analysés en fonction de la direction du vent. Aubinet et al. (2005) distinguent pour les flux de carbone des différences significatives en fonction de la direction du vent. Pour rappel (Section II.7.1), trois secteurs ont été définis selon les principales directions de vent et la position des espèces, le secteur NE (330° à 90°), le secteur SE (90° à 210°) et le SW (210° à 330°). Les variations interannuelles analysées jusqu'à présent, sont issues à l'échelle de la demi-heure à 50 % d'une direction de vent provenant du secteur SW, secteur où l'on distingue une majorité de feuillus. A proximité de la tour, le secteur NE est composé en grande majorité par des résineux, dont une forte proportion de douglas. Les analyses suivantes se concentrent sur les secteurs SW et NE. Aubinet et al. (2001, 2002) montrent que le secteur NE est généralement associé à des conditions anticycloniques (ensoleillées), alors que le secteur SW est davantage associé à des conditions cycloniques. Afin de palier à ce biais, la méthode d'analyse des moyennes journalières d'ET par classe de VPD est appliquée en fonction du secteur (Figure V.11). Les mois de LAI maximum pour les feuillus sont ciblés, soit de juin à septembre, afin que les éventuelles différences entre secteurs ne puissent pas être attribuées à des changements de surface foliaire. Les données sont sélectionnées de 1998 à 2008.

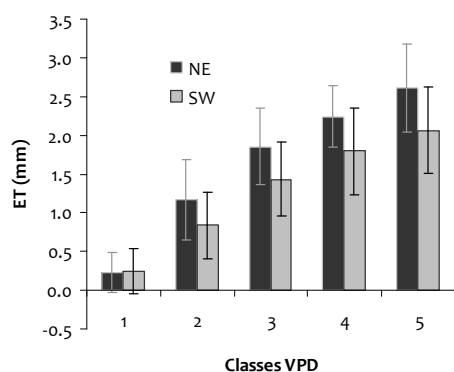


Figure V.11 : Moyennes de 1998 à 2008 pour les mois de juin à septembre, de l'évapotranspiration réelle, ET, journalière, en fonction des classes de VPD et des secteurs de vent. Les écart-types sont indiqués sur chaque barre de l'histogramme.

Hormis pour la classe de VPD 1 (faibles effectifs pour le secteur NE), les flux d'ET moyens pour les journées à vent NE sont supérieurs au flux des journées à vent SW (différences significatives à partir de la classe 2). En moyenne, par ordre croissant de classe de VPD de 2 à 5, les flux de secteur NE surestiment les flux de secteur SW de 40, 29, 25 et 27 %.

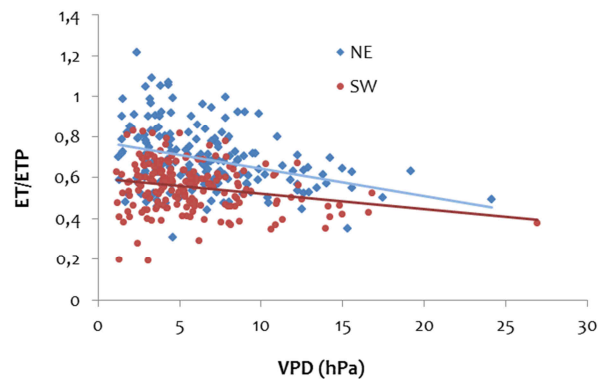


Figure V.12 : Rapport de l'évapotranspiration réelle journalière mesurée par eddy covariance (ET), sur l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP), en fonction du VPD moyen journalier, pour les jours sans pluie, en fonction du secteur (NE et SW), durant les périodes de LAI_{max} (juin à septembre), de 1998 à 2008.

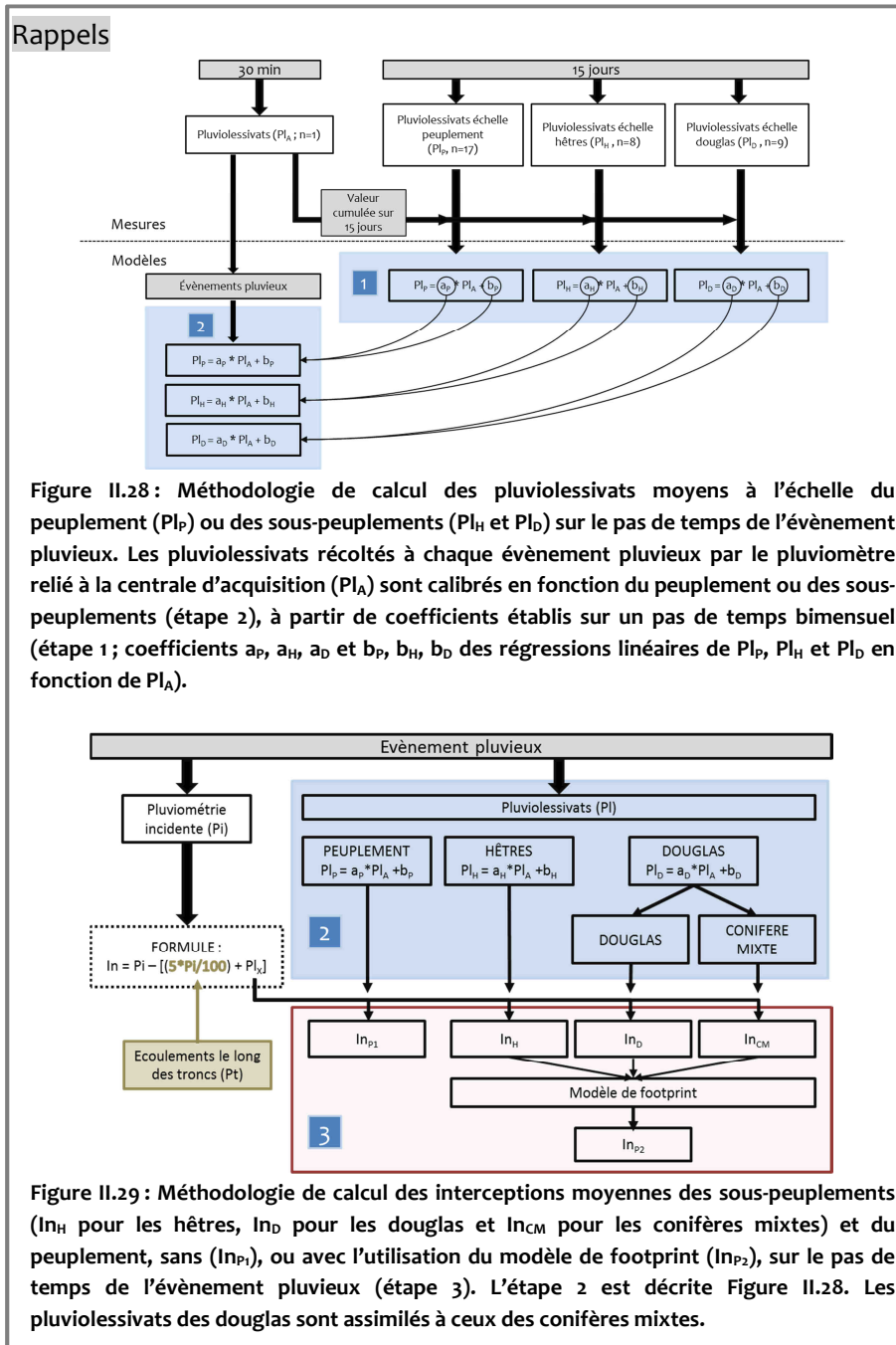
En associant avec prudence les secteurs géographiques à des espèces, l'évapotranspiration mesurée provenant du secteur des résineux est supérieure à celle provenant du secteur des feuillus, quelle que soit la classe de VPD (Figures V.11 et V.12). Par contre, nous avons pu constater par la mesure des flux transpiratoires que la réponse des feuillus au VPD et les quantités d'eau transpirées, à conditions climatiques égales, sont généralement plus élevées pour le sous-peuplement de hêtres. L'interprétation des mesures par eddy covariance à l'échelle de l'espèce pour un site aussi hétérogène que celui de Vielsalm est difficile. La méthode d'analyse des moyennes journalières d'ET par classe de VPD telle qu'elle a été développée reste simpliste face à l'anisotropie des conditions climatiques observées. De plus, les conditions édaphiques ne sont pas prises en compte et les effectifs sont différents en fonction des secteurs et des classes de VPD.

La différence observée entre les secteurs peut être également attribuée aux différences de surfaces foliaires (LAI) prises en compte en fonction du footprint, potentiellement plus élevées pour le secteur des résineux que pour le secteur des feuillus. Il est également important de rappeler que le secteur composé majoritairement de feuillus comporte tout de même une partie non négligeable de résineux. Puis, le sous-étage des douglas étant plus développé que sous les hêtres, l'hypothèse d'une évapotranspiration du sol et du sous-bois (ETu) négligeable peut être remise en question, pouvant alors contribuer à la différence de mesure entre les 2 secteurs.

V.2. La méthode analytique (ETR)

Au travers de ce paragraphe, l'ETR est évaluée et comparée pour chaque sous-peuplement, hêtre et douglas, en sommant les flux de transpiration et d'interception mesurés. Les mesures de pluviollessivats sur la Parcelle témoin sont à la base des calculs de flux d'interception présentés ici. Les flux d'interception mesurés sont comparés aux sorties du modèle BILJOU© sur le pas de temps saisonnier. La mesure de l'ETR par la méthode analytique peut être réduite au minimum au pas de temps de l'évènement pluvieux, correspondant au pas de temps de mesure des flux d'interception. L'analyse de l'ETR (somme et contribution des composantes) est limitée dans ce paragraphe au pas de temps saisonnier. Le pas de temps évènement pluvieux sera utilisé lors de la comparaison des différentes méthodes d'évaluation de l'ETR en 2010 et 2011 (Section V.4.1).

V.2.1. Pluviolessivats, écoulements le long des troncs et interception de la pluviométrie incidente



Les moyennes de pluvioléssivats (PI , mm) en fonction du sous-peuplement sont significativement différentes ($Z = 3.54$, $\text{Prob.} > |Z| = 0.0004$; Figure V.13). Sur l'ensemble des données récoltées les pluvioléssivats mesurés représentent 87 % de la pluviométrie incidente dans le cas du hêtre et 68 % dans le cas du douglas. La pluie arrivant au sol par cette voie est donc supérieure pour le sous-peuplement de hêtres. Nous ne constatons pas de différences significatives entre les pluviomètres à augets basculants et ceux équipés de bidons.

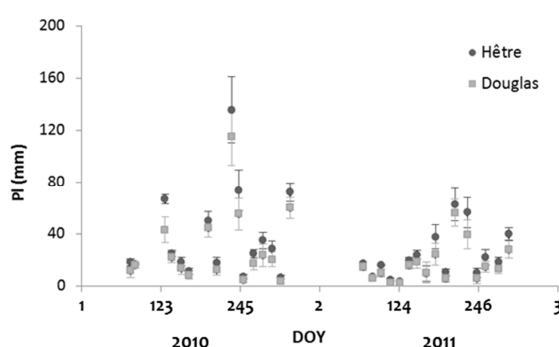


Figure V.13 : Moyennes et écart-types des pluvioléssivats récoltés par sous-peuplement, hêtre (PI_H , mm) et douglas (PI_D , mm) sur des périodes de 15 jours, de 2009 à 2011 (9 à 10 pluviomètres sous-couvert par sous-peuplement).

Les régressions entre les moyennes bimensuelles des pluvioléssivats à l'échelle des sous-peuplements ou du peuplement mixte et ceux récoltés à l'aide du pluviomètre branché à la centrale d'acquisition (Figure II.28 étape 1 et Figure V.14) permettent d'obtenir *in fine* une évaluation des pluvioléssivats à l'échelle de l'évènement pluvieux, représentative des hêtres et des douglas ou du peuplement mixte (Figure II.28 étape 2).

En tenant compte d'un écoulement le long des troncs équivalent à 5 % de la pluviométrie incidente, l'interception est calculée par évènement pluvieux, à partir de la différence entre la pluviométrie incidente et la quantité de pluvioléssivats déterminée par sous-peuplement (Figure II.29 étape 3 et Figure V.15). L'interception, exprimée en fonction de la pluviométrie incidente, suit généralement une exponentielle décroissante (Aussenac, 1968). Les mesures sur le site suivent cette tendance mais avec une forte variabilité, principalement pour $P_i < 5$ mm (Figure V.15). Les R^2 des ajustements sont de 0.58 et 0.54 pour les hêtres et les douglas respectivement. La variabilité s'accroît plus P_i est faible. Cette variabilité est liée à la nature des évènements pluvieux (autre que la quantité) et sans

doute au dispositif de mesure. Selon l'intensité et le moment de l'évènement pluvieux (jour ou nuit) et la demande évaporative de l'air, la capacité de saturation du couvert et les flux d'évaporation sont modifiés, affectant alors la quantité de pluviolessivats pour des P_i équivalentes. Par ailleurs, la pluviométrie incidente est mesurée en un seul point (sur la tour) limitant sa représentativité spatiale.

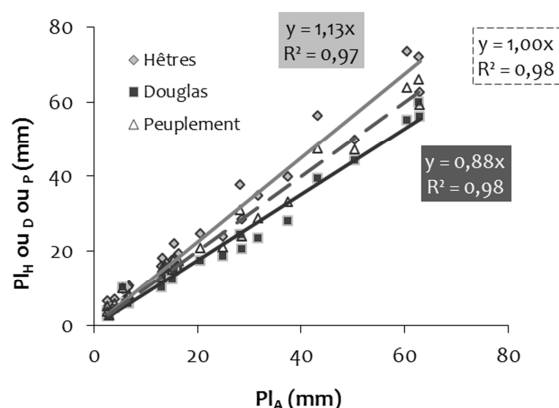


Figure V.14 : Pluviolessivats (mm) moyens mesurés à l'échelle du peuplement (PI_P , Parcelle témoin) ou des sous-peuplements (Hêtres PI_H et douglas PI_D) en fonction des pluviolessivats mesurés de façon automatique (PI_A). Les équations linéaires (ordonnée à l'origine forcée à 0) et les R^2 associés sont indiqués.

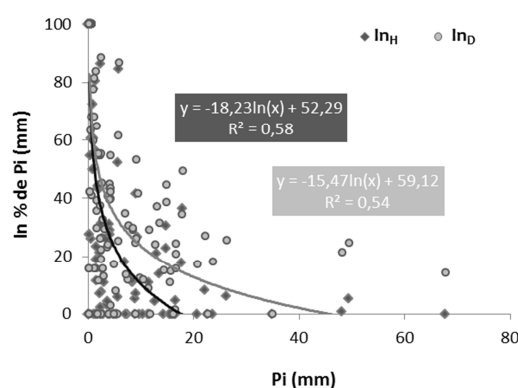


Figure V.15 : Interception exprimée en pourcentage de la pluviométrie incidente, mesurée sur le pas de temps des évènements pluvieux, pour les sous-peuplements de hêtres (In_H) et de douglas (In_D), en fonction de la pluviométrie incidente. Les équations et R^2 des régressions logarithmiques calculées sont indiquées en fonction des sous-peuplements.

En moyenne, sur l'ensemble des périodes de végétation 2010-2011, l'interception est estimée à 10 % et 23 % de la pluviométrie incidente, pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas respectivement. La différence est significative entre les espèces avec un taux d'interception plus de deux fois supérieur pour le sous-peuplement de douglas. En théorie, la recharge du sol pour les douglas sera alors moindre que pour les hêtres. Aussenac (1968) pour une jeune hêtraie (30 ans) en mélange avec du charme, mesure une interception moyenne en période feuillée de 18.6 % de P_i . Aussenac et Boulangeat (1980) pour une hêtraie de 80 ans (743 tiges à l'hectare), calculent une interception moyenne de 21 % en été, et pour une jeune forêt de douglas de 37 % sur l'ensemble de l'année. Ils associent principalement la différence entre les 2 peuplements à la capacité de saturation du houppier, en précisant que la densité de tiges à l'hectare influence l'interception mais que les pertes ou les gains peuvent être compensés par écoulements le long des troncs. Granier et al. (2000) calculent pour une hêtraie d'altitude (forêt d'Aubure), comparable à Vielsalm en âge et en taille (120 ans, 22.5 m), mais de plus forte densité d'arbres à l'hectare (429 arb.ha⁻¹), une interception moyenne de 23.4 %. Les résultats sur le site de Vielsalm sont donc plus faibles que ceux rencontrés dans la littérature. La différence peut s'expliquer en partie, par la structure des sous-peuplements. Relativement âgés, ils ont subi déjà plusieurs éclaircies et/ou des cas de mortalité pour les hêtres durant les années 1999 à 2001 (Section II.1.1), provoquant alors une certaine hétérogénéité dans la fermeture du couvert à l'échelle de la Parcelle témoin. Les écarts restent tout de même importants et seront discutés plus loin.

Sur l'ensemble des périodes de végétation pour les hêtres, BILJOU© modélise une interception supérieure de 120 et 176 % aux mesures, en 2010 et 2011 respectivement (Figure V.16). Pour les douglas l'interception modélisée représente -20 et +48 % des mesures, pour 2010 et 2011 respectivement (Figure V.16).

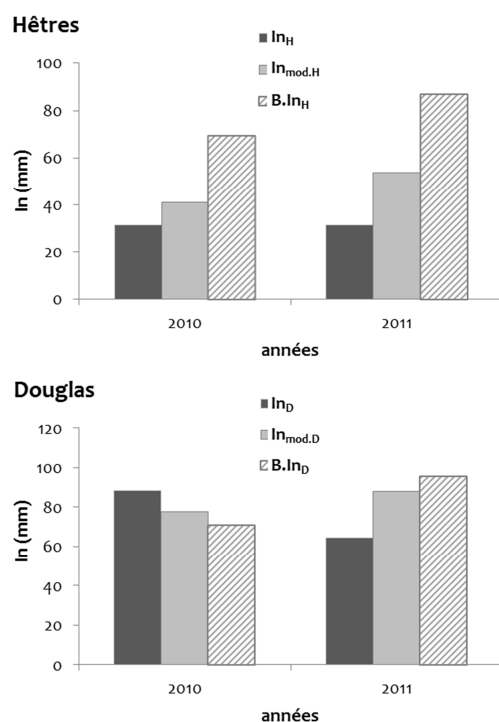


Figure V.16 : Cumul de l'interception (mm) en 2010 (DOY 171 à 275) et en 2011 (DOY 127 à 282), mesurée (In_H et In_D), modélisée à partir de la relation entre l'interception mesurée et la pluviométrie incidente ($In_{mod.H}$ et $In_{mod.D}$; Figure V.15), et modélisée par BILJOU® sur le pas de temps journalier ($B.In_H$ et $B.In_D$), pour les sous-peuplements de hêtres (en haut) et de douglas (en bas).

Les écarts sont particulièrement importants pour le sous-peuplement de hêtres. Le calcul par BILJOU® de l'interception sur un pas de temps journalier peut créer des différences en comparaison au pas de temps de l'évènement pluvieux considéré pour les mesures. De plus comme précisé précédemment, les sous-peuplements sont assez hétérogènes, sortant alors des conditions optimales pour le fonctionnement de BILJOU® considérant la canopée comme une entité homogène (modèle « big leaf »). Concernant les régressions obtenues à partir des mesures d'interception bimensuelles (Figure V.15), leur utilisation pour le calcul de l'interception journalière en fonction de P_i ($In_{mod.H}$ et $In_{mod.D}$) résulte sur la saison, en un écart nul et de -30 % et -12 % en 2010 et de +71 % et +36 % en 2011 par rapport aux mesures, pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas respectivement

(Figure V.16). $In_{mod,H}$ et $In_{mod,D}$ fournissent alors des résultats saisonniers intermédiaires entre les mesures et BILJOU© (Figure V.16). Malgré tout, les R^2 des régressions ne sont pas très élevés (Figure V.15) et la détermination journalière reste alors approximative.

V.2.2. L'ETR

En moyenne, sous-peuplements confondus, l'ETR calculée est de 216 mm en 2010 pour 105 jours de mesures et de 250 mm en 2011 pour 157 jours (Figure V.17). Une valeur journalière moyenne serait alors toutes espèces confondues de 2.1 mm en 2010 et de 1.6 mm en 2011. Par sous-peuplement, l'ETR moyenne journalière est de 1.9 et 2.2 mm en 2010, et de 1.7 et 1.5 mm en 2011, pour les hêtres et les douglas respectivement.

Concernant la répartition des flux au sein de l'ETR, la transpiration représente en moyenne, sous-peuplements confondus, 73 % de l'ETR en 2010 et 81 % en 2011. En moyenne sur les deux années, la transpiration représente 86 % de l'ETR pour le sous-peuplement de hêtres et 67 % pour le sous-peuplement de douglas (Figure V.17).

Quelle que soit l'espèce, et en particulier pour le douglas, le pourcentage de la transpiration au sein de l'ETR est plus important en 2011 (+4 % et +16 % respectivement). Pour une espèce, c'est l'ensemble des conditions climatiques et édaphiques qui vont réguler la variabilité interannuelle de l'ETR, ainsi que les proportions de la transpiration et de l'interception au sein de celle-ci. Si l'ETR augmente, soit la transpiration et/ou l'interception augmentent. Sans limitation hydrique au niveau du sol, l'ETR est alors régulée par la demande évaporative et le régime pluviométrique (durée et intensité) saisonnier.

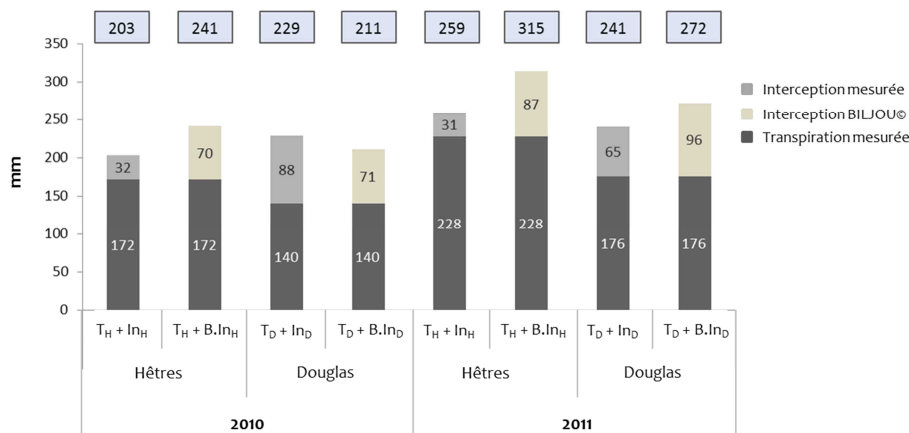


Figure V.17 : Cumuls saisonnier de l'évapotranspiration réelle (ETR, mm ; rectangles bleus) calculée comme la somme des flux de transpiration (T_H et T_D , mm) mesurés et d'interception (In_H et In_D , mm) mesurés ou modélisés par BILJOU® ($B.In_H$ et $B.In_D$, mm) pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas, pour 2010 (DOY 171 à 275) et 2011 (DOY 127 à 282).

Pour des périodes équivalentes (de juillet à septembre, données non détaillées), la pluviométrie incidente en 2010 est supérieure de 108 % à celle de 2011, mais est distribuée sur environ le même nombre de jours (56 et 48 jours respectivement) au cours des 3 mois. Les quantités interceptées en mm sont supérieures en 2010 (+57 % et +96 % pour les hêtres et les douglas respectivement), mais sans pour autant affecter le potentiel transpiratoire des arbres les autres jours de la saison. L'analyse de l'évolution mensuelle des flux (Annexe 10) montre que c'est principalement durant le mois d'août 2010 que les fortes précipitations ont provoqué la hausse de l'interception au sein de l'ETR.

Face aux incertitudes vis-à-vis des flux d'interception mesurés, l'utilisation de l'interception modélisée provoque une hausse générale des estimations de l'ETR, sauf pour les douglas en 2010. Une valeur journalière moyenne serait alors toutes espèces confondues de 2.2 mm en 2010 (soit +0.1 mm) et de 1.9 mm en 2011 (soit +0.3 mm). Par sous-peuplement avec l'utilisation de B.In, l'ETR moyenne journalière est alors de 2.3 et 2 mm en 2010, et de 2 et 1.7 en 2011, pour les hêtres et les douglas respectivement. Pour la répartition des flux au sein de l'ETR, la transpiration représente en

moyenne, sous-peuplements confondus, 69 % en 2010 et 2011. En moyenne sur les deux années, avec l'utilisation de B.In, la transpiration représente 72 % de l'ETR pour le sous-peuplement de hêtres et 66 % pour le sous-peuplement de douglas (Figure V.17).

V.3. La méthode du bilan hydrique du sol (ETR_{SOL})

Le calcul de l'ETR par cette méthode requiert à l'échelle de la saison l'utilisation du drainage modélisé par BILJOU®. L' ETR_{SOL} est calculée par sous-peuplement et pour chaque calcul de RU (Tableau V.2). Au sein d'une saison, les données ont été regroupées en fonction des périodes de vidange et de recharge du sol, les recharges entraînant souvent un dysfonctionnement des sondes de quelques heures à quelques jours. Un pas de temps journalier peut être envisagé en sélectionnant les jours sans pluie, jours pour lesquels P et D sont alors égaux à 0 et $ETR_{SOL} = \Delta R_t$ (Equation 1). Les flux d'évaporation et d'eau dans le sol consécutifs à une pluie pouvant se dérouler sur des durées supérieures au jour, l'ETR est également analysée à partir des 3^{èmes} jours consécutifs sans pluie (afin de s'assurer qu'In et D sont nuls).

	RU.i _H	RU.m _H	RU.s _H	RU.i _D	RU.m _D	RU.s _D
2010 Pi = 340.6 mm (92 j)						
ΔR_t	-7.1	-10.5	-13.9	11.5	15.5	19.4
B.Dr	124.9	121.9	122.6	135.0	134.9	134.2
B.Dr % de Pi	36.7	35.8	36.0	39.6	39.6	39.4
ETR _{SOL}	222.9	229.3	232.0	194.1	190.3	187.0
ETR _{SOL} jour	2.4	2.5	2.5	2.1	2.1	2.0
ETR _{SOL} jour sans pluie	1.5 (0.5)	2.0 (0.6)	2.6 (0.8)	1.4 (0.5)	1.8 (0.7)	2.2 (0.9)
ETR _{SOL} 3 ^{ème} jour sans pluie	1.7 (0.3)	2.4 (0.4)	3.0 (0.5)	1.4 (0.2)	1.9 (0.2)	2.4 (0.3)
2011 Pi = 217.4 mm (100 j)						
ΔR_t	-1.7	-2.3	-3.0	0.9	1.0	1.2
B.Dr	0.5	5.3	2.0	6.5	17.9	16.5
B.Dr % de Pi	0.2	2.0	0.7	2.4	6.7	6.1
ETR _{SOL}	218.6	214.4	218.4	210.0	198.5	199.7
ETR _{SOL} jour	2.2	2.1	2.2	2.1	2.0	2.0
ETR _{SOL} jour sans pluie	1.1 (0.5)	1.5 (0.6)	1.9 (0.8)	0.8 (0.4)	1.1 (0.5)	1.3 (0.6)
ETR _{SOL} 3 ^{ème} jour sans pluie	1.0 (0.5)	1.4 (0.7)	1.8 (0.8)	0.9 (0.4)	1.2 (0.5)	1.4 (0.7)

Tableau V.2 : Valeurs des composantes du bilan hydrique du sol, mesurées (Pi : pluviométrie incidente ; ΔR_t : variations de réserve en eau disponible du sol) et modélisée par BILJOU© (B.Dr : drainage), en 2010 (DOY 174 à 265) et en 2011 (DOY 168 à 267), en fonction des scénarios de RU envisagés (i : inférieur ; m : moyen ; s : supérieur), par sous peuplement (H : hêtres ; D : douglas). L'ETR_{SOL} est déduite de l'équation du bilan hydrique du sol (Equation 1). L'ETR_{SOL} moyenne jour est calculée comme le rapport de l'ETR_{SOL} cumulée durant la période de mesure sur le nombre de jours de mesure. L'ETR_{SOL} moyenne journalière et l'écart-type des mesures sont également fournis pour les jours sans pluie et les 3^{èmes} jours consécutifs sans pluie.

Quelle que soit l'année, l'ETR du sous-peuplement de hêtres déterminée par la méthode du bilan hydrique du sol (ETR_{SOL.H}), est supérieure à celle du sous-peuplement de douglas (-16 % en moyenne en 2010 pour ETR_{SOL.D} pour les 3 calculs de RU, et -7 % en 2011 ; Tableau V.2).

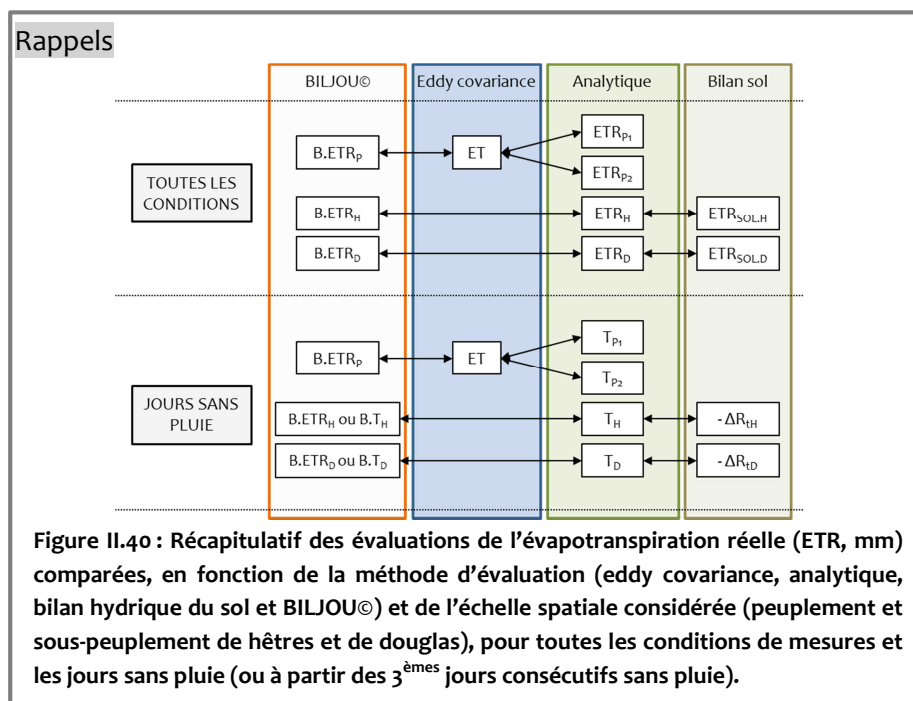
Pour les hêtres, l'ETR_{SOL.H} moyenne journalière est supérieure en 2010 en comparaison à 2011 (-12 % en 2011 ; Tableau V.2). Elles sont équivalentes pour les douglas (Tableau V.2). Les jours sans pluie, les valeurs moyennes journalières sont inférieures en 2011, pour les 2 espèces. Pour les calculs de RU moyens, les ETR_{SOL} moyennes calculés à partir des 3^{èmes} jours

consécutifs sans pluie, sont de 2.4 et 1.9 mm en 2010, et 1.4 et 1.2 mm en 2011, pour les sous-peuplements de hêtres et de douglas respectivement. Soit une baisse respective de 42 et 37 % respective entre 2010 et 2011.

En 2010, ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Schwärzel et al. (2009) dans un peuplement de hêtres comparable à celui-ci (98 ans et 30 m de hauteur moyenne, pour une densité de 331 arbres à l'hectare), et un peuplement d'épicéas. Ils calculent sur environ 1 mois, pour une période avec peu de précipitations et de fortes demandes évaporative, une ETR moyenne pour les hêtres de 2.4 mm.j^{-1} et pour les épicéas de 1.4 mm.j^{-1} .

En 2010, sur la saison, le drainage est important ($\approx 40 \%$ des précipitations, Tableau V.2), cependant ces quantités drainées sont réparties sur seulement quelques jours, en août, suite à de fortes précipitations (DOY 227 à 242 ; Figure III.19). Pour le reste de la saison en 2010 le drainage est très faible.

V.4. Inter-validation des méthodes d'estimation de l'ETR



Les différentes méthodes d'évaluation de l'ETR sont comparées entre elles pour les années 2010 et 2011 :

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{ET} & = & \text{ETR} & = & \text{ETR}_{\text{SOL}} & = & \text{B.ETR} \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \text{ET} & = & \text{T} + \text{In} & = & \text{Pi} - \text{Dr} - \Delta R_t & = & \text{B.T} + \text{B.In} + \text{B.ETu} \\
 \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} \\
 \text{eddy covariance} & & \text{analytique} & & \text{bilan sol} & & \text{Modélisation} \\
 & & & & & & \text{(BILJOU©)}
 \end{array}$$

Cette inter-validation des méthodes sur la période 2010-2011 fait l'objet du 1^{er} paragraphe de cette section. Le second paragraphe compare l'évapotranspiration réelle mesurée par eddy covariance au modèle BILJOU© de 1998 à 2011.

V.4.1. Comparaisons sur la période 2010-2011

La comparaison des différentes méthodes d'évaluation de l'ETR en 2010 et 2011 est tout d'abord réalisée **pour les jours sans pluie** ou 3^{ème} jours consécutifs sans pluie, afin d'assimiler l'ETR à la transpiration des espèces ligneuses (évapotranspiration du sol et du sous-étage, ETu négligée). Quelle que soit la méthode envisagée, les équations sont simplifiées pour les jours sans pluie puisque les flux d'interception et de drainage sont considérés comme nuls, soit : $\text{ET} = \text{T} = \Delta R_t = \text{B.T} + \text{B.ETu}$. La prise en compte uniquement des 3^{èmes} jours consécutifs sans pluie permet de s'assurer que les flux d'interception et de drainage sont réellement nuls, mais cette condition réduit considérablement le nombre de données dans les analyses. De plus, le pas de temps journalier n'est généralement pas bien adapté à la méthode du bilan hydrique du sol. Les analyses pour les jours sans pluie se concentrent alors sur la méthode analytique et d'eddy covariance. La comparaison de la méthode analytique et du bilan hydrique est présentée Annexe 11 (Section 1).

Concernant l'inter-validation des méthodes **pour l'ensemble des jours** en 2010 et 2011, leur réalisation est dépendante du pas de temps auquel chaque méthode est réductible. Dans un premier temps, les méthodes d'eddy covariance et analytique sont comparées, avec l'utilisation de l'interception mesurée (I_n) ou modélisée par BILJOU© ($B.I_n$). Dans un second temps, ces deux méthodes sont comparées aux évaluations de l' ETR_{SOL} . Pour conclure, les différentes mesures et la modélisation par BILJOU© de l'ETR sont comparées sur le pas de temps saisonnier, en 2010 (DOY 172 à 275) et en 2011 (DOY 127 à 281).

V.4.1.1. Jours sans pluie

Pour la comparaison avec la méthode par eddy covariance, l'ETR par la méthode analytique est calculée, pour l'ensemble de la parcelle C100, sans (ETR_{P1}), ou avec (ETR_{P2}) l'utilisation du modèle de footprint (Figure II.27 et II.36). En négligeant ET_u , pour les jours sans pluie, ETR_{P1} correspond à T_{P1} et ETR_{P2} à T_{P2} .

Les résultats sont similaires entre T_{P1} et T_{P2} , et en bonne concordance avec ET , pour les jours sans pluie et 3^{èmes} jours consécutifs sans pluie (Figure V.18). Pour les jours sans pluie, au-dessus de 2 mm, ET est dans l'ensemble légèrement supérieur à T . Ce constat ne se retrouve pas pour les 3^{èmes} jours consécutifs sans pluie. Les valeurs supérieures d' ET peuvent éventuellement être expliquées par la prise en compte, le jour suivant un événement pluvieux, de flux d'interception et/ou d'évaporation du sol, ne pouvant être réduits à l'échelle journalière. Lors de journées à forte demande atmosphérique, l'évapotranspiration du sol et du sous-étage prise en compte par la mesure par eddy covariance, peut également apporter une différence, malgré qu'elle soit supposée faible dans son ensemble. Pour les jours sans pluie, Granier et al. (2000) trouvent également une bonne concordance entre les mesures de flux de sève et d'eddy covariance. Wilson et al. (2001) et Roupsard et al. (2006) constatent de bonnes corrélations entre les mesures de flux de sève et d'eddy covariance pour les jours sans pluie, mais avec une mesure des flux de sève inférieure d'au-moins 50 % à

celle d'eddy covariance. Ces différences sont expliquées par les auteurs par une mauvaise calibration des capteurs de flux de sève employés.

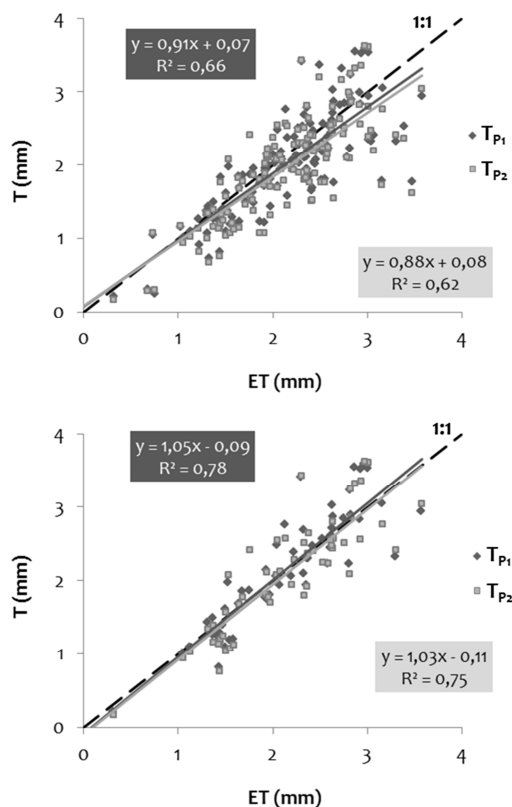


Figure V.18 : Transpiration journalière, T (mm), mesurée à partir de la méthode de dissipation thermique sur base de l'inventaire de la Parcelle C100, sans (T_{P1}) ou avec (T_{P2}) le modèle de footprint, exprimée en fonction de l'évapotranspiration mesurée par eddy covariance, ET (mm). Les relations sont établies pour les jours sans pluie (en haut) ou les 3^{èmes} jours consécutifs sans pluie (en bas), en 2010 (DOY 141 à 275) et en 2011 (DOY 127 à 281). Les équations et les R^2 des régressions linéaires sont indiqués en fonction du scénario envisagé.

V.4.1.2. Tous les jours : prise en compte de l'interception

Sur le pas de temps des événements pluvieux, la concordance des mesures d'ETR par la méthode analytique à l'échelle de la Parcelle C100 et par eddy covariance est bonne (Figure V.19 et Annexe 11 Figure A.23). La prise en compte ou non du modèle de footprint donne des résultats quasi identiques mettant en avant la similarité des flux d'ETR mesurés entre les différentes espèces par la méthode analytique.

Les écarts les plus importants correspondent aux journées pour lesquelles la pluviométrie est supérieure à environ 15 mm, conditions rencontrées particulièrement en 2010 (mois d'août). Dans ces cas-là ($ETR_p > 5$ mm et $0 < ET < 5$ mm ; Figure V.19), la supériorité d' ETR_p vis-à-vis d'ET est alors expliquée par les mesures d'interception de la méthode analytique. Cela se confirme avec l'utilisation de l'interception modélisée par BILJOU© ($B.In_p$, Figure V.19). Les valeurs de $T_{p1} + B.In_p$ sont globalement plus élevées que celles d'ET, laissant supposer une modélisation de l'interception de manière générale trop élevée. Cependant, les écarts précédemment évoqués, en 2010 entre ETR_p et ET sont atténués, confirmant lors de cette période de forte pluviométrie, le problème de mesure de l'interception.

Les relations obtenues entre ETR_H et ET sont aussi bonnes que celles établies avec ETR_p (Annexe 11 Figure A.23 a, c et d). À l'inverse les relations avec ETR_D sont moins concluantes (Annexe 11 Figure A.23 a, c et d). En 2010, les forts taux d'interception mesurés chez les douglas semblent expliquer les principaux écarts observés entre ETR_D et ET. L'utilisation de l'interception modélisée par BILJOU© permet d'obtenir de meilleures concordances entre ETR_D et ET (Annexe 11 Figure A.23 b), appuyant l'hypothèse d'un problème de mesure d'interception en 2010. En 2011 par contre, ce sont davantage les mesures de flux transpiratoires qui influencent les résultats, ETR_D ayant tendance à être inférieur à ET pour des périodes avec ou sans pluie consécutives. La majorité des flux enregistrés par la tour proviennent du secteur SW, dominé par les hêtres, pouvant alors expliquer la meilleure concordance d'ET avec ETR_H .

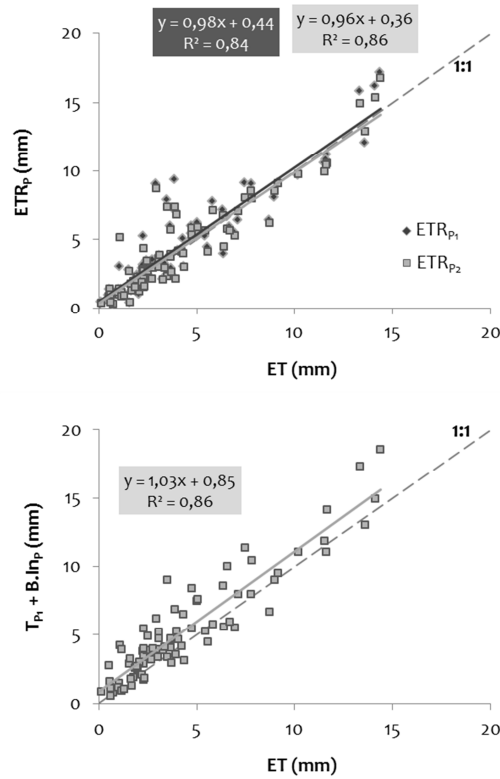


Figure V.19 : Évapotranspiration réelle évaluée par la méthode analytique (mm) à l'échelle de la Parcelle C100, a) sans (ETR_{p1}) ou avec (ETR_{p2}) l'utilisation du modèle de footprint et b) avec l'interception modélisée par BILJOU© à l'échelle de la Parcelle C100, sommée à la transpiration calculée sans l'utilisation du modèle de footprint à l'échelle de la Parcelle C100 ($T_{p1} + B.IN_p$), en fonction de l'évapotranspiration réelle mesurée par eddy covariance (ET, mm). Les équations et les R² des régressions linéaires sont indiqués en fonction du scénario envisagé. Les relations sont établies à partir des mesures en 2010 (DOY 171 à 275) et en 2011 (DOY 135 à 281).

V.4.1.3. Inter-validation avec l'ETR_{SOL}

Les estimations de ΔR_t , dépendantes du bon fonctionnement des sondes réflectomètres, peuvent représenter une variation de réserve en eau disponible d'un à plusieurs jours. Les mesures se concentrant sur la saison de végétation, durant laquelle l'état hydrique du sol s'éloigne normalement de la saturation et les précipitations rechargent alors en grande partie le sol, nous pouvons nous attendre à ce qu'une mauvaise évaluation du drainage

ait de faibles conséquences. Mais cela reste une erreur potentielle surtout en période de fortes précipitations, pour lesquelles le drainage peut demeurer important sans pour autant que le sol soit à la capacité au champ.

De manière générale, les relations obtenues sur ce pas de temps, entre la méthode du bilan hydrique du sol et les méthodes analytique et d'eddy covariance sont bonnes quel que soit le sous-peuplement (Figure V.20).

D'un point de vue de la représentativité spatiale, la méthode du bilan hydrique du sol est davantage comparable à la méthode analytique, réductible à l'échelle des sous-peuplements de hêtres et de douglas (Figure V.20). Toutefois, les R^2 des relations d' ETR_{SOL} et d' ET sont tout aussi bons qu'avec l' ETR analytique (Figure V.20). Par la méthode analytique pour les douglas, on note que la régression est largement influencée par un point ($ETR_D = 75 \text{ mm}$; Figure V.20). Cette période présentant la plus forte ETR , correspond à l'évènement pluvieux important en août 2010, ayant conduit à une forte recharge du sol (Figure III.19).

En plus des différences de représentativité spatiale entre les méthodes, les écarts observés durant des périodes avec une forte pluviométrie peuvent être la cause i) d'une mauvaise estimation du drainage et/ou ii) d'une mauvaise estimation des flux d'interception. L'amélioration des relations de la méthode de bilan hydrique du sol avec les autres méthodes, en comparaison au pas de temps journalier, peut être expliquée par la difficulté de réduire les flux d'eau dans le sol au pas de temps journalier. Sur plusieurs jours, la méthode du bilan hydrique du sol est donc en mesure de fournir des résultats comparables à la méthode analytique et d'eddy covariance, avec pourtant une représentativité spatiale à l'échelle de la Parcelle C100 plus limitée.

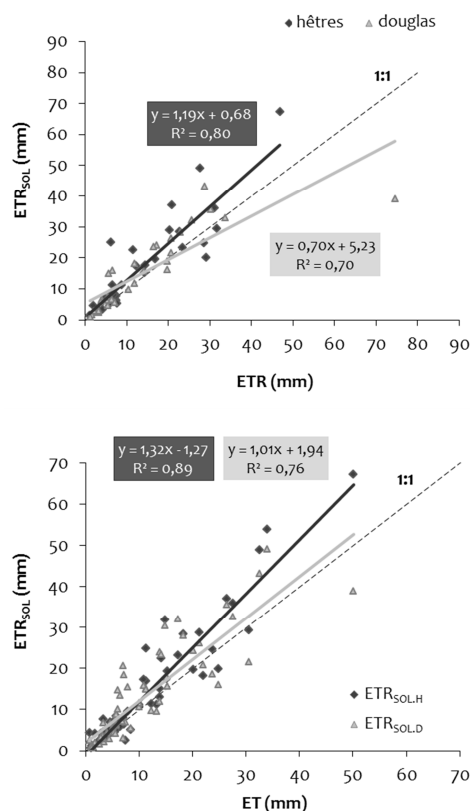


Figure V.20 : Évapotranspiration mesurée par la méthode du bilan hydrique du sol (ETR_{sol} , mm) par sous-peuplement, hêtres ($ETR_{sol,H}$) ou douglas ($ETR_{sol,D}$), en fonction a) de l'évapotranspiration mesurée par la méthode analytique pour les hêtres (ETR_H) ou les douglas (ETR_D) et b) de l'évapotranspiration mesurée par eddy covariance (ET , mm). Chaque point représente de un à plusieurs jours, en fonction de la détermination de ΔR_t . Les équations et les R^2 des régressions linéaires sont indiqués en fonction du scénario envisagé. Les relations sont établies à partir des mesures en 2010 (DOY 174 à 265) et en 2011 (DOY 130 à 277).

V.4.1.4. Flux d'ETR saisonniers

L'ensemble des mesures et modélisations de l'évapotranspiration réelle peuvent être comparés simultanément à l'échelle de la saison.

Pour la méthode du bilan hydrique du sol et la modélisation via BILJOU®, les résultats sont dépendants du calcul de RU envisagé. A l'échelle de la saison, quel que soit le sous-peuplement et la méthode, les variations

entre les ETR_{SOL} ou B.ETR en fonction des calculs de RU sont faibles (de -10 à +4 % par rapport au scénario supérieur, mesuré ou modélisé ; Annexe 11 Figure A.24). Pour la suite des résultats à l'échelle de la saison, seuls les résultats pour les calculs de RU moyens sont conservés.

Entre les sous-peuplements, les variations d'ETR sont relativement faibles quelle que soit la méthode utilisée (Figure V.21). En 2010, l'ETR des douglas est égale à -15, +12 et -9 % de l'ETR des hêtres, pour la méthode du bilan hydrique du sol, analytique et la modélisation respectivement, et -10, -7 et -8 % en 2011. Quelle que soit l'année ou le sous-peuplement, les estimations par la méthode du bilan hydrique du sol et la modélisation sont très proches, avec moins de 5 % de différences. Les différences avec la méthode analytique sont par contre plus importantes, de +16 % (douglas 2010) à -18 % d' ETR_{SOL} (hêtres 2011).

Mis à part pour les douglas en 2010, l'ETR analytique est inférieure aux autres méthodes à l'échelle des sous-peuplements. La différence en 2010, entre la méthode analytique et le modèle pour le sous-peuplement de douglas, est particulièrement due aux flux d'interception mesurés (Figures V.16 et V.17). Les bonnes concordances entre la méthode du bilan hydrique du sol et la modélisation (Figure V.21) et la transpiration par la mesure du flux de sève et la modélisation (Figures IV.24 et IV.25, Section IV.4.1), confirment l'imprécision des flux d'interception mesurés pour le sous-peuplement de douglas en 2010. Il est possible que ces derniers soient surestimés en août, étant donné la variabilité des mesures hors et sous-couvert. L'utilisation de l'interception modélisée par BILJOU®, sommée à la transpiration mesurée des hêtres ou des douglas ($T + B.In$), réduit les écarts avec l' ETR_{SOL} de -5 à +7 %, selon l'année ou le sous-peuplement (Figure V.21).

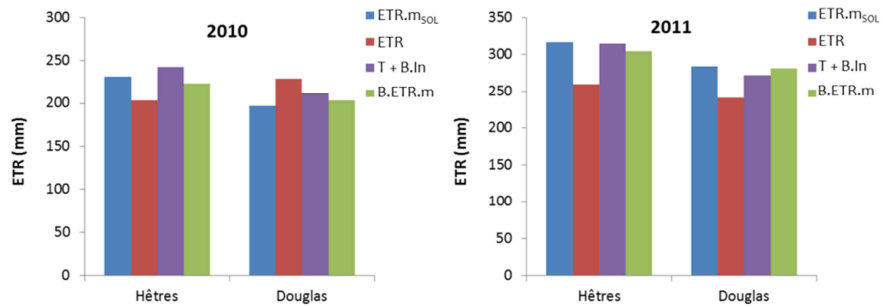


Figure V.21 : Cumuls saisonniers, à l'échelle des sous-peuplements de hêtres et de douglas, de l'évapotranspiration réelle mesurée par la méthode du bilan hydrique selon le calcul de RU moyen (ETR.m_{SOL}), par la méthode analytique (ETR) et modélisée par BILJOU© selon le calcul de RU moyen (B.ETR.m), en 2010 (à gauche ; DOY 171 à 275) et en 2011 (à droite ; DOY 127 à 281).

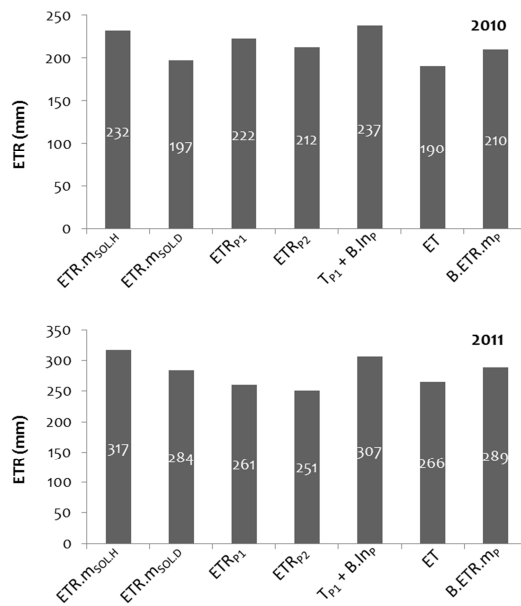


Figure V.22 : Cumuls saisonniers de l'évapotranspiration réelle (mm) mesurée par la méthode du bilan hydrique à l'échelle des sous-peuplements de hêtres et de douglas (ETR.m_{SOL.H} et ETR.m_{SOL.D}), par la méthode analytique à l'échelle de la Parcelle C100, sans (ETR_{P1}), ou avec (ETR_{P2}) l'utilisation du modèle de footprint, par la somme de la transpiration mesurée à l'échelle de la parcelle C100 sans scénario de footprint et l'interception modélisée par BILJOU à l'échelle de la Parcelle C100 (T_{P1} + B.In_P), par eddy covariance (ET) et modélisée par BILJOU© à l'échelle de la Parcelle C100 pour le calcul de RU moyen (B.ETR.m_P), en 2010 (en haut ; DOY 171 à 275) et en 2011 (en bas ; DOY 127 à 281).

A l'échelle de la Parcelle C100, par la méthode analytique, l'estimation saisonnière d'ETR_{P2} est inférieure à celle d'ETR_{P1} de 5 et 4 %, en 2010 et 2011 respectivement (Figure V.22).

L'évaluation de l'évapotranspiration réelle par eddy covariance (ET) est inférieure à ETR_{P2} en 2010 de 10 %, et supérieure en 2011 de 6 %. Etant donné la bonne concordance des mesures les jours sans pluie, la différence en 2010 peut être attribuée aux mesures de flux d'interception et/ou à la mauvaise évaluation de l'évapotranspiration par eddy covariance lors de conditions pluvieuses. Comme il a été vu Figure V.21, il est possible que l'estimation de l'interception en 2010, en particulier pour le sous-peuplement de douglas, soit surestimée. L'ETR modélisée est inférieure à ETR_{P2} en 2010 de 1 % et supérieur en 2011 de 15 %.

Dans l'ensemble sur l'échelle de la saison, les différentes méthodes d'évaluations de l'ETR donnent donc des résultats comparables, définissant une gamme d'ETR « possible » pour les sous-peuplements ou le peuplement, chaque méthode possédant son degré d'incertitude.

V.4.2. Comparaisons sur la période 1998-2011

L'ET et l'ETR modélisée sont comparées de 1998 à 2011 (sauf 2009 en raison du % de données absentes pour ET) sous la forme de cumuls saisonniers de mars à octobre (Figure V.23). De 1998 à 2008, ET est équivalent en moyenne à 67 % de B.ETR.m_P, alors qu'en 2010-2011, ET équivaut en moyenne à 91 % de B.ETR.m_P.

Les différences dans la mesure des flux suite au changement de la tour interviennent principalement pour les jours à faible demande atmosphérique et/ou pluvieux (Section V.1).

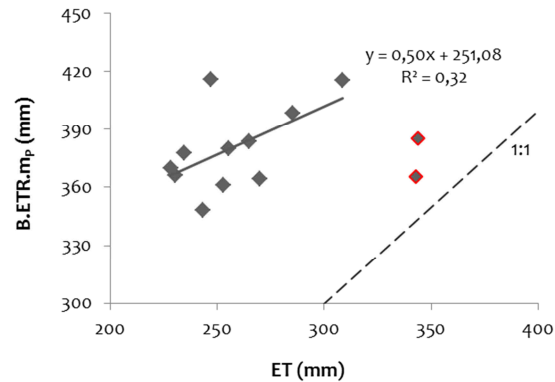


Figure V.23 : Évapotranspiration réelle modélisée par BILJOU© à l'échelle du peuplement mixte pour le calcul moyen de RU (B.ETR.m_p, mm) en fonction de l'évapotranspiration réelle mesurée par eddy covariance (ET, mm), de mars à octobre pour les années 1998 à 2011 (sauf 2009). Les années 2010 et 2011 sont représentées par les losanges entourés de rouge. La régression linéaire calculée (et R² associé) est établie à partir des années 1998 à 2008.

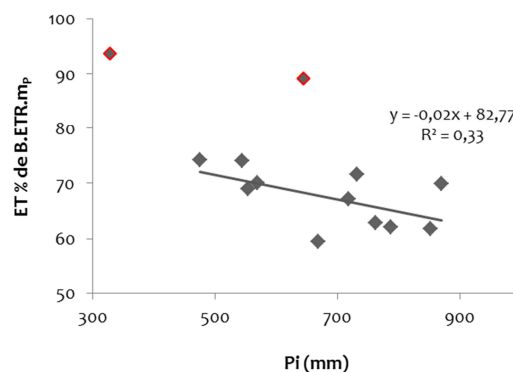


Figure V.24 : Evapotranspiration réelle mesurée par eddy covariance (ET, mm) exprimée en pourcentage de l'évapotranspiration réelle modélisée à l'échelle du peuplement mixte pour le calcul moyen de RU (B.ETR.m_p, mm) en fonction de la pluviométrie incidente (Pi, mm) par année (de 1998 à 2011, sauf 2009 ; 2010 et 2011 entourés de rouge ; cumuls des variables de mars à octobre). La régression linéaire calculée (et R² associé) est établie à partir des années 1998 à 2008.

Les cumuls d'ET exprimés en pourcentage de B.ETR.m_p, sont mis en relation avec la pluviométrie incidente (Figure V.24). Plus la pluviométrie

incidente augmente, plus ET diminue vis-à-vis de $B.ETR.m_p$ laissant supposer une influence majeure de l'interception dans les différences observées entre le modèle et les mesures. Cette hypothèse se valide avec l'observation des relations entre ET et $B.ETR.m_p$ à l'échelle journalière, en séparant dans l'analyse les jours pluvieux des jours secs (Figure V.25).

Pour les jours sans pluie (Figure V.25), les relations entre ET et $B.ETR.m_p$ sont nettement améliorées. Les régressions linéaires obtenues en fonction des années prises en compte, 1998 à 2008 ou 2010 à 2011, sont similaires et présentent le même R^2 de 0.8. Les régressions sont proches de la pente « 1:1 », attestant de la bonne concordance entre les mesures et le modèle pour les jours sans pluie avant et après le changement de la tour. Pour les jours pluvieux par contre (Figure V.25), les valeurs modélisées restent largement supérieures aux valeurs mesurées (toujours supérieures de 1998 à 2008 en comparaison à 2010 et 2011). De 1998 à 2008 selon la régression établie, ET est égale à $B.ETR.m_p$, plus une constante égale à 0.81. Pour l'exemple, pour ET = 4 mm, le modèle présente une valeur supérieure de 22 %. Pour 2010 et 2011 la pente diminue légèrement avec les valeurs croissantes d'ET et la constante est plus faible que pour la régression obtenue de 1998 à 2008. Pour ET = 4 mm, le modèle présente alors une valeur supérieure uniquement de 4 %. La majorité des mesures lors des journées pluvieuses ont cependant une ET inférieure à 2 mm.

Selon les régressions établies, pour des valeurs d'ET égales à 1 et 2 mm, $B.ETR.m_p$ est supérieure de 83 et 43 % respectivement de 1998 à 2008 et de 45 et 18 % de 2010 à 2011. Les journées pluvieuses, étant sur le site de Vielsalm tout aussi nombreuses que les journées sans pluie, cette supériorité du modèle à l'échelle journalière lors de journées pluvieuses, peut expliquer les écarts saisonniers constatés entre ET et $B.ETR.m_p$ (Figures V.23 et V.24).

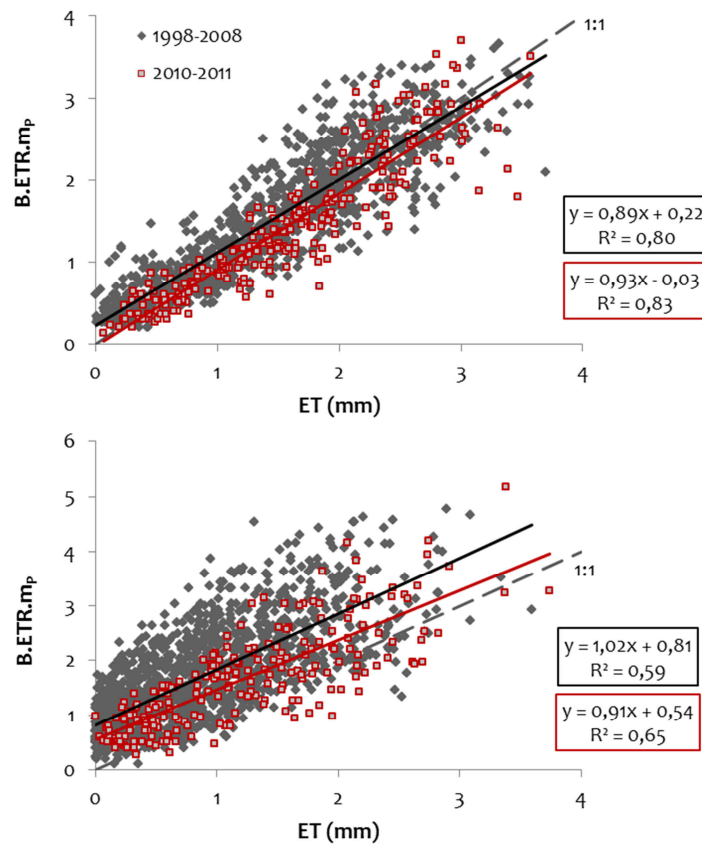


Figure V.25 : Évapotranspiration réelle journalière, modélisée par BILJOU© à l'échelle du peuplement mixte pour le calcul moyen de RU (B.ETR.m_p, mm) en fonction de l'évapotranspiration réelle journalière mesurée par eddy covariance (ET, mm), pour les jours sans pluie (en haut) et les jours pluvieux (en bas), de mars à octobre, pour les années 1998 à 2011 (sauf 2009). Les équations et les R² des régressions linéaires sont indiqués en fonction des groupes d'années.

V.4.3. Validations d'ET : quelles conditions et quelles périodes ?

Les jours sans pluie, les résultats des mesures de flux de vapeur d'eau par eddy covariance sont satisfaisants en comparaison aux mesures de flux de sève (2010-2011) et à la modélisation (1998-2008).

En 2010-2011, pour l'ensemble des données sur le pas de temps événement pluvieux, une bonne correspondance est également observée entre la méthode analytique et l'eddy covariance. On note une légère supériorité des résultats de la méthode analytique pour les périodes avec de fortes pluviométries, mais la mesure des flux d'interception, particulièrement pour le sous-peuplement de douglas, peut en être la cause. De manière générale l'interception modélisée par BILJOU© est également supérieure à l'interception mesurée en 2010 et 2011. De plus l'empreinte de mesure de la tour reste difficile à reproduire. En 2010-2011, ET donne donc des résultats cohérents pour les périodes avec ou sans pluie, en comparaison aux autres mesures.

De 1998 à 2008, il semble alors que l'ETR les jours pluvieux soit sous-estimée par ET. Si l'on considère que pour 2010-2011 la mesure d'eddy covariance est correcte pour les jours pluvieux, il est alors possible d'apporter ces jours-là une correction moyenne à la période 1998-2008 à partir des relations d'ET en fonction de $B.ETR.m_p$. Notons ET_1 , la valeur d'ET calculée à partir de la relation $ET=f(B.ETR.m_p)$ en 1998-2008 et ET_2 en 2010-2011. La correction est réalisée par classe de $B.ETR.m_p$ d'amplitude égale à 1 mm. Pour chaque moyenne de classe, le pourcentage de différence entre ET_1 et ET_2 est calculé et est utilisé par classe, comme facteur de correction pour ET les jours pluvieux. La correction reste approximative par cette voie-là. On passe d'une ET cumulée de mars à octobre moyenne sur la période 1998-2008, de 256 mm à 311 mm pour « ET corrigée », soit une augmentation moyenne de 21 % (Figure V.26). L'ET corrigée reste en moyenne inférieure de 18 % à $B.ETR.m_p$ entre 1998 et 2008 (Figure V.26).

Plusieurs problèmes en conditions pluvieuses ont pu être identifiés dans d'autres études (filtre ou anémomètre mouillés, remplacement des données manquantes ; Section V.1.1), mais il reste à résoudre ici ce que le changement de tour a modifié vis-à-vis de ces problèmes. L'hypothèse la plus probable (communication personnelle de B. Heinesch), provient de la correction en fréquence des flux de vapeur d'eau. Une partie haute fréquence du flux est perdue pour diverses raisons lors de la mesure. Cette perte est corrigée en multipliant le flux mesuré par un facteur de

correction (FC_{HF}). FC_{HF} est déterminé sur base d'une analyse spectrale et varie en fonction des conditions climatiques et de la hauteur de mesure (h , distance mesure-sommet canopée). L'approche « classique », consiste à prendre en compte uniquement h et la vitesse du vent (ws) pour le calcul de FC_{HF} . de Ligne et al. (2010) montrent qu'en prenant en compte une procédure plus complexe, intégrant également le VPD, les flux corrigés par l'approche « classique » semblent sous-estimés pour de faibles VPD, et donc régulièrement les jours pluvieux. Tous ces effets sont d'autant plus marqués que h est faible (i.e. qu'on est proche du couvert). La nouvelle tour étant plus éloignée de la canopée en particulier pour les hêtres, il semblerait que l'approche « classique » soit alors plus ou moins correcte même à bas VPD en 2010-2011, contrairement à la période 1998-2008 pour laquelle h était plus faible. Le développement du calcul de FC_{HF} en fonction du VPD, devrait améliorer les estimations d'ET de 1998 à 2008.

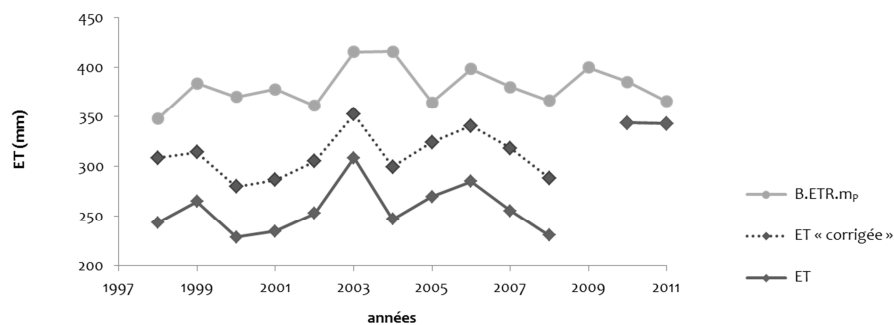


Figure V.26 : Cumuls saisonniers (mars à octobre) de l'évapotranspiration réelle journalière mesurée par eddy covariance (ET, mm), mesurée par eddy covariance et corrigée pour les jours pluvieux de 1998 à 2008 (ET « corrigée », mm ; voir texte Section V.4.3) et modélisée par BILJOU© pour le peuplement mixte (B.ETR.M.m), de 1998 à 2011.

Les comparaisons des résultats de la méthode analytique et d'eddy covariance en 2010-2011 sont très satisfaisantes, mais une incertitude demeure sur la contribution du sous-étage et du sol (ET_u) dans les flux d'ETR. ET_u a été négligé dans cette étude pour la comparaison des résultats. Cependant, comme il a déjà été précisé, cette simplification pourrait être une source d'erreur, particulièrement sous les douglas.

Chapitre V

EN CONCLUSION

- Les flux d'interception mesurés dans les sous-peuplements sont faibles (10 % pour les hêtres et 23 % pour les douglas) en comparaison de la littérature et du modèle BILJOU® ;
- En moyenne en 2010-2011, la transpiration des hêtres (T_H) représente 86 % de l'ETR évaluée par la méthode analytique (ETR_H) et celle des Douglas (T_D) 67 % d' ETR_D ;
- Une sous-estimation d'ET est observée les jours pluvieux de 1998 à 2008, avant le changement de la tour ;
- En 2010-2011, ET est validée par la méthode analytique (pour les jours sans pluie et au pas de temps événements pluvieux) ;
- Mise en avant de la nécessité de corriger la mesure d'eddy covariance à haute fréquence pour solutionner le problème de mesure d'ET les jours pluvieux ;
- Une bonne correspondance de l'ensemble des méthodes d'évaluation de l'ETR à l'échelle mensuelle ou saisonnière.

Chapitre VI

VI. DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

VI.1. Discussion générale

Cette étude a été envisagée entre autre suite à l'article de Granier et al. (2007), dans lequel, sur base des mesures d'eddy covariance et de la modélisation de la réserve en eau disponible ($B.R_t$) par BILJOU©, le site de Vielsalm apparaît comme peu touché par l'évènement climatique extrême de 2003 (Figure 1.2). Ce constat, et le fait que le peuplement soit multi spécifique à l'échelle du footprint de la tour, a induit plusieurs questions : les espèces sur le site profitent-elles de la même réserve utile (RU) ? Comment ces espèces, via leur impact sur le bilan hydrique, modifient-elles R_t et quelle est la variabilité spatiale et temporelle de celle-ci ? Les flux d'évapotranspiration mesurés par la tour depuis 1998 sont-ils fiables, et permettent-ils de détecter d'éventuelles régulations hydriques en distinguant les différentes espèces ? Nous allons ici résumer les résultats présentés dans les chapitres précédents, en les intégrant de façon à répondre à ces questions. Les références bibliographiques citées au sein de chaque Chapitre ne seront pas nécessairement reprises dans cette discussion générale.

VI.1.1. Méthodologie : quelle erreur au bout de la chaîne ?

L'erreur est indissociable de l'expérimentation, mais par le biais d'instruments de mesure et de protocoles adaptés aux situations spécifiques, il est possible de limiter cette dernière et d'obtenir des estimations fiables des variables à quantifier.

Dans l'estimation de l'ETR au sein d'un peuplement forestier mixte, quelle que soit la méthode employée, les sources d'erreurs sont multiples et difficilement chiffrables. L'instrument de mesure a une marge d'erreur qui lui est propre. La mesure peut être indirecte, basée alors souvent sur des hypothèses simplificatrices induisant une marge d'erreur. Les variables à quantifier ont, de plus, une variabilité plus ou moins importante dans leur milieu ; la qualité de l'échantillonnage est donc essentielle, de façon à « capturer » cette variabilité.

Dans l'ensemble à l'échelle de la saison, les différentes méthodes d'évaluations de l'ETR donnent des résultats comparables (Figure V.21 et V.22). Sur des échelles de temps plus courtes, les concordances sont également satisfaisantes entre les différentes méthodes.

Toutes les méthodes surestiment t'elles ou sous-estiment t'elles l'ETR ? Cela semble peu probable. Les erreurs se compensent elles ou sont-elles finalement faibles ? Toutes ne sont pas quantifiables, ou difficilement, et les interactions peuvent être complexes. Sans pouvoir détailler le cumul des erreurs sur la détermination moyenne de l'ETR, la gamme de valeur obtenue par les différentes méthodes peut être perçue comme une marge d'erreur globale. Les moyennes des estimations saisonnières par les différentes méthodes (Figure V.22) sont de 214 mm en 2010 (DOY 171 à 275) avec des variations maximales de ± 11 % par rapport à la moyenne et 282 mm en 2011 (DOY 127 à 281) avec des variations maximales de -11 à +12 %. Granier et al. (2000), Wilson et al. (2001), Oishi et al. (2008) et Schwärzel et al. (2009), trouvent également de bonnes concordances sur plusieurs jours de mesures, sur la saison, ou annuellement, entre les différentes méthodes d'évaluation de l'ETR. Granier et al. (2000) et Oishi et al. (2008) constatent en moyenne, respectivement +9 et ± 6 % de différence entre les cumuls saisonniers d'ETR mesurés par la méthode analytique et d'eddy covariance, en fonction des années et/ou des peuplements étudiés. Schwärzel et al. (2009) durant une période de sécheresse, mesurent une ETR_{SOL} inférieure de -26 % à la mesure par eddy covariance pour un peuplement de hêtres, et de +10 % pour un peuplement d'épicéas, la fermeture du bilan d'énergie concernant la méthode d'eddy covariance étant meilleure pour les épicéas. À l'inverse Cuenca et al. (1997) et Moore et al. (2000) reportent des valeurs d' ETR_{SOL} inférieures de 60 % aux mesures par eddy covariance, malgré une prise en compte accrue du drainage.

Sans pouvoir les quantifier pour le moment nous allons tenter d'identifier les sources d'erreurs les plus critiques dans cette étude pour les différentes méthodes d'évaluation de l'ETR. Puis, de manière générale voir celles qui sont évitables, par quel moyen, puis celles qui demeurent inévitables au travers de la mesure ou du changement d'échelle.

VI.1.1.1. La méthode analytique

Les flux transpiratoires

Les sources d'erreurs de la mesure des densités de flux de sève à partir de la méthode de dissipation thermique (mesure indirecte de cette grandeur), sans vérification au préalable de la calibration des capteurs, sont multiples : fabrication des capteurs, détermination du $\Delta T_{\max}$, gradients naturels de chaleur, contact capteur/aubier, perçage (Figure II.19).

Dans cette étape et dans notre cas, la fabrication des capteurs semble être la source d'erreur la plus importante et difficilement quantifiable, tant elle apparaît variable (Figures IV.10 et IV.11). Elle est cependant évitable à partir d'une calibration préalable des capteurs en laboratoire par exemple, ou en respectant le protocole de fabrication établi par Granier (1985)⁴. Les méthodes de calibration employées ici restent imparfaites, particulièrement en 2010, mais elles ont dû être élaborées « dans l'urgence ». En 2011, selon le protocole établi, les variations azimutales de densités de flux de sève peuvent être la source d'erreur la plus importante dans la détermination des coefficients de calibration. On trouve cependant peu de variations entre les faces sud et nord de 3 douglas échantillonnés et les résultats de SFD sont cohérents avec les valeurs rencontrées dans la littérature.

Le passage de l'échelle de la densité de flux de sève à celle de la transpiration du peuplement, équivalent qui plus est, d'un point de vue spatial au footprint des mesures par eddy covariance, requiert également un nombre de mesures et d'hypothèses important, multipliant potentiellement les erreurs : densités de flux de sève des différentes espèces, classes de circonférence, surfaces conductrices et profils radiaux de densité de flux de sève par espèce, variations de la surface de mesure par eddy covariance (Figure II.24 et II.26).

Ici, les sources d'erreurs les plus importantes dans la détermination de la transpiration du peuplement mixte sont liées aux déterminations des

⁴ A titre personnel j'éviterai si possible à l'avenir de traiter avec UP GmbH pour l'achat de capteurs de flux de sève.

SFD, des surfaces d'aubier (SA) et des profils radiaux de SFD des différentes espèces. Initialement basés sur la Parcelle témoin, les protocoles de mesures se sont concentrés sur les hêtres et les douglas. Cependant, les estimations pour correspondre à la mesure par eddy covariance ont dû s'étendre à la Parcelle C100. Les densités de flux de sève des douglas sont alors utilisées pour les épicéas et les tsugas. L'hypothèse d'une similarité de SFD au sein de mêmes groupes fonctionnels (feuillus ou résineux, avec système poraux comparables dans le cerne) est valide, mais étant donné la proportion de ces espèces au sein du peuplement mixte, il aurait été idéal de déterminer les SFD de chaque espèce. Pour les sapins, les épicéas et les tsugas, les surfaces d'aubier sont issues de la littérature, pouvant induire des erreurs conséquentes, étant donné le caractère variable de SA pour une même espèce entre des peuplements d'âges, de classes de productivité et de densités différents. Une SA moyenne par espèce pourrait être déterminée, si le temps le permet. Cependant, au sein d'un arbre, la surface d'aubier peut être aussi fortement variable, en fonction des conditions de croissance de l'arbre. Les estimations de SA à l'échelle d'un peuplement semblent alors difficilement dissociables d'une erreur de mesure. Des études spécialisées sur les surfaces d'aubier au sein de peuplements forestiers devraient permettre de prendre en compte une marge d'erreur. Le même constat peut être fait avec les profils radiaux de densité de flux de sève. Le changement d'échelle du capteur à l'arbre, sans prise en compte du profil radial de densité de flux de sève, peut amener à des erreurs d'estimations importantes. Une prise en compte de profils radiaux spécifiques améliorerait certainement les estimations de la transpiration. En outre, étant donné le caractère variable du profil en fonction des conditions climatiques et de la saison, un calcul journalier basé sur une relation avec le VPD ou l'ETP semblerait plus approprié.

Les autres sources d'erreurs potentielles (moyenne des flux de sève par classe de circonférence, répartition spatiale et proportion des espèces au sein de la parcelle), peuvent être limitées à partir d'un bon échantillonnage. Sur les espèces échantillonnées, on constate que les coefficients de variation des mesures au sein de chaque espèce sont relativement faibles (27 et 11 % pour les hêtres et les douglas respectivement).

Les flux d'interception

Dans le calcul de l'ETR par la méthode analytique, les flux d'interception sont ceux qui posent le plus problème. En effet, à l'échelle saisonnière, les % d'interception mesurés fonction de la pluviométrie incidente, sont faibles en comparaison à la littérature, en particulier pour les hêtres. Ils sont égaux à 10 % (8 et 11 % en 2010 et 2011) et 23 % (23 et 22 % en 2010 et 2011) pour les hêtres et les douglas respectivement. Pourtant la mesure des pluviolessivats est directe. Cependant, la variabilité spatio-temporelle des pluviolessivats est forte et dépendante de multiples facteurs. Une évaluation moyenne de l'interception est plus compliquée qu'elle n'y paraît. Le calcul est également dépendant de la pluviométrie hors couvert, généralement évaluée à partir d'un ou deux pluviomètres. Quelle est la raison de cette sous-estimation ? Quelles en sont les conséquences ?

L'interception est un flux important au sein du cycle de l'eau, pouvant représenter selon la littérature de 15 à 50 % de la pluviométrie incidente. Sa variabilité interannuelle ou saisonnière peut être importante, dépendante des quantités de pluie et des conditions météorologiques, et sa variabilité spatiale l'est également, influant alors largement sur la répartition de l'eau arrivant au sol.

Tout d'abord, en 2010, pour le sous-peuplement de douglas, les résultats d'ETR par la méthode analytique font apparaître une surestimation de l'interception mesurée (DOY 226 à 242), durant d'importants événements pluvieux (supérieurs à 15 mm). L'interception mesurée pour les douglas durant cette période équivaut environ à 15 % de P_i , ce qui pour des événements pluvieux de cet ordre-là est trop important. Pour des événements pluvieux de l'ordre de 40 à 60 mm cette surestimation amène vite à quelques mm en trop, non négligeables sur des périodes aussi courtes. Ecoulements préférentiels en cas de forte pluviométrie ? Nombre de pluviomètres insuffisant ? Conséquences d'une vitesse de vent supérieure à la moyenne ? Estimations erronées de P_i ? Les raisons peuvent être multiples. D'un point de vue du nombre de pluviomètres, les coefficients de variation pour ces événements pluvieux sont de l'ordre de 20 %, valeurs en accord

avec la littérature, et parmi les plus faibles mesurés durant les 2 saisons de végétation. Dans tous les cas, ces valeurs d'interception ne sont pas réalistes et peu de crédit est à donner à In_D pour ces événements pluvieux particulièrement importants et intenses.

L'obtention d'une moyenne annuelle d'interception dépend également de la fréquence des événements pluvieux en fonction de leur intensité et de leur durée. S'il pleut beaucoup mais en peu de fois, l'interception annuelle sera faible et inversement. Le pourcentage saisonnier peut finalement être trompeur. On constate alors, sur l'ensemble des données, que pour des pluies inférieures à 15 mm, les % d'interception calculés en fonction de P_i sont de 18 et 33 % pour les hêtres et les douglas (Tableau VI.1), valeurs plus réalistes vis-à-vis de la littérature. Ces événements pluvieux à Vielsalm ne comptent que pour 39 % de la pluviométrie incidente totale, durant les périodes de mesure. Pour les pluies supérieures à 15 mm (61 % de P_i sur les saisons de mesure), les % d'interception en fonction de P_i chutent à 4 et 17 % pour les hêtres et les douglas respectivement. Ces écarts importants de taux d'interception en fonction de P_i et la répartition des pluies au sein de la saison sont susceptibles d'expliquer les différences d'évaluation entre nos mesures et la littérature.

	Pi év. pluvieux	Pi jour	Pi év. pluvieux % de Pi total	Pi jour % de Pi total	In_H (mm)	$B.In_H$ (mm)	In_H % de Pi	$B.In_H$ % de Pi	In_D (mm)	$B.In_D$ (mm)	In_D % de Pi	$B.In_D$ % de Pi
total	673	673	100	100	64	157	9	23	153	167	23	25
$P_i < 5$ mm	88	156	13	23	21	83	24	53	33	93	37	59
$P_i < 15$ mm	260	490	39	73	47	148	18	30	85	158	33	32
$P_i > 15$ mm	413	183	61	27	17	9	4	5	68	9	17	5

Tableau VI.1: Pluviométrie incidente calculée sur le pas de temps de l'évènement pluvieux (P_i év. Pluvieux) ou journalier (P_i journalier), et exprimée en % du total sur l'ensemble des 2 saisons de mesure (2010-2011), pour l'intégralité des données ou par classe de P_i (< 5 mm, < 15 mm et > 15 mm). Les interceptions des hêtres et douglas mesurées (respectivement In_H et In_D) et modélisées par BILJOU© ($B.In_H$ et $B.In_D$) sont données en mm et en % de P_i , pour l'intégralité des jours de mesure et par classe de P_i .

A partir de la modélisation par BILJOU©, l'interception est évaluée en moyenne à 23 % de P_i pour les hêtres (18 % en 2010 et 30 % en 2011) et 25 % pour les douglas (19 % en 2010 et 33 % en 2011). Donc pour les douglas, mis à part en août 2010, les mesures sont finalement réalistes vis-à-vis de la littérature et de la modélisation par BILJOU©. Pour les hêtres les écarts sont conséquents. L'analyse d' I_n en fonction de l'intensité de P_i montre que la sous-estimation des mesures est globale, du moins vis-à-vis de BILJOU©. Les valeurs de I_n % de P_i sont systématiquement inférieures à celles de $B.I_n$ % de P_i , alors que pour le douglas à part pour les pluies < à 5 mm c'est l'inverse (Tableau VI.1). De plus la réduction des données à l'échelle journalière divise certains événements pluvieux, reliés alors à de faibles pluies alors qu'elles sont en réalité plus conséquentes. Sur le pas de temps journalier, les pluies < à 15 mm représentent alors 73 % de la pluie alors que sur le pas de temps de l'évènement pluvieux, elles équivalent seulement à 39 % de P_i cumulé. La classe > à 15 mm représente alors 60 % de P_i avec des taux d'interception associés très faibles, pouvant expliquer une partie de la sous-estimation des mesures observées.

Les résultats pour les hêtres sont donc tout de même faibles et restent à considérer avec prudence. Les coefficients de variations des mesures sont pourtant plus faibles pour les hêtres que pour les douglas (19 et 32 % en moyenne sur l'ensemble des saisons de mesure). Les valeurs de ces derniers sont dans la gamme des coefficients de la littérature (Herbst et al., 2008; Zimmermann et Zimmermann, 2014). On note, comme (Zimmermann et Zimmermann, 2014) une tendance de ces derniers à diminuer avec l'augmentation de P_i . Gerrits et al. (2010), pour une hêtraie au Luxembourg, similaire à celle de Vielsalm, détermine une corrélation spatiale des pluvioléssivats de 6-7 m. Notre dispositif de pluviomètres est moins dense. Il est alors possible que l'hétérogénéité spatiale des pluvioléssivats, particulièrement sous les hêtres, ne soit pas correctement caractérisée, amenant à une sous-estimation de l'interception.

VI.1.1.2. Le bilan hydrique du sol

Malgré un drainage qui n'a pu être évalué qu'au travers de la modélisation, l'ETR, déterminée à l'échelle de quelques jours ou de la saison, par la méthode du bilan hydrique du sol offre des résultats comparables aux autres méthodes. Le drainage est donc le souci majeur dans notre cas pour l'application de cette méthode, mais malheureusement mis à part avec une amélioration des simulations, comme évoqué précédemment (Section III.2.3), peu de solutions sont proposées. Mis à part le drainage et la pluviométrie incidente déjà évoquée au travers de la méthode analytique, les erreurs d'estimation de l'ETR par la méthode du bilan hydrique du sol dépendent donc des estimations de R_U et R_t , soit principalement du nombre et de la profondeur des horizons du sol à prendre en compte et de la caractérisation des teneurs en eau du sol de chaque horizon.

La profondeur de sol et la profondeur racinaire

Les prélèvements à la tarière et l'observation de profils pédologiques, sont les plus efficaces pour la détermination de la profondeur de sol potentielle et des profondeurs racinaires. Cependant, ces manipulations sont lourdes et destructives et la caractérisation de l'hétérogénéité est assez limitée. Cela se constate par exemple au niveau des relevés racinaires des douglas, pour lesquels il reste assez étonnant de ne pas trouver, comme pour les hêtres, des racines au-delà de 80 cm de profondeur.

Une méthode indirecte telle que le GPR donne dans notre cas des résultats peu satisfaisants concernant la détermination de la profondeur de sol. La méthode GPR est dépendante de la caractérisation de la permittivité diélectrique du sol, elle-même dépendante pour sa détermination, des teneurs en eau du sol mesurées sur le site. L'erreur semble pouvoir alors être relativement importante, puisqu'à partir des images obtenues et de la permittivité considérée, la profondeur de sol estimée est d'environ 2 m, donc 70 cm de plus que la profondeur déterminée à la tarière ou à partir des fosses. Cela est donc conséquent en termes de ressources en eau du sol. Cette méthode couplée à des mesures directes permet tout de même de constater une certaine homogénéité de la profondeur de sol sur la Parcelle témoin.

Les teneurs en eau du sol

A l'échelle de la Parcelle témoin, une forte variabilité des teneurs en eau du sol est constatée entre les différents points de mesures. Elle s'explique par l'hétérogénéité de la porosité du sol, de la charge caillouteuse, de la densité racinaire, de la consommation en eau des arbres, ainsi que par celle de la structure de la canopée, qui impacte la variabilité des précipitations arrivant au sol. Concernant la fiabilité des appareils de mesure des teneurs en eau volumique du sol, les marges d'erreurs annoncées par les constructeurs sont faibles. Cependant, l'utilisation des sondes avec les coefficients de calibration d'origine peut être une source d'erreur non négligeable. A Vielsalm, le sol ne présente *a priori* pas de conditions particulières justifiant une calibration spécifique. Une calibration spécifique permettra bien entendu une amélioration de la fiabilité des mesures, mais ces manipulations restent lourdes en termes de temps et de main d'œuvre.

A Vielsalm, les coefficients de variation des mesures sont en moyennes sous le sous-peuplement de hêtres, de 42 et 43 %, à 20 et 40 cm respectivement et sous le sous-peuplement de douglas, de 49 et 37 %. A 90 cm, sur base de 4 points de mesures, les coefficients de variation sont, sous les sous-peuplements de hêtres et de douglas respectivement de 20 et 15 %. Schume et al. (2003) calculent en fonction de la date de mesure, des coefficients de variation variant de 9 à 12 %. Buttafuoco et Castrignanò (2005) calculent des coefficients de variation des mesures compris entre 16 et 23 %, inversement proportionnels aux teneurs en eau du sol. A l'inverse, Schwärzel et al. (2009) constatent que plus les teneurs en eau du sol sont fortes, plus les coefficients de variation le sont également. Ils mesurent sous un peuplement d'épicéas des coefficients de variation de 29 et 48 %, en avril et septembre respectivement, et sous un peuplement de hêtres de 8 et 19 %. Dans les 40 premiers cm, la variabilité mesurée est donc assez importante en comparaison à la littérature. Elle reste tout de même comparable à celle observée par Schwärzel et al. (2009) sous épicéas. La différence de protocole d'échantillonnage peut éventuellement expliquer la plus forte variabilité mesurée à Vielsalm, les points de mesures étant espacés d'environ 15 m. La caractérisation de la variabilité spatiale des teneurs en eau du sol est

dépendante du protocole d'échantillonnage. Les exemples sont multiples dans la littérature. Schwärzel et al. (2009) déterminent des distances verticales et horizontales maximales de 30 cm entre les capteurs afin de pouvoir caractériser en continu la variabilité spatiale à « fine échelle ». Les capteurs sont alors disposés le long de transects de 2 à 3 m de long, et chaque profondeur caractérisée par 6 à 9 réplifications de la mesure. Unsworth et al. (2004) développent un protocole quelque peu similaire au nôtre, sur 30 cm de profondeur. Quatre réflectomètres (CS615 Campbell) sont disposés verticalement le long d'un transect de 30 m, mesurant en continu la teneur en eau du sol et 34 paires de capteurs sont répartis sur le site expérimental de 2.3 ha afin d'assurer une mesure toutes les 1 à 4 semaines. Wilson et al. (2001) utilisant également les réflectomètres CS615, déterminent la teneur en eau volumique du sol à partir de 7 profils (4 profondeurs de mesures). Enfin d'autres auteurs privilégient la répétition spatiale à la mesure en continu, et installent alors sur des surfaces d'environ 0.5 ha, 150 à 200 points de mesures (Buttafuoco et Castrignanò, 2005; Schume et al., 2003). Les mesures sont réparties selon différentes grilles, la variabilité étant alors à la fois caractérisée à « moyenne échelle » (quelques mètres) et à fine échelle (inférieure au mètre), et réalisées environ une fois par mois. Les coefficients de variation des mesures de teneurs en eau dans Unsworth et al. (2004) dont le protocole est proche du nôtre, ne sont malheureusement pas précisés.

Pour rappel, l'hétérogénéité spatiale des teneurs en eau volumique du sol est modulée par les entrées d'eau, dépendantes des différences de structure du couvert forestier, puis par les propriétés hydriques et porales des sols ainsi que par la transpiration des espèces ligneuses. Globalement, les coefficients de variations mesurés sont forts, conférant à ces mesures une marge d'erreur assez conséquente. Mais la bonne concordance des résultats avec les autres méthodes d'évaluation de l'ETR, autorise une certaine confiance dans les valeurs moyennes mesurées. A l'avenir, afin de réduire la marge d'erreur liée aux mesures, il serait utile d'intensifier le réseau de mesure à l'échelle de la Parcelle témoin et de quantifier plus précisément la variabilité verticale des teneurs en eau.

VI.1.1.3. L'eddy covariance

Parmi toutes les sources d'incertitudes sur la mesure d'eddy covariance existantes, il apparaît primordial, en fonction de la distance séparant les appareils de mesure de la canopée, de développer un facteur de correction du filtrage des hautes fréquences dépendant du VPD.

Malgré les progrès, étant donné les incertitudes vis-à-vis de la détermination du footprint, il reste actuellement difficile de distinguer clairement la contribution des espèces au sein des flux mesurés. Les estimations à l'échelle du peuplement à partir du changement de la tour sont en tous cas réalistes vis-à-vis des autres méthodes de mesure et de la littérature.

VI.1.1.4. La modélisation

L'utilisation du modèle BILJOU© est satisfaisante, mais la comparaison des sorties du modèle avec les mesures de transpiration et d'interception durant 2010-2011 soulève tout de même plusieurs questions.

Premièrement, concernant la transpiration des douglas en 2011 durant le printemps sec et chaud, un écart entre la transpiration mesurée et modélisée est observé, particulièrement pour les journées à forte demande atmosphérique (forte ETP). Nous l'avons vu, l'incertitude liée aux mesures transpiratoires reste non négligeable, mais étant donné les conditions climatiques particulières de ce printemps, il semble important de ne pas négliger ces écarts. L'évolution des flux de sève en 2011, vis-à-vis des variables biologiques mesurées et des conditions édaphiques, est discutée plus en détail ultérieurement. En outre, aucune relation avec la REW n'a pu être mise en évidence lors de la diminution de la transpiration des douglas pour de fortes ETP journalières. La paramétrisation du LAI pourrait éventuellement expliquer ces écarts. Une valeur moyenne est utilisée pour 2010 et 2011, mais pour les douglas, le LAI mesuré par le LAI2200 est significativement différent entre les deux années (4.2 en moyenne de mai à octobre en 2010 et 3.8 en 2011). De plus, la différence se marque particulièrement en début de saison (Figure IV.2). Cependant, cette

différence ne se retrouve pas au niveau de la mesure des capteurs PAR (Figure IV.3) et une variation aussi faible du LAI (0.4) n'a que peu de répercussions sur la modélisation des flux transpiratoires. Il reste alors difficile de conclure sur la nature des écarts observés entre la transpiration mesurée et modélisée pour les douglas en 2011.

Deuxièmement, nous avons pu constater des différences au niveau de l'interception mesurée et modélisée. Etant donné l'incertitude sur les mesures, en particulier pour le sous-peuplement de hêtres, il est difficile de tirer des conclusions sur une amélioration de la modélisation. Cependant, indépendamment de nos mesures, on constate que l'utilisation du pas de temps journalier pour le calcul de l'interception peut être une source d'erreur non négligeable. L'interception de certains événements pluvieux, séparés quand réduits au pas de temps journalier, aura tendance à être au total surestimée. Pour l'exemple, un événement pluvieux de 20 mm aura une interception considérée comme quasi nulle, alors que 2 événements pluvieux de 10 mm engendreront des flux d'interception non négligeables. La prise en compte des événements pluvieux complets dans les fichiers météorologiques permettrait sans doute une amélioration de la modélisation. Le pas de temps journalier est cependant plus simple d'utilisation et standard, beaucoup de données n'étant disponibles qu'à cette échelle.

VI.1.2. Quelles différences entre espèces ?

En ce qui concerne le calcul de la RU, les teneurs en eau du sol mesurées *in situ* entre les sous-peuplements présentent peu de différences. Les deux sous-peuplements présentent des RU équivalentes et élevées, 203 et 221 mm pour les hêtres et les douglas respectivement.

Les densités de flux de sève des hêtres sont supérieures à celle des douglas. De juin à septembre on calcule une différence moyenne de 10 % entre les SFD journalières moyennes des hêtres et des douglas. Cette différence augmente cependant avec de fortes valeurs de VPD. Les mesures sont du même ordre de grandeur que celles trouvées dans la littérature. En

saison de végétation, les flux transpiratoires du sous-peuplement de hêtres sont supérieurs à ceux du douglas de 20 % en moyenne (de juin à septembre). Les différences de surface d'aubier à l'hectare, en fonction des classes de circonférence des espèces, accentuent les différences de densités de flux de sève observées. A l'échelle de l'arbre, une fois pris en compte les surfaces d'aubier et les profils radiaux de densités de flux de sève des espèces, la transpiration des douglas de la classe de circonférence]220 ; 260] correspond en moyenne à celle de la classe]110 ; 130] pour les hêtres. Les résultats sur l'interception, confirment que les douglas interceptent plus d'eau lors d'événements pluvieux que les hêtres, réduisant alors les apports au niveau du sol.

Par sous-peuplement, l'ETR moyenne journalière mesurée en saison de végétation est de 1.9 et 2.2 mm en 2010 (105 jours de mesure) et de 1.7 et 1.5 mm en 2011 (156 jours de mesure), pour les hêtres et les douglas respectivement. Concernant la répartition des flux au sein de l'ETR, la transpiration représente en moyenne 86 % de l'ETR pour le sous-peuplement de hêtres et 67 % pour le sous-peuplement de douglas. Malgré une répartition différente des flux au sein de l'ETR, les sous-peuplements présentent des valeurs d'ETR saisonnières équivalentes (463 et 470 mm cumulés sur les 2 saisons de mesure 2010-2011). Ces résultats, identiques à ceux obtenus par Aussenac (1972) et Aussenac et Boulangeat (1980), soutiennent la théorie de conservation des flux d'évapotranspiration pour des stations similaires (en particulier au niveau climatique), indépendamment de l'espèce, de la taille ou encore de l'âge des peuplements (Jarvis et McNaughton, 1986; Roberts, 1983). L'échelle spatiale prise en compte ici est cependant faible. Il faut mentionner que Peck et Mayer (1996) contredisent cette théorie en constatant de larges variations de l'évapotranspiration à l'échelle de l'Europe.

La modélisation des flux transpiratoires par BILJOU© sur 14 ans (1998-2011) abouti à des valeurs moyennes annuelles respectives de 212 et 225 mm pour les feuillus et les résineux, en considérant les calculs moyens de RU et un LAI_{max} équivalent à celui de 2010-2011 (soit 53 et 54 % de $B.ETR.m_H$ et

B.ETR.m_D respectivement). A l'échelle annuelle B.ET_u représente respectivement 11 et 6 % de B.ETR.m_H et B.ETR.m_D.

Donc, sur base de ces résultats, l'impact des espèces sur les flux d'ET mesurés par eddy covariance se marquera selon leur phénologie et leur influence dans le partitionnement des flux constitutifs de l'ETR.

En associant les secteurs géographiques à des espèces, pour la classe de PPFD à saturation et pour des classes de VPD faibles à moyennes, l'assimilation de carbone et les flux d'évapotranspiration mesurés par eddy covariance sont plus importants pour le peuplement à dominance de résineux que pour celui à dominance de feuillus. Pour les classes de VPD journalière les plus fortes, l'assimilation de carbone des feuillus devient supérieure. La différence observée à l'échelle de la tour est alors associée principalement à une surface foliaire plus élevée pour le secteur des résineux au sein du footprint des mesures et/ou à une contribution du sous étage et du sol non négligeable au sein des flux d'ET concernant les résineux.

Dans un contexte de changement climatique (augmentation des températures, modifications des précipitations, allongement de la période végétation...) les deux espèces sont dans des situations différentes. De par leur capacité de réserve en eau dans le tronc et de redistribution hydraulique les douglas sont reconnus comme résistants à la sécheresse. Cependant une sécheresse printanière affectera le contenu en eau du sol plus rapidement sous les douglas que sous les hêtres, ces derniers ne débourrant que fin avril. De plus la compétitivité est également dépendante de l'architecture de la canopée et de l'orientation des feuilles (Leuschner et al., 2001), facteurs influant sur les flux d'interception et de transpiration. De ce point de vue-là, les douglas interceptent davantage d'eau que les hêtres, réduisant alors la quantité d'eau arrivant au sol.

Au vu de ces résultats, il est donc primordial, outre les aspects nutritionnels, de considérer l'impact de la RU sur le fonctionnement hydrique des espèces dans la sélection des stations. Le choix des essences et leur sylviculture doivent être adaptés de façon à maximiser la prospection du sol et les entrées d'eau dans le système sol-plante, tout en optimisant les flux d'évapotranspiration.

VI.1.3. Vielsalm : un site « épargné » par la sécheresse de 2003 ?

Les résultats confirment que le site de Vielsalm a été peu touché l'année même par l'aléa climatique de 2003, quel que soit le sous-peuplement. Les indices de stress modélisés, même pour les calculs de RU inférieurs, restent faibles (Figure IV.26). Il en est de même avec les différents scénarios de drainage et de charge caillouteuse (Section III.2.3). La NEE et l'ET mesurées cette année-là sont les plus fortes sur la période 1998-2011. Cependant, on remarque tout de même à partir des moyennes journalières d'ET en fonction des classes de VPD, que les années 2003 et 2004 présentent les écarts négatifs les plus importants vis-à-vis de la moyenne 1998-2008. Les classes de VPD supérieures étant peu concernées par les jours pluvieux, nous pouvons faire l'hypothèse que le problème de mesure du système d'eddy covariance lors de précipitations affecte peu ces résultats. Pour l'année 2004, malgré une saison de végétation présentant de fortes demandes atmosphériques en comparaison à la moyenne 1998-2011, elle est tout de même moins stressante que 2003. Les mesures dendrochronologiques montrent une diminution de la croissance pour les hêtres jusqu'en 2005 et pour les douglas jusqu'en 2006 (Annexe 7, Figure A.13). Jusqu'en 2006, les indices de stress modélisés pour le calcul de RU inférieur restent cependant très faibles. Les écarts à la moyenne 1998-2008 de la NEE mesurée à l'échelle annuelle sont négatifs de 2004 à 2006 (-1, -14 et -5 % respectivement), mais la baisse d'assimilation de carbone n'est pas aussi forte qu'en 1998 ou 2000 (Figure VI.1), années pour lesquelles les conditions climatiques ont été *a priori* limitantes (faible PPFD, forte pluviométrie). Concernant l'ET, les écarts à la moyenne 1998-2008 des années 2004 à 2006 sont faibles (-4, 5 et 11 % respectivement), comme pour la plupart des années depuis 1998. À l'échelle journalière en fonction des classes de VPD, les résultats de 2005 et 2006 sont plus mitigés qu'en 2003 et 2004 (Figure V.5).

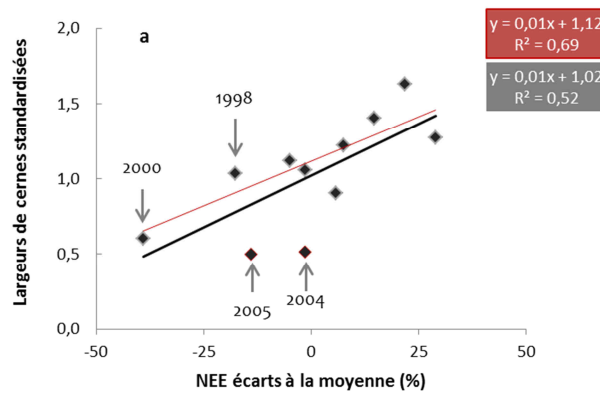


Figure VI.1 : Largeurs de cernes standardisées pour les hêtres (obtenues à partir de mesures dendrochronologiques) en fonction des écarts annuels à la moyenne 1998-2008 de la NEE annuelle, exprimés en %. La régression linéaire noire est établie à partir de l'ensemble des points, la rouge sans les années 2004 et 2005. Les équations et R^2 des régressions linéaires, obtenues en fonction des espèces, sont indiqués.

A l'échelle du peuplement et de l'année, les flux de carbone et de vapeur d'eau mesurés par eddy covariance sont plus représentatifs du sous-peuplement de hêtres. La relation entre les largeurs de cernes standardisées (Annexe 7, Figures A.16) et la NEE, même si elle est périlleuse vu la complexité des interactions au sein du cycle du carbone en forêt, est meilleure pour les hêtres que les douglas (Annexe 12, Figure A.25). En 2004 et 2005 les accroissements radiaux des hêtres sont faibles, probablement en lien avec les arrières effets de 2003 et au cumul de conditions climatiques défavorables, alors que la NEE mesurée se situe aux alentours de la moyenne de 1998 à 2011. Il est intéressant cependant d'observer que sans ces 2 années, la relation entre les largeurs de cernes et la NEE s'améliore (Figure VI.1). Cela met en avant les phénomènes de réallocation de carbone entre feuilles-branches-troncs-racines et les modifications potentielles des taux de photosynthèse-respiration (pendant et/ou après des années présentant des stress hydriques).

L'estimation de la WUE, calculée à l'échelle annuelle (Annexe 13, Figure A.26), profitera d'une correction plus adéquate d'ET pour les jours pluvieux. On constate cependant qu'avec ou sans la correction apportée dans cette étude, la WUE diminue en 2003 et en 2006, en comparaison à la

moyenne de 1998 à 2008 (-15 et -11 % sans correction d'ET et -8 et -9 % avec correction d'ET, en 2003 et 2006 respectivement). En 2004 et 2005, la WUE annuelle est égale à la moyenne 1998-2008.

Du point de vue de la dendrochronologie, l'année 2006 est particulièrement défavorable pour les résineux, alors qu'à l'inverse les hêtres retrouvent une croissance « normale » à partir de cette année-là (Annexe 7, Figure A.13). A l'échelle annuelle il est difficile de trouver des indices reliant les flux de carbone et les largeurs de cernes des douglas, les flux mesurés par eddy covariance représentant davantage les hêtres. A l'échelle journalière il est par contre intéressant d'observer une période de baisse marquée de la GPP pour le secteur NE (douglas) aux alentours du DOY 200, durant une période de 12 jours sans pluie (Figure VI.2). Qui plus est, cette chute de la GPP correspond à l'approche du seuil critique de la réserve en eau disponible (R_t) modélisée avec le calcul de RU inférieur (Figure VI.3).

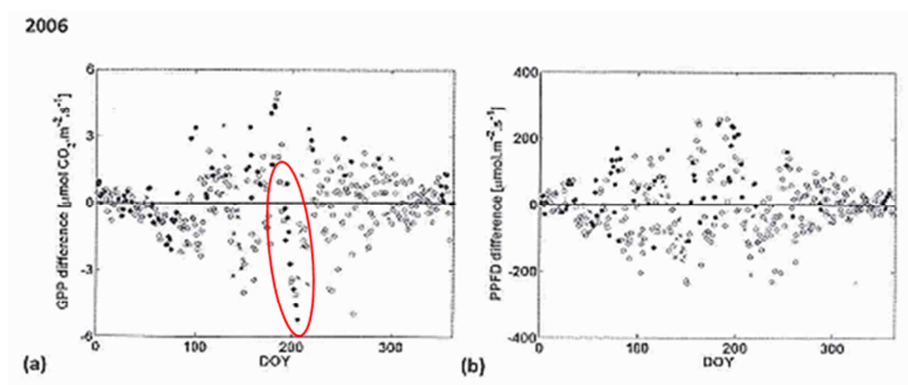


Figure VI.2 : Ecarts aux moyennes journalières 1998-2008, a) de la GPP journalière ($\mu\text{mol CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) et b) du PPFD journalier ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), en 2006. Les ronds noirs représentent les jours pour lesquels le vent provient du secteur NE(2), les ronds vides du secteur SW(2) et les croix, les jours pour lesquels les données de direction de vent sont absentes. Issu de Renchon (2013).

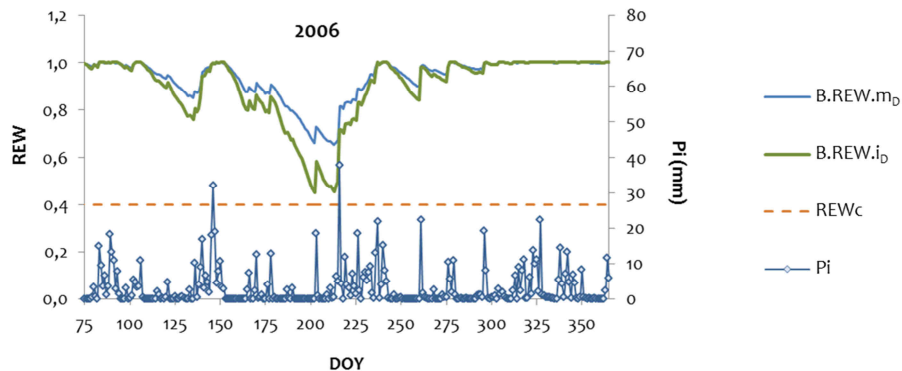


Figure VI.3 : Evolution en 2006 de la pluviométrie incidente (P_i , mm) et de la REW du sous-peuplement de douglas modélisée par BILJOU© pour les calculs de RU moyen ($B.REW.m_D$) et inférieur ($B.REW.i_D$). La REW critique (REW_c) correspondant à 40 % de la RU est indiquée.

VI.1.4. L'année 2011 : une autre année potentiellement stressante

Contrairement à l'année 2003, toutes les espèces sur le site montrent en 2011 une forte diminution de la largeur de cernes (Annexe 7). Le printemps 2011 a été sec et chaud, présentant les écarts positifs aux moyennes 1998-2011 les plus importants pour les variables T_a , R_g et VPD . Ces écarts sont supérieurs à ceux de 2003 (Annexe 6 Figure A.7). Ces conditions printanières sont défavorables pour la croissance radiale des espèces l'année en cours, en particulier pour le hêtre (Dittmar et al., 2003; Lebourgeois et al., 2005; Manise et Vincke, 2012).

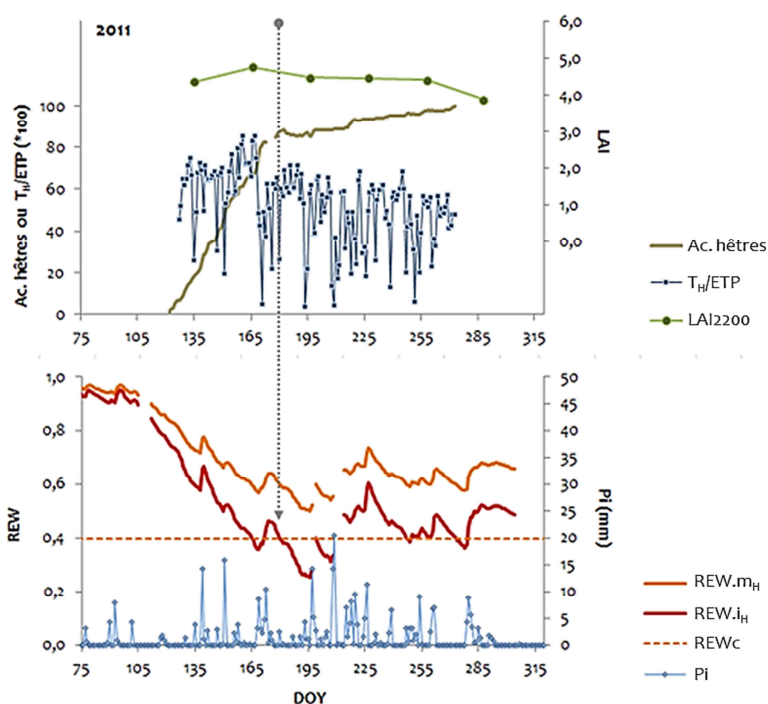


Figure VI.4 : Evolution en 2011 pour le sous-peuplement de hêtre, en haut : de l'accroissement en circonférence relatif moyen journalier (Ac. hêtres), du rapport T_H/ETP journalier * 100 (avec T_H la transpiration mesurée) et du LAI mensuel mesuré à l'aide du LAI2200 ; en bas : de la REW mesurée à partir des calculs de RU moyen ($REW.m_H$) et inférieur ($REW.i_H$) et de la pluviométrie incidente (P_i , mm). La flèche verticale représente le seuil de REW_c pour $REW.i_H$ correspondant au ralentissement de la croissance.

En ce qui concerne le hêtre, la faible croissance radiale provoquée par une sécheresse printanière est expliquée par la fermeture stomatique, diminuant alors l'assimilation de carbone (Dupouey et al., 1993; Saurer et al., 1997). En effet le hêtre est une espèce peu dépendante des réserves en carbone pour l'élaboration du nouveau cerne, étant donné qu'une grande majorité de l'aubier reste fonctionnel d'une année à l'autre (et non pas les derniers cernes comme chez le chêne par exemple). La réactivation de la croissance est alors rapide, quelques jours après l'expansion des feuilles et l'assimilation de carbone (Lebourgeois et al., 2005; Lemoine et al., 1999). Une régulation du fonctionnement hydrique et carboné à ce moment-là, provoque alors la formation d'un cerne étroit. Granier et al. (1995) montrent

que l'arrêt de la croissance annuelle est synchrone avec le passage de R_t sous la valeur de 40 % de RU. Dans notre étude, les estimations de REW avec le calcul moyen de RU n'atteignent pas REWc. Il n'y a qu'avec une REW calculée sur base du calcul de RU inférieur, que la R_t des hêtres diminue sous REWc de mi-juin à fin juillet environ, ce qui correspond au ralentissement de la croissance (Figure VI.4). Cependant, ce scénario là est le plus contraignant et sur une période de croissance quasi similaire, les hêtres forment en 2010 un cerne (en largeur ou en surface) près de deux fois supérieur à celui de 2011. Le taux de croissance en 2011 est donc inférieur à celui de 2010, ralentissement déclenché a priori avant le passage éventuel de la R_t en dessous de la REWc. L'hypothèse d'une fermeture stomatique en début de saison ne se vérifie pas avec les flux transpiratoires mesurés. Globalement, le rapport T_H/ETP durant la période de croissance des hêtres (jusqu'au DOY 180), est stable (en moyenne 0.7 pour les jours sans pluie). De plus, les réponses moyennes journalières à l'ETP des hêtres (densités de flux de sève mesurées) ne sont pas différentes en 2010 et 2011 (Figure IV.15). Cependant, seules 2 années de mesure de flux transpiratoires sont disponibles et suite aux problèmes de calibration rencontrés il est difficile de considérer l'année 2010 comme une année de référence.

En ce qui concerne le douglas, une légère diminution de la réponse des flux transpiratoires au VPD est observée en 2011 en comparaison à 2010 pour de fortes valeurs d'ETP (Figure IV.15), qui semble correspondre globalement au début de saison de végétation (DOY 125 à 200 ; Figure VI.5). Cependant, la REW calculée quel que soit le calcul de RU, demeure au-dessus de REWc. Par contre la REW modélisée pour le calcul de RU inférieur se situe en-dessous de REWc durant quelques jours de cette période (Figure VI.5). Une régulation stomatique en raison du déficit hydrique pourrait expliquer les faibles largeurs de cernes mesurées en 2011 sur les douglas (Annexe 7). Cependant, il s'agit du scénario le plus contraignant et durant les DOY 140 à 180 environ, la transpiration modélisée en 2011 est supérieure à celle mesurée, accentuant alors la vidange du sol. Il est alors plus probable, qu'en moyenne sur la Parcelle témoin la REW soit restée au-dessus du seuil de 0.4 durant cette période, mais il n'est pas exclu que certains arbres aient connus des périodes de déficit hydrique. Ducrey (1988) montre que la croissance en

circonférence est la première activité physiologique stoppée par la diminution du potentiel hydrique de base, avant la photosynthèse. Il est alors envisageable que le potentiel hydrique du sol pour les douglas ait atteint une valeur critique pour la croissance radiale sans affecter le fonctionnement stomatique de façon proportionnelle, expliquant alors les faibles largeurs de cerne mesurées. Cette hypothèse peut être également retenue pour les hêtres en 2011.

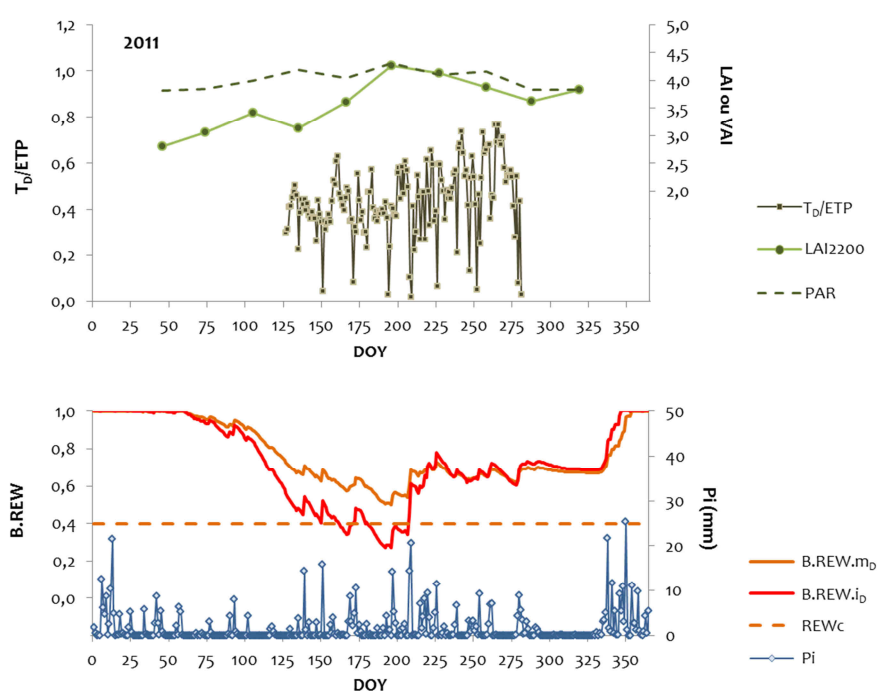


Figure VI.5: Evolution en 2011 pour le sous-peuplement de douglas, en haut : du rapport T_D/ETP journalier (avec T_D la transpiration mesurée), du LAI mensuel mesuré à l'aide du LAI2200 et du VAI mesuré à l'aide des capteurs PAR (avec $k = 0.6$) ; en bas : de la REW modélisée à partir des calculs de RU moyen ($B.REW.m_D$) et inférieur ($B.REW.i_D$) et de la pluviométrie incidente (P_i , mm).

Du point de vue de la mesure d'ET par eddy covariance, les résultats sont difficilement interprétables. Les moyennes journalières d'ET en fonction des classes de VPD en 2011 sont légèrement inférieures à celles de 2010 (Figure V.5), mais aucune distinction de secteur n'est prise en compte. Sur une année, en séparant les journées par secteurs et classes de VPD, les effectifs sont alors trop réduits pour effectuer une analyse pertinente, en

particulier pour les classes de VPD supérieures. Il serait alors intéressant de travailler à l'échelle de la demi-heure, afin de conserver cette approche par secteur.

Parmi les hypothèses explicatives de ces cernes étroits, reste d'éventuels effets spécifiques des variables climatiques printanières telles que la température par exemple, sur l'écophysiologie des espèces. Les données de flux de carbone par eddy covariance après le changement de la tour ne sont pas encore disponibles, mais leur analyse permettra certainement d'affiner ces résultats et de voir si 2011, comme 2004 et 2005, s'écarte de la relation obtenue entre les largeurs de cerne et les flux de carbone (Figure VI.1), écarts supposés mettre en évidence des modifications interannuelles dans les mécanismes de réallocation de carbone.

L'année 2011 permet de mettre en évidence l'effet espèce sur les flux transpiratoires du peuplement dans des conditions climatiques et édaphiques s'écartant de la moyenne, ainsi que l'importance de la prise en compte de divers calcul de RU pour l'interprétation des résultats.

VI.1.5. Des risques de perte de productivité et/ou de dépérissement ?

En considérant 1m50 de profondeur de sol, même avec une charge caillouteuse importante, le site de Vielsalm présente des RU moyennes élevées, semblant mettre les peuplements à l'abri de stress hydriques édaphiques critiques pour leur fonctionnement physiologiques, dans les conditions climatiques actuelles et hormis les cas extrêmes. Concernant les calculs inférieurs de RU, les valeurs calculées sont faibles (Tableau III.7) et en-dessous ou proche du seuil critique estimé à 100-120 mm (Lebourgeois, 2005; Manise et Vincke, 2012).

L'évaluation des risques de perte de productivité et de dépérissement dépend de la précision de l'évaluation de la RU, et des relations entre le fonctionnement physiologique des arbres et cette dernière. Pour le douglas par exemple, Sergent et Bréda (2013) mettent en évidence que les risques de dépérissements sont importants à partir d'une valeur cumulée sur 2 années de l'indice de stress modélisé par BILJOU© (is)

égale à 100 (Figure VI.6). La R_t simulée par BILJOU®, même pour les calculs inférieurs de RU, ne fait pas apparaître de stress hydriques critiques depuis 1998, en comparaison aux indices de stress rencontrés dans la littérature pour d'autres peuplements en Belgique et en Europe. Ces résultats viennent confirmer l'absence, pour l'instant, de risques pour la santé de ce peuplement vis-à-vis de la RU.

Les cycles de production sylvicole durant plusieurs décennies, il est important d'utiliser ce type de résultats pour des simulations dans le cadre du réchauffement climatique (baisse des précipitations estivales, allongement progressif des périodes de végétation), afin d'orienter les futures productions. Le hêtre trouble les écophysiologistes et les forestiers. Cette espèce présente une sensibilité au climat relativement importante. Des années sèches telles que 1976 ou 2003 ont provoqué dans beaucoup de hêtraies en Europe, l'année même, et les années suivantes, des dysfonctionnements physiologiques importants (mortalité racinaire, chute des feuilles, cerne étroit). Pourtant, un retour à une forte croissance à la suite du stress a également été souvent observé (Annexe 7 ; Lebourgeois, 2005). Il est important de pouvoir identifier également les facteurs déclenchant une diminution des défenses, permettant alors l'attaque de pathogènes (facteurs aggravants), comme il a été observé en Europe entre 1999 et 2001 (Nageleisen et Huart, 2005; Rondeux et al., 2003). Ces attaques ont eu de lourdes conséquences sur les peuplements de hêtres. Leur prévision est en théorie encore plus délicate, puisqu'il est alors nécessaire de corrélérer les mécanismes fonctionnels des arbres face à des aléas climatiques avec les dynamiques de populations de pathogènes (McDowell et al., 2011).

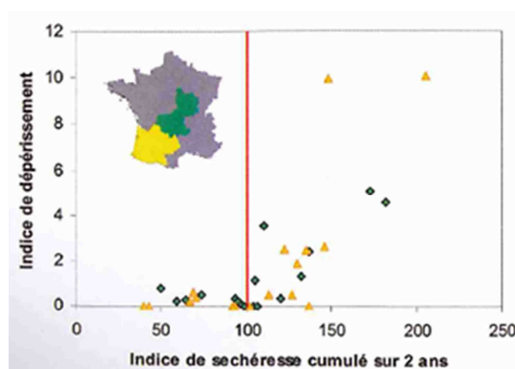


Figure VI.6 : Relation entre l'indice de dépérissement annuel et l'indice de sécheresse (sans dimension) cumulé sur deux années consécutives. Pour les 2 régions illustrées tous les dépérissements sont intervenus au-delà d'un seuil d'intensité de sécheresse égal à 100 (trait vertical). Issu de Sargent et Bréda (2013).

VI.2. Perspectives

Dans nos régions, les événements climatiques extrêmes défavorables pour les forêts, tels qu'en 1976 ou en 2003, et observables pour des peuplements sur pied, ont été relativement rares. Le savoir progresse sur les comportements physiologiques des espèces à court terme vis-à-vis de stress environnementaux, mais les conséquences à long terme, et en particulier lors de stress à répétition, sont encore assez mal cernées. L'observation et la mesure sur le terrain sont encore nécessaires. La complexité des processus au sein des cycles de l'eau et du carbone en forêt, montre à quel point il est nécessaire de développer différentes mesures pour la surveillance des écosystèmes. Qu'il s'agisse de l'eddy covariance, de la dendrochronologie, du suivi des flux de sève ou de l'eau dans le sol, ces méthodes permettent grâce à la complémentarité des échelles spatio-temporelles prises en compte, une meilleure compréhension des différents processus opérant au sein du *continuum* sol-végétation-atmosphère, et par conséquent une meilleure évaluation des risques potentiels pour les peuplements. Au terme de cette étude plusieurs pistes d'amélioration des mesures peuvent être suggérées.

La méthode du bilan hydrique du sol est satisfaisante, mais il apparaît cependant important d'améliorer à fine échelle (de l'ordre du dm), la représentativité spatiale des mesures de teneurs en eau volumique du sol. A Vielsalm, il serait judicieux qu'au moins 2 à 3 répliques des mesures de θ à chaque profondeur au sein des fosses SWC soient mises en place, distantes de 30 cm (Schwärzel et al., 2009). L'échantillonnage pourrait également être amélioré en prenant en compte davantage de profondeurs de mesures, tous les 10 cm jusqu'à 60 cm par exemple, puis tous les 20 à 30 cm jusqu'à 130 cm. Un tel échantillonnage devrait permettre une meilleure évaluation de l'absorption racinaire en fonction de la profondeur. Un couplage des mesures de teneurs en eau volumique du sol à des mesures de potentiel hydrique du sol permettrait de s'affranchir des mesures en laboratoire et de préciser les seuils d'absorption de l'eau par les racines. Afin de relier cette méthode au fonctionnement hydrique des espèces, l'évaluation de la dynamique racinaire intra et interannuelle serait intéressante à caractériser.

Des sondages à la tarière peuvent être effectués afin de réaliser des comptages racinaires et évaluer les pourcentages de biomasse vivante ou morte. Ces expériences demandent cependant beaucoup de temps et de main d'œuvre. La profondeur et la densité racinaire restent également très difficiles à évaluer. L'utilisation de la densité apparente du sol comme proxy pour la détermination des densités racinaires (Figure III.9) semble intéressante. Des expériences visant à préciser ces relations en fonction du type de sol et des espèces pourraient être mises en place.

En ce qui concerne les mesures de flux de sève par la méthode de dissipation thermique, que cela soit en raison de l'espèce échantillonnée, des matériaux et du mode de fabrication des capteurs, ou autre, il s'avère utile d'effectuer des calibrations en laboratoire avant l'installation *in situ*. Par ailleurs, les profils de densité de flux de sève sont importants à prendre en compte et il serait intéressant de pouvoir les caractériser pour chaque espèce en fonction des variations des conditions climatiques. Pour une comparaison précise avec les flux mesurés par eddy covariance, l'échantillonnage peut être basé, en plus des classes de circonférence au sein des différentes espèces, sur les directions de vent dominantes, déterminantes pour le footprint de la mesure.

L'interception des pluies s'est avérée difficile à caractériser. Une intensification du réseau de pluviomètres sous-couvert et des répliques de la mesure prise sur le pas de temps semi-horaire hors et sous-couvert, semblent nécessaires pour améliorer les évaluations. Il en est de même pour le LAI. La réalisation technique de toutes les mesures est tout de même à prendre en compte, l'automatisation pouvant être une solution alternative cependant plus coûteuse.

Pour l'analyse des flux d'évapotranspiration mesurés par eddy covariance la méthodologie de correction en fréquence des données en fonction de la hauteur et des conditions climatiques doit être améliorée, en particulier pour les données acquises antérieurement à 2010. Pour la distinction des espèces au sein du flux mesuré l'analyse du footprint doit être approfondie.

En ce qui concerne la WUE, pour une analyse comparative annuelle ou saisonnière entre hêtres et douglas, la reconstitution par secteur des flux de vapeur d'eau et de carbone mesurés par eddy covariance doit être réalisée (Aubinet et al., 2005), avant et après le changement de la tour. Avec les données issues de l'eddy covariance la WUE est analysée à l'échelle de l'écosystème. A l'échelle de la strate ligneuse, les flux de carbone pourront être également mis en relation avec les flux transpiratoires des espèces. La transpiration, à l'inverse de l'interception étant directement couplée au fonctionnement physiologique des arbres, il est possible que le rapport GPP/T soit plus apte que GPP/ET à rendre compte de la productivité des espèces face aux changements climatiques, au regard de leur réserve en eau utile du sol, de leur surface foliaire et de leur besoins nutritionnels.

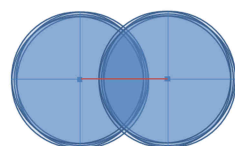
Les méthodes d'évaluation de l'ETR donnent des résultats comparables. Le choix de l'une ou l'autre va alors dépendre des objectifs de l'étude, du type d'écosystème à caractériser et des ressources financières. Il est évident que les méthodes présentées nécessitent des budgets différents, l'eddy covariance étant la plus coûteuse de toutes est envisagée pour des études à long terme. La méthode du bilan hydrique du sol a pour principal frein l'estimation du drainage, mais sur des sols « standards », elle est apte à fournir des estimations saisonnières fiables, avec un coût et une main d'œuvre relativement réduits. La méthode analytique nécessite davantage de main d'œuvre et sera plutôt mise en place à court ou moyen terme afin de fournir une analyse plus précise des composantes de l'ETR à l'échelle de l'espèce.

Annexes

ANNEXES

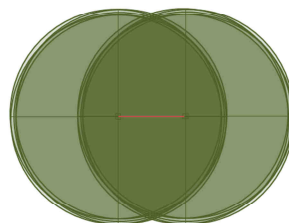
Annexe 1 : Représentativité spatiale des capteurs PAR et du LAI2200

Hêtres PAR : angle 70°
hauteur moyenne 25 m



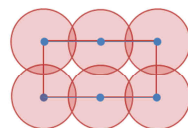
1046 m² par groupe
de capteurs
Surface couverte PAR
Hêtres ≈ 1930 m²

Douglas PAR : angle 70°
hauteur moyenne 40 m



2596 m² par groupe
de capteurs
Surface couverte PAR
Douglas ≈ 3850 m²

Hêtres LAI2200 : angle 38°
hauteur moyenne 25 m



Douglas LAI2200 : angle 38°
hauteur moyenne 40 m

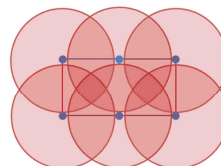


Figure A.1 : Représentation des surfaces de mesures pour les hêtres et les douglas couvertes par les groupes de capteurs PAR ou à chaque point de mesure au LAI2200. Les surfaces de mesures sont circulaires. Pour les capteurs PAR, les 2 groupes par sous-peuplement (au centre des cercles) sont distancés de quelques metres (trait rouge) et leur surface de mesure se recourent, définissant une surface couverte totale (surface couverte PAR). Pour le LAI2200, les surfaces de mesure des différents points se recourent également, permettant de couvrir en quasi-totalité pour les hêtres ou en totalité pour les douglas la Parcelle Témoin. Les angles correspondent aux angles de visées maximums des différents capteurs

Annexe 2 : Les horizons du sol

Tableau A.1 : Caractéristiques pédologiques du site d'étude (données issues de relevés de terrain 1985 par Delecour, UPB ; Tableau issu de Delmelle (2012)).

Horizons	Profondeur min (cm)	Profondeur max (cm)	Epaisseur	Texture	Structure	Elément grossiers
Horizon 1 (OF)	2	2	2	Débris et résidus organiques	Fibreuse	
Horizon 2 (OAH)	4	4	2	Matière organique sous forme d'humus	Coprogène, meuble peu poreux	
Horizon 3 (AP)	14	20	13	CCSBM* limon FOA** silt loam	Massive, peu compact, friable, peu poreux	1%
Horizon 4 (AB)	40	40	23	CCSBM limon FOA silt loam	Grumeleuse, taille 3mm, peu nette associée à une deuxième structure polyédrique sub-anguleuse, taille 10mm, peu compact, très friable, poreux	1%
Horizon 5 (BW)	58	62	20	CCSBM limon FOA silt loam	Polyédrique sub-anguleuse, taille 10mm, nette, peu compact, très friable, peu poreux	3%
Horizon 6 (BC)	79	84	22	CCSBM limon sableux FOA sandy loam	Polyédrique anguleuse, taille 10mm, nette, compact, friable, peu poreux	20%
Horizon 7 (C)	105		23	CCSBM sable limoneux FOA sandy loam	Massive, compact, friable, peu poreux	10%

*classe texturale sur base du triangle textural C.C.S.B.M. (Centre de Cartographie des Sols de la Belgique Méridionale)

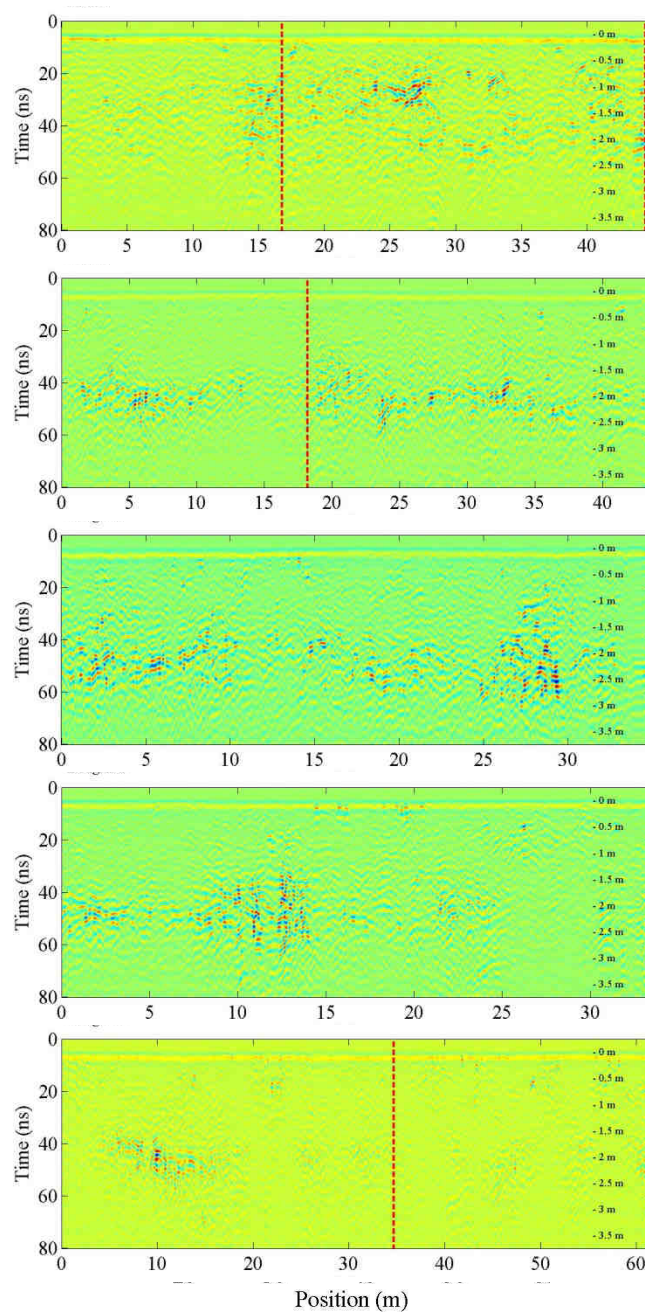
** Classification internationale des sols proposée par la FAO (1998)

Tableau A.1 (suite)

Horizons	Racines	Limite inférieure
Horizon 1 OF	Nombreuses, très fines à moyennes Horizontales à distribution régulière	Ondulée, distincte
Horizon 2 OAH	Nombreuses, très fines à très grosses Horizontales à distribution régulière	Ondulées, nette
Horizon 3 AP	Peu nombreuses, très fines à grosses Obliques, à distribution régulière	Distincte, ondulée
Horizon 4 AB	Peu nombreuses, très fines et fines Obliques, à distribution régulière	Régulière, distincte
Horizon 5 BW	Très peu nombreuses, très fines et fines Obliques, à distribution assez irrégulière	Ondulée, distincte
Horizon 6 BC	Très peu nombreuses, très fines et fines Obliques, à distribution assez irrégulière	Ondulée, nette
Horizon 7 C	Absentes	

Annexe 3 : Images GPR

Figure A.2 : Images radar obtenues à partir de l'antenne GPR correspondant de haut en bas aux transect 1, 3, 4, 5 et 6 (Tableau II.7). Pour la légende se reporter à la Figure III.1.



Annexe 4 : Teneurs en eau volumique du sol $\theta.m_H$ et $\theta.m_D$

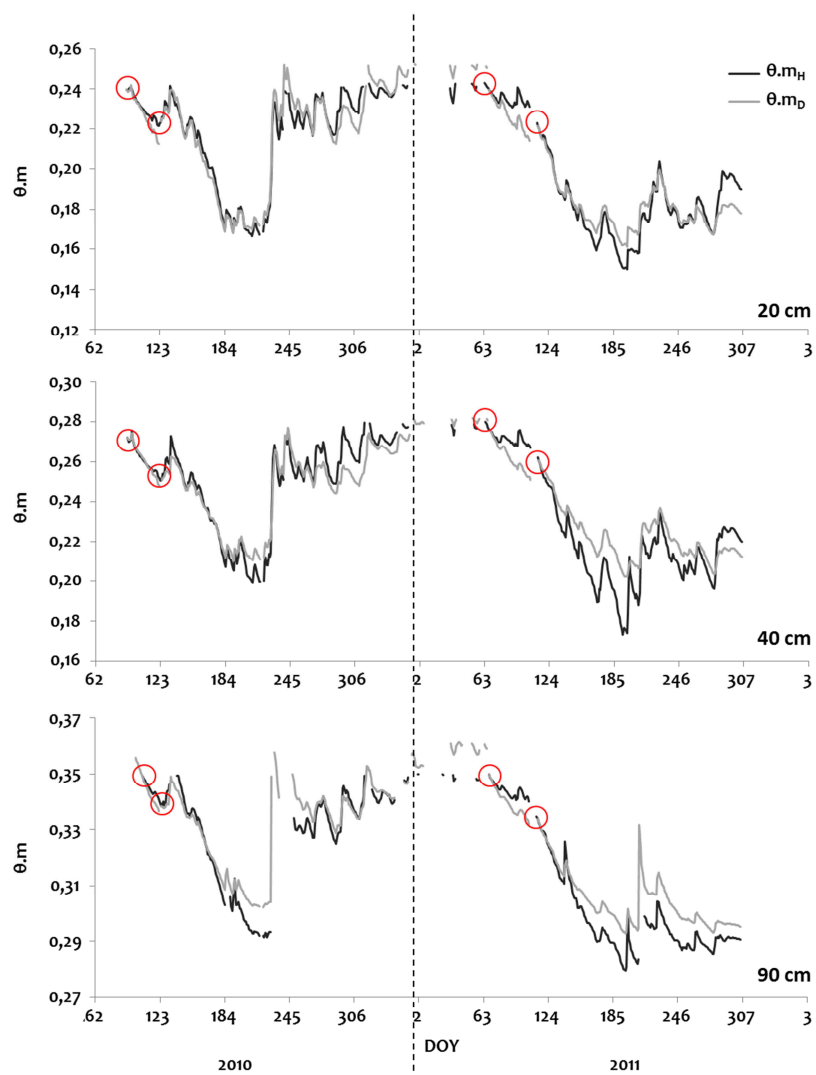


Figure A.3 : Évolution journalière, de 2010 (DOY 91) à 2011 (DOY 304), des teneurs en eau volumique du sol mesurées moyennes, par sous-peuplement, hêtres ($\theta.m_H$) et douglas ($\theta.m_D$) et profondeur de mesure (20, 40 et 90 cm). Elles sont obtenues à partir de l'étape 4 de la Figure II.34 (Chapitre III). A chaque journée représentée par un rond rouge, la valeur de $\theta.m_D$ est mise à niveau de celle de $\theta.m_H$.

Annexe 5 : Prise en compte de la variabilité spatiale des teneurs en eau du sol pour le calcul de la RU

La prise en compte de plusieurs points de mesures pour la détermination de la RU est importante. L'évaluation de la RU pour les hêtres uniquement à partir de la fosse SWC.H, est supérieure de 24 % à $RU.m_H$ (Figure A.4 a). Pour les douglas, l'évaluation de la RU uniquement sur base des résultats de SWC.D, est supérieur de 1 % à $RU.m_D$ (Figure A.4 a). Les plus fortes variations en pourcentage, en fonction de la méthodologie, sont observées pour le premier horizon (0 - 20 cm). Cependant, en mm, étant donné la profondeur du dernier horizon, c'est celui qui influe le plus sur la détermination de la RU du sol. L'utilisation d'un point de flétrissement (θ_{FC}) déterminé à partir de la fosse pF.H, pF.D (Figure II.17) ou la moyenne des 2, n'a que peu de conséquences sur le calcul de la RU par horizon (Figure A.4 b).

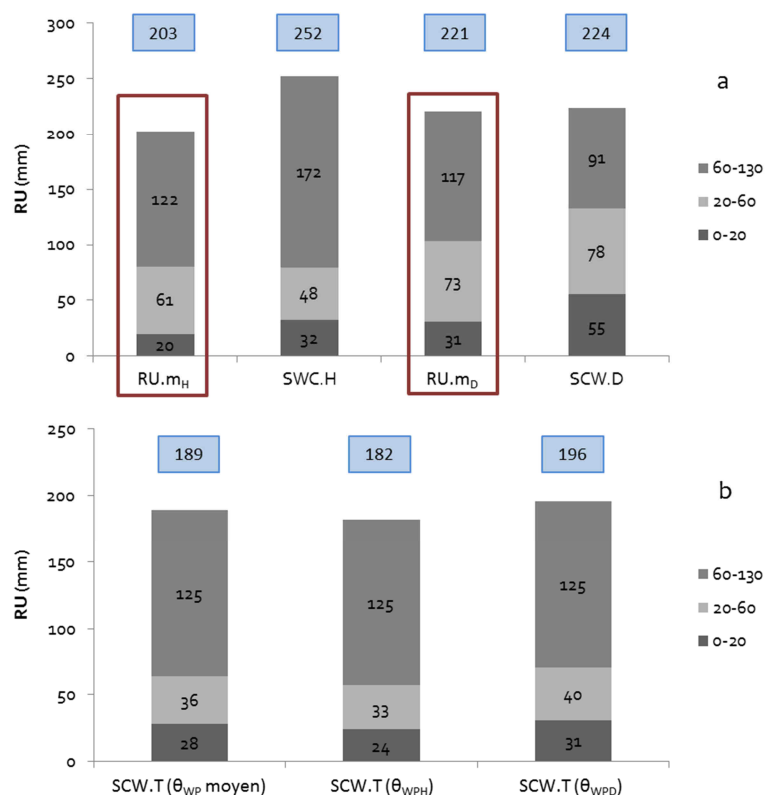


Figure A.4 : Evaluation de la RU (mm), par horizon, et pour l'ensemble des horizons (rectangles bleus, profondeur totale de 1.30 m), a) en prenant en compte pour la détermination de la capacité au champ l'ensemble des mesures de teneurs en eau du sol pour les hêtres (RU.m_H) et les douglas (RU.m_D), ou uniquement les mesures à partir des réflectomètres au sein de chaque fosse creusée (SWC.H, et SWC.D) et b) en fonction de la prise en compte du point de flétrissement permanent mesuré en laboratoire pour les hêtres (θ_{WPH}), ou les douglas (θ_{WPD}), ou la moyenne des deux (θ_{WP} moyen), pour le calcul de la RU à partir de la capacité au champ mesurée par les réflectomètres au sein de la fosse SWC.T.

Annexe 6 : Variables climatiques et évapotranspiration potentielle (ETP)

Nous avons retenu pour cette analyse, les variables climatiques jouant un rôle central dans les phénomènes physiques et physiologiques étudiés. Soit, la pluviométrie incidente (P_i , mm), principale entrée d'eau dans l'écosystème. La vitesse du vent (w_s , $m.s^{-1}$) modifiant les échanges gazeux à l'interface végétation-atmosphère ainsi que la mesure des flux par eddy covariance. La température de l'air (T_a , °C), variable pouvant être limitante pour le développement des espèces ligneuses et nécessaire au calcul du déficit de saturation en eau (VPD, hPa), principal « moteur » de la transpiration. Puis le rayonnement global (R_g , $J.cm^{-2}$), vecteur important également au sein des échanges gazeux d'eau et de carbone. Mis à part pour P_i , l'ensemble de ces variables climatiques permettent le calcul de l'ETP (Section I.2, Equation I.1).

1) Variables climatiques

Une première analyse des variables climatiques est effectuée mensuellement (Figures A.5 et A.6), en mettant l'accent sur les années 2010 et 2011 et la moyenne 1998-2011. Une seconde analyse se focalise sur la variabilité interannuelle des variables climatiques de 1998 à 2011 (Figures A.7 et A.8).

Moyennes mensuelles 1998-2011

La pluviométrie : la distribution mensuelle moyenne de 1998 à 2011 est régulière et varie entre 65 mm et 105 mm en fonction des mois (Figure A.5). Les années 2010 et 2011 ont par contre un régime pluviométrique mensuel assez particulier en comparaison à la moyenne 1998-2011. Notons en août 2010, une pluviométrie exceptionnellement forte de 215 mm, dont environ 80 mm sur 3 jours (DOY 227 à 229), provoquant une recharge en eau du sol conséquente durant la saison de végétation. En 2011, les précipitations sont relativement faibles du mois de février au mois de mai avec en mars et en

avril des quantités inférieures à l'écart-type inférieur de la moyenne. Durant la saison de végétation, les précipitations sont inférieures également à la moyenne 1998-2011, mais tout en restant comprises dans l'écart-type inférieur.

La température : en comparaison à la moyenne de 1998-2011, aucune particularité concernant la température de l'air mensuelle en 2010 et 2011 n'est observée. Les moyennes mensuelles sont particulièrement basses en janvier et en décembre 2010. De manière générale les températures moyennes mensuelles sont plus élevées en 2011 qu'en 2010.

Les diagrammes ombrothermiques : les mois de juin 2010 et mars et avril 2011 peuvent être considérés comme des mois « secs » (Figure A.6). En moyenne par contre, depuis 1998, aucun mois de l'année ne peut être considéré comme « sec ».

Le vent : mis à part en décembre 2011, les moyennes mensuelles de vitesse de vent en 2010 et 2011 sont comparables à la moyenne établie sur 14 ans. Nous nous intéresserons davantage à la direction du vent dans les chapitres suivants, concernant l'empreinte de mesure de la tour d'eddy covariance.

Le VPD : les moyennes mensuelles en 2010 et 2011 sont comparables la moyenne 1998-2011. Cependant les profils annuels sont tout de même contrastés. Pour la moyenne 1998-2011 nous observons une forme gaussienne avec un plateau en juin et juillet. En 2010, le mois de juillet présente une moyenne relativement forte (7.8 hPa, Figure A.5). En 2011 ce sont les mois d'avril et de mai qui présentent les moyennes mensuelles les plus élevées (5.5 et 5.6 hPa respectivement).

Le rayonnement global : il n'y a pas de différence remarquable à l'échelle mensuelle, entre 2010 et 2011 et en comparaison à la moyenne 1998-2011.

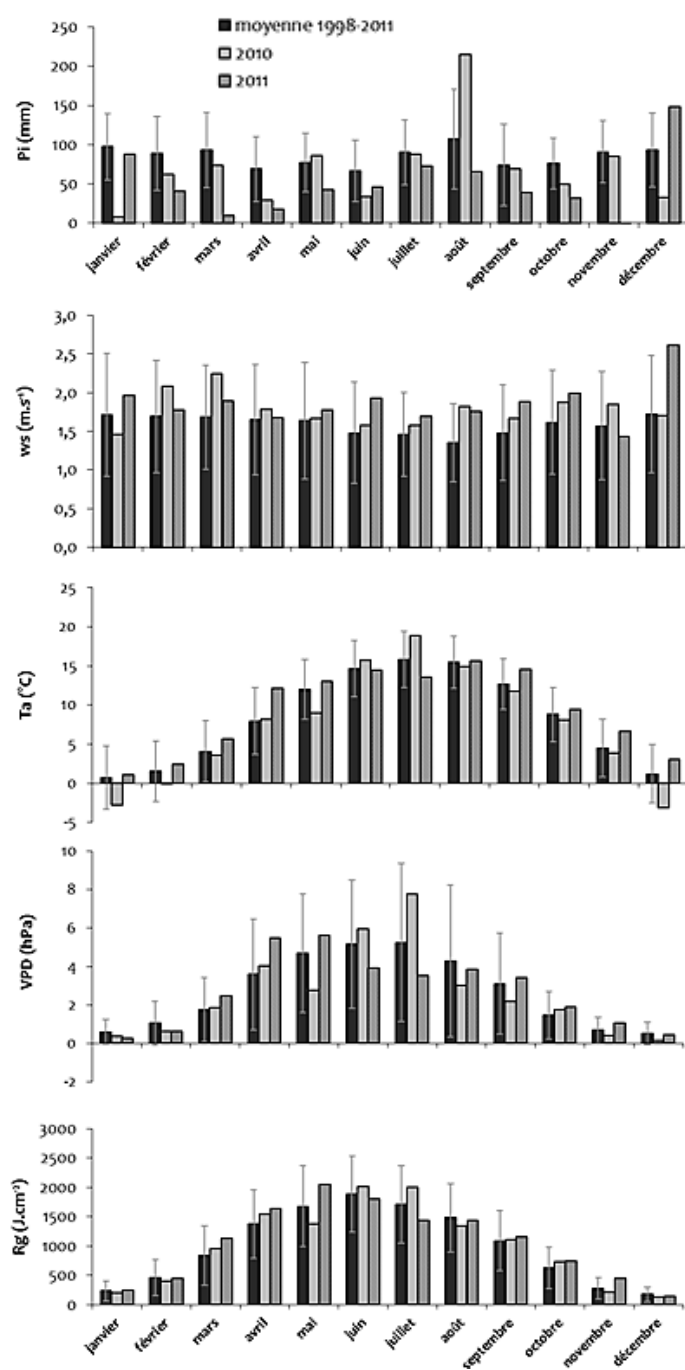


Figure A.5 : Suivi mensuel en 2010, 2011 et moyenné de 1998 à 2011, des sommes pluviométriques (P_i , mm) et des moyennes de la température de l'air (T_a , °C), de la vitesse du vent (w_s , m.s⁻¹), du déficit de saturation en eau (VPD, hPa) et du rayonnement global (R_g , J.cm⁻²).

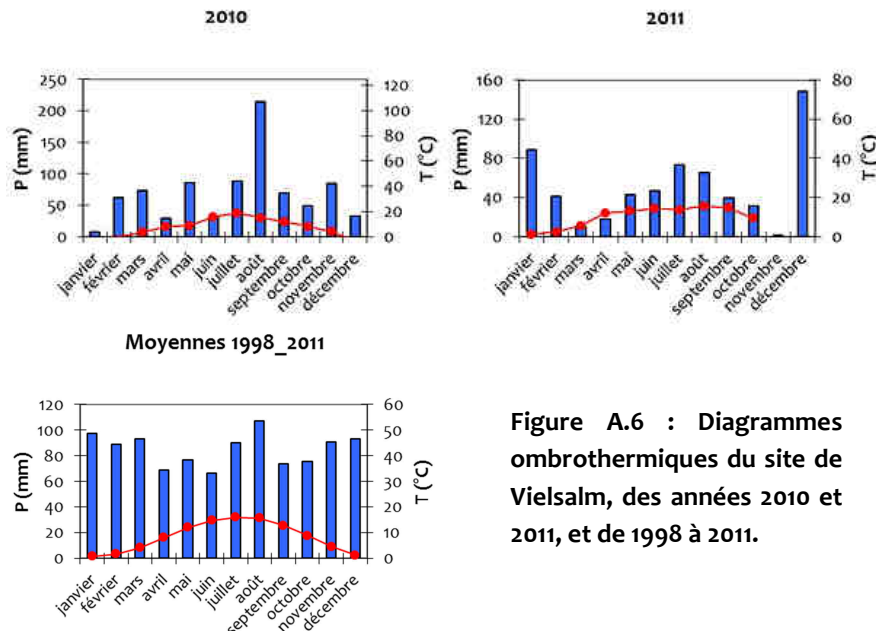


Figure A.6 : Diagrammes ombrothermiques du site de Vielsalm, des années 2010 et 2011, et de 1998 à 2011.

Analyse interannuelle 1998-2011

Pour l'analyse interannuelle des variables climatiques, les données ont été séparées en fonction des saisons. Pour chaque saison, l'écart à la moyenne 1998-2011 de chaque année est calculé et exprimé en pourcentage. Nous nous concentrons sur l'analyse des saisons « printemps » (mois de mars et avril ; Figure A.7) et « végétation » (mois de mai à septembre, Figure A.8).

Durant les saisons « printemps » et « végétation » l'évolution des écarts à la moyenne pour le VPD et R_g sont bien corrélées. Une bonne corrélation est aussi observée avec l'évolution annuelle des écarts à la moyenne de la température. Les écarts positifs remarquables du VPD et de R_g , pour la saison « printemps », correspondent aux années 2003 (61 et 20 % respectivement), 2007 (72 et 27 %) et 2011 (49 et 24 %). Pour les « printemps » 2007 et 2011, l'écart de température est également largement supérieur à la moyenne (40 et 48 % respectivement). Durant la saison « végétation », nous retrouvons pour le VPD des écarts positifs remarquables uniquement en 2003 (80 %), alors que pour R_g et T_a , la variabilité interannuelle est faible.

Pour le VPD, nous pouvons également noter l'année 2004 qui présente des écarts à la moyenne positifs relativement importants (+37 % au « printemps » et +29 % pour la saison « végétation »), et faisant suite à une année particulièrement sèche.

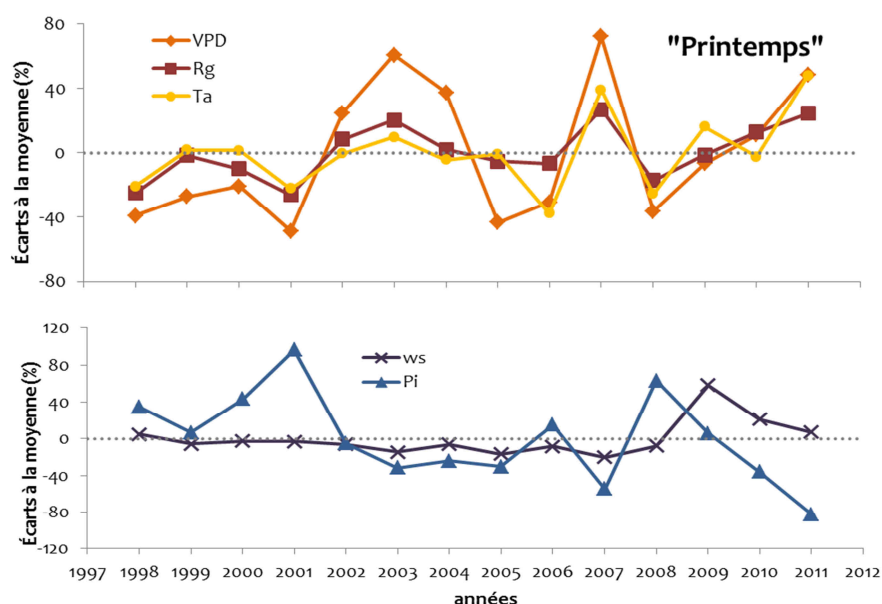


Figure A.7: Évolution annuelle des écarts à la moyenne de 1998 à 2011, exprimés en %, en haut : du déficit de saturation en eau (VPD), du rayonnement global (Rg) et de la température de l'air (Ta) et en bas : de la vitesse du vent (ws) et de la pluviométrie incidente (Pi), pour la saison « printemps ».

Concernant le vent on constate des écarts largement supérieurs à la moyenne en 2009 pour les 2 saisons (60 % environ ; Figures A.7 et A.8). Les écarts restent positifs jusqu'en 2011, alors que depuis 1999 ils sont négatifs. Un lien avec le changement de hauteur de mesure (changement de tour en 2009) est probable et sera examiné.

Concernant Pi, pour la saison « printemps », les écarts négatifs à la moyenne remarquables sur la période de 1998 à 2011 concernent les années 2011 (-83 %) et 2007 (-55 %) ; Figures A.7). Durant la saison « végétation », les écarts à la moyenne sont compris entre -35 % (2011) et +47 % (2007 ; Figure A.8). Les années 1999, 2002 et 2003 présentent également des écarts négatifs assez conséquents, compris entre -25 et -30 %.

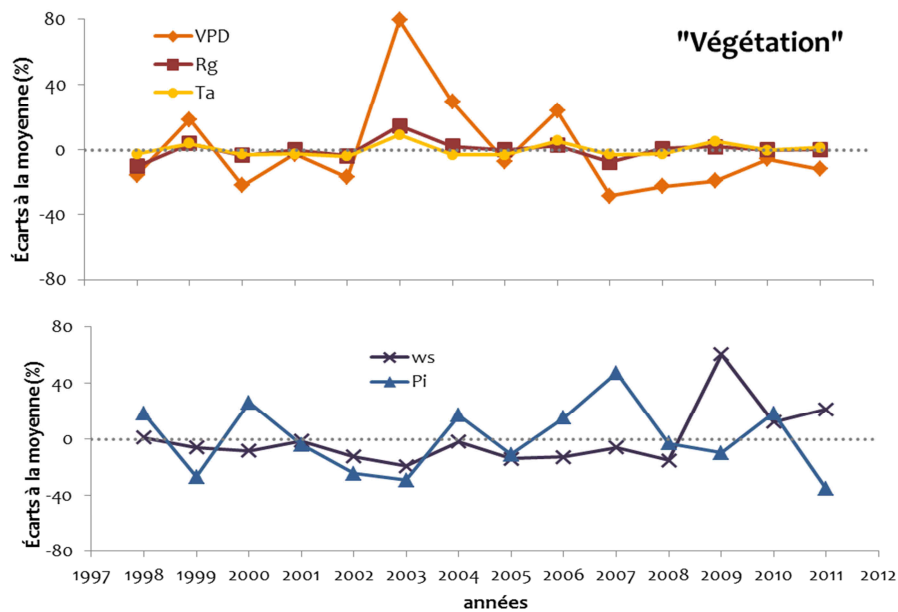


Figure A.8 : Évolution annuelle des écarts à la moyenne de 1998 à 2011, exprimés en %, en haut : du déficit de saturation en eau (VPD), du rayonnement global (Rg) et de la température de l'air (Ta) et en bas : de la vitesse du vent (ws) et de la pluviométrie incidente (Pi), pour la saison « végétation ».

2) Evapotranspiration potentielle

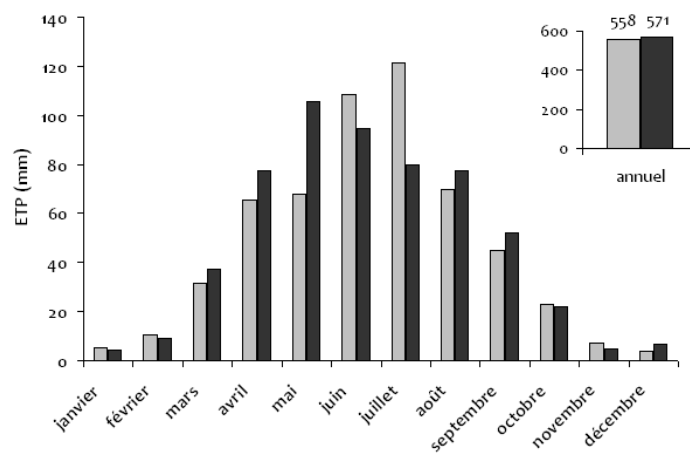


Figure A.9 : Suivi mensuel de l'évapotranspiration potentielle (ETP, mm), calculée à partir de la formule de Penman (Choisnel et al., 1992) pour les années 2010 (gris clair) et 2011 (gris foncé).

La demande évaporative annuelle représentée par l'ETP (Section I.2, Equation I.1), est équivalente entre 2010 et 2011, avec respectivement 558 et 571 mm (Figure A.9). En 2010, le pic d'ETP annuel est atteint durant les mois de juin et juillet (Figure A.9). Mensuellement, le mois de mai 2011 présente par contre une différence de 55 % avec mai 2010. A l'échelle de la saison « printemps », l'année 2011 présente l'écart le plus important à la moyenne (30 %, 26 mm pour une moyenne de 88 mm), sur la période de 1998 à 2011, équivalent à celui de 2007 (Figure A.10). Les valeurs de 2010 et 2011 à l'échelle de la saison « végétation » se situent au niveau de la moyenne de 1998-2011 (Figure A.10). Sur la période de 1998 à 2011, l'année 2003 reconnue comme chaude et sèche, présente des écarts à la moyenne pour les saisons « printemps » et « végétation », de 19 % environ.

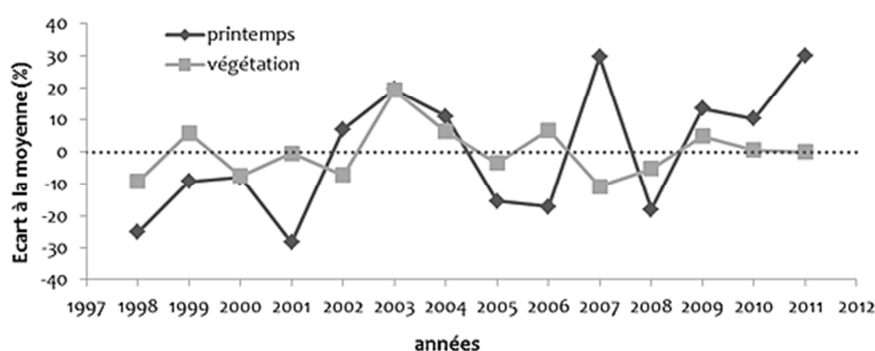


Figure A.10 : Évolution annuelle des écarts à la moyenne 1998-2011, exprimés en %, de l'évapotranspiration potentielle (ETP), calculée selon la formule de Penman (Choisnel et al., 1992), pour les saisons printemps (mars et avril ; losanges) et végétation (mai à septembre ; carrés).

3) Conclusions

Les années 2010 et 2011 se distinguent particulièrement au niveau de la période printanière. Les variables climatiques en 2010 varient globalement autour de la moyenne 1998-2011. Le printemps 2011 a été sec et chaud, se distinguant également des autres années sur la période 1998-2011, de manière équivalente à 2003 ou 2007. Durant la saison de végétation, les précipitations restent faibles en moyenne en 2011, mais les valeurs d'ETP varient aux alentours de la moyenne 1998-2011.

Sur la période 1998-2011, les années présentant un risque climatique pour la végétation (forte demande atmosphérique en eau et faibles précipitations) sont 2003 sur l'ensemble de l'année, et les printemps 2007 et 2011. L'année 2003 a été particulièrement chaude et sèche dans l'ensemble de l'Europe, la contrainte hydrique étant jugée équivalente à celle de 1976 pour plusieurs peuplements forestiers (Bréda et al., 2004). Dans certaines régions, les années suivantes, 2004 à 2006 ont également été défavorables avec la présence de certains épisodes de sécheresse (Bréda et al., 2006; Manise et Vincke, 2012). A Vielsalm, l'année 2004 présente un VPD moyen supérieur à la moyenne 1998-2011, mais les écarts sont plus faibles qu'en 2003.

Annexe 7 : Accroissement radial des espèces

À l'échelle de la Parcelle témoin, 3 types de mesures mises en place entre 2009 et 2011, permettent une évaluation de l'accroissement radial des espèces, 1) les dendromètres, 2) la dendrochronologie, et 3) le mètre ruban. Chaque type de mesure possède une représentativité spatio-temporelle différente, les rendant complémentaires. Concernant la dendrochronologie, elle permet en plus de faire une analyse rétrospective de l'accroissement en circonférence (en particulier sur la période de mesure des flux par eddy covariance), en fonction du nombre de cernes pris en compte.

1) Matériels et méthodes

1.1) Mesures par dendromètres

L'accroissement radial des hêtres et des sapins a été suivi durant deux années sur 14 et 4 arbres respectivement (Tableaux A.2 et A.3), à l'aide de dendromètres (Figure A.11 ; fabrication artisanale, projet IMMEC, <http://imecc.ipsl.jussieu.fr/>). Parmi les arbres échantillonnés, on compte les 9 hêtres équipés de capteurs de flux de sève et 2 sapins (S2 et S11). L'installation sur le douglas n'a pas été possible en raison d'une épaisseur d'écorce importante. L'accroissement est mesuré à partir du déplacement d'un câble, passant autour de l'arbre, fixé à la structure du dendromètre et au tambour à ses deux extrémités. Les dendromètres installés, permettent i) une lecture visuelle de l'accroissement à partir de la graduation sur le tambour et du vernier placé à côté (Figure A.11), et ii) une mesure sur le pas de temps de 30 min, à partir des variations de résistance du potentiomètre (Figure A.11), relié à une centrale d'acquisition (fabrication artisanale, UPB). Ces dendromètres ont été reliés en 2010 à la centrale d'acquisition. En 2010, les potentiomètres ont été reliés tardivement (DOY 196) à la centrale d'acquisition. En 2011, les dendromètres ont été mis en place DOY 119 (mise à zéro du tambour pour la lecture visuelle et réglage du potentiomètre). La mesure de la circonférence à l'emplacement du dendromètre a également été faite pour chaque arbre ce jour-là. Les lectures visuelles ainsi que les

mesures de circonférence à la fin de la saison de végétation ont été faites DOY 307.

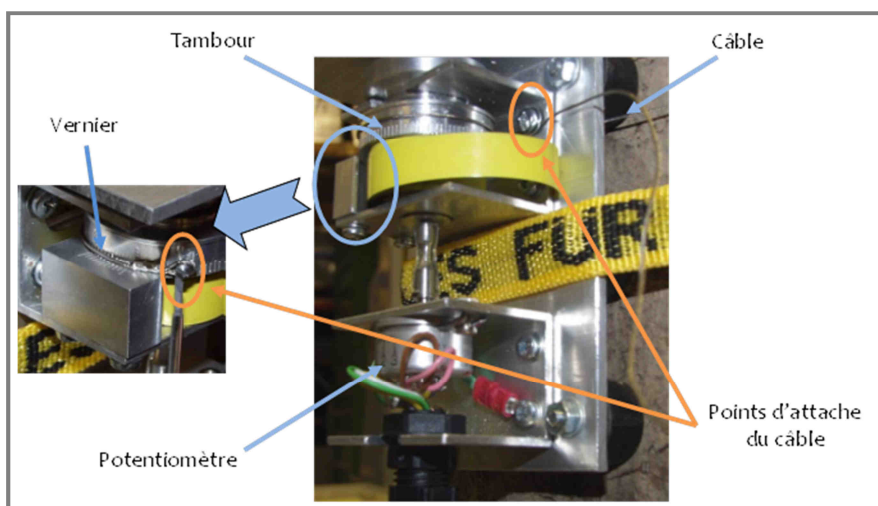


Figure A.11 : Photographie d'un dendromètre (fabrication artisanale, projet IMMEC). Une fois le câble tendu autour de l'arbre et fixé aux 2 points d'attache, l'accroissement peut être déterminé à partir d'une lecture visuelle sur le vernier (zoom à gauche), ou de manière automatisée, à partir de l'enregistrement des variations de résistance du potentiomètre, relié au tambour.

L'enregistrement des variations au niveau des potentiomètres a été effectif tout le long de la saison, mis à part pour quelques courtes périodes en raison de problèmes électriques. Concernant les mesures aux potentiomètres, pour les arbres S2 et S11, une correction a été apportée en 2011. Alors qu'on observe durant les premiers mois une croissance continue pour ces deux arbres, durant le mois de juin suite à un dysfonctionnement de quelques jours (pas d'explication, dates différentes pour les 2 arbres), les résistances des potentiomètres sont redevenues proches ou inférieures aux valeurs initiales d'installation. On observe ensuite de nouveau une croissance continue. Les deux périodes sont alors cumulées, en supprimant la chute de résistance observée en juin. Pour l'arbre S11, les données restent cependant peu fiables, car l'évolution des mesures au potentiomètre n'est pas continue comme pour les autres arbres, mais s'est effectuée par palier de 100 ohms.

1.2) Dendrochronologie

L'analyse de la croissance radiale par cette méthode repose sur le prélèvement, dans l'arbre sur pied, de bâtonnets de bois nommés « carottes », sur lesquels les cernes annuels de croissance sont mesurés. Sur chaque arbre, afin de prendre en compte d'éventuelles irrégularités de croissance, 2 carottes sont prélevées. La première dans une direction aléatoire et la seconde à 90° de la première sur le même plan horizontal. A l'échelle d'un peuplement, une chronologie moyenne de la largeur des cernes est établie, dont la précision (biais relatifs aux variations individuelles et stationnelles) augmente avec le nombre de séries individuelles mesurées. Les carottages sont généralement effectués sur les arbres dominants, afin de réduire des effets de compétition sur la croissance des arbres. Ces mesures dendrochronologiques sont utilisées au travers de l'étude pour i) inter-valider les différents types de mesures de croissance radiales effectuées entre 2009 et 2011, cette méthode étant considérée comme la référence, ii) rechercher à long terme, à l'échelle individuelle, ou du peuplement, diverses relations de cause à effet avec le climat et/ou la R_t et R_U , sur la croissance radiale, iii) mettre en relation, à l'échelle individuelle, ou du peuplement, l'accroissement en circonférence avec les flux de vapeur d'eau (transpiration et eddy covariance) ou de carbone (eddy covariance), de 1996 à 2011.

Largeurs de cerne

L'échantillonnage sur le terrain s'est organisé en 2 fois. Le premier prélèvement de carottes a eu lieu en novembre 2010, à la fin de la période de croissance et avant les périodes de gel important (Tableaux A.2 et A.3). De dix à quinze arbres dominants par espèce (hêtre, douglas et sapin), hors ceux déjà équipés de capteurs de flux de sève ou de dendromètres, ont été échantillonnés à 1m30. Le second prélèvement a été effectué en mars 2012 (Tableaux A.2 et A.3). Deux carottages par arbre ont été réalisés à l'emplacement des dendromètres ou des capteurs de flux de sève (pour les douglas). Au total 24 hêtres ont été échantillonnés (50 carottes), 20 douglas, et 19 sapins.

Après avoir scanné chaque carotte, la largeur des cernes (l , mm), est déterminée par année, à l'aide du logiciel WinDENDRO (Regent Instruments Canada Inc.). Au préalable, les carottes ont été séchées (environ 48 h à l'étuve à 26 °C), puis collées sur une languette de bois afin de pouvoir être facilement rabotées pour améliorer la lisibilité des cernes. Les largeurs de cerne moyennes par arbre (L , mm ; Equation A.1) sont calculées à partir des moyennes quadratiques des largeurs des cernes, l_1 et l_2 des 2 carottes prélevées par arbre. L'accroissement en circonférence est alors calculé, à l'échelle de l'arbre ou du peuplement, à partir de la mesure de la circonférence à l'emplacement du carottage lors du prélèvement, et des largeurs de cerne moyennes mesurées.

$$L = \sqrt{\frac{(l_1)^2 + (l_2)^2}{2}} \quad \text{Équation A.1}$$

Les largeurs de cerne moyennes par sous-peuplement sont obtenues pour les hêtres et les douglas de 1972 à 2011 et pour les sapins de 1995 à 2011. Il est important afin d'établir des moyennes, de conserver les mêmes effectifs par espèce tout au long de la chronologie. Les largeurs de cernes pour les 24 hêtres sont mesurées de 1972 à 2010. La largeur de cerne en 2011 est calculée à partir de la régression ($R^2 > 0.9$) entre les largeurs de cerne moyennes des 24 hêtres et celles des 14 hêtres dont la dernière année identifiée est 2011 (inclus dans les 24 ; Tableau A.2). Pour les douglas les 20 arbres échantillonnés présentent la période 1986-2010 en commun. Parmi ces 20 arbres, 12 possèdent la période 1972-2010 en commun et 6 la période 1986-2011 (Tableau A.2). La courbe moyenne de largeurs de cerne pour les douglas de 1972 à 2011 a été obtenue par la même procédure que pour les hêtres en 2011, à l'aide de régressions ($R^2 > 0.9$) entre les différents groupes d'arbres présentant des périodes communes. Pour les sapins le nombre d'arbre présentant la période 1972-2010 en commun était trop réduit pour appliquer des régressions fiables ($R^2 < 0.5$) depuis 1995. En 2011, la largeur de cerne moyenne des sapins a été calculée à partir de la régression des largeurs de cerne moyennes des 19 sapins en fonction des largeurs de cerne moyennes des 4 sapins échantillonnés en 2012 (période 2000-2010 ; $R^2 = 0.6$; Tableau A.3). La même procédure a été appliquée afin de calculer les courbes moyennes d'accroissement en surface, par sous-peuplement, de 1972 à 2011 pour les hêtres et douglas et de 1995 à 2011 pour les sapins.

Espèces	Arbres	C ₁₃₀	Carottes 2010	Carottes 2012	Première année		Dernière année	
					1972	1986	2010	2011
Hêtres	H2	63						
	H3	81						
	H4	94						
	H5	97,5						
	H6	105						
	H7	111,5						
	H8	115						
	H9	123						
	H10	126						
	H11	129						
	H12	129						
	H13	131,5						
	H14	132						
	H15	135,5						
	H16	137						
	H17	147,5						
	H18	150						
	H19	157						
	H20	157,5						
	H21	164						
	H22	164						
	H24	173						
	H25	174,5						
	H26	175,5						
Douglas	D1	181						
	D2	206						
	D3	220						
	D4	226						
	D5	232						
	D6	232						
	D7	232						
	D8	231						
	D9	236						
	D10	237						
	D11	242						
	D12	243						
	D13	244						
	D14	248,5						
	D15	249						
	D16	250						
	D17	250,5						
	D18	255						
	D19	257,5						
	D20	306,5						

Tableau A.2 : Circonférences (C₁₃₀, cm) des arbres sélectionnés pour le prélèvement de carottes (2 par arbre) en 2010 (Carottes 2010) ou en 2012 (Carottes 2012), en fonction de l'espèce (hêtre et douglas). Les premières et dernières années identifiées sur les 2 carottes de chaque arbre sont indiquées. Pour les hêtres, les arbres carottés en 2012 correspondent à ceux équipés de dendromètres.

Espèce	Arbres	C ₁₃₀	Carottes 2010	Carottes 2012	Première année		Dernière année	
					1972	1995	2010	2011
Sapins	S1	115,5						
	S2	123,5						
	S3	137						
	S4	143						
	S5	143,5						
	S6	148,5						
	S7	151						
	S8	151,5						
	S9	155						
	S10	158,5						
	S11	164						
	S12	171						
	S13	169						
	S14	175,5						
	S15	185						
	S16	201,5						
	S18	228						
	S19	255						
	S20	259						

Tableau A.3 : Circonférences (C₁₃₀, cm) des sapins sélectionnés pour le prélèvement de carottes (2 par arbre) en 2010 (Carottes 2010) ou en 2012 (Carottes 2012), en fonction de l'espèce. Les premières et dernières années identifiées sur les 2 carottes de chaque arbre sont indiquées. Les sapins carottés en 2012 correspondent à ceux équipés de dendromètres.

Les largeurs de cerne moyennes par sous-peuplement sont obtenues pour les hêtres et les douglas de 1972 à 2011 et pour les sapins de 1995 à 2011. Il est important afin d'établir des moyennes, de conserver les mêmes effectifs par espèce tout au long de la chronologie. Les largeurs de cernes pour les 24 hêtres sont mesurées de 1972 à 2010. La largeur de cerne en 2011 est calculée à partir de la régression ($R^2 > 0.9$) entre les largeurs de cerne moyennes des 24 hêtres et celles des 14 hêtres dont la dernière année identifiée est 2011 (inclus dans les 24 ; Tableau A.2). Pour les douglas les 20 arbres échantillonnés présentent la période 1986-2010 en commun. Parmi ces 20 arbres, 12 possèdent la période 1972-2010 en commun et 6 la période 1986-2011 (Tableau A.2). La courbe moyenne de largeurs de cerne pour les douglas de 1972 à 2011 a été obtenue par la même procédure que pour les hêtres en 2011, à l'aide de régressions ($R^2 > 0.9$) entre les différents groupes d'arbres présentant des périodes communes. Pour les sapins le nombre

d'arbre présentant la période 1972-2010 en commun était trop réduit pour appliquer des régressions fiables ($R^2 < 0.5$) depuis 1995. En 2011, la largeur de cerne moyenne des sapins a été calculée à partir de la régression des largeurs de cerne moyennes des 19 sapins en fonction des largeurs de cerne moyennes des 4 sapins échantillonnés en 2012 (période 2000-2010 ; $R^2 = 0.6$; Tableau A.3). La même procédure a été appliquée afin de calculer les courbes moyennes d'accroissement en surface, par sous-peuplement, de 1972 à 2011 pour les hêtres et douglas et de 1995 à 2011 pour les sapins.

Indices de croissance et années caractéristiques

Un indice de croissance, IC, défini par l'écart relatif entre la largeur de cerne de l'année n et celle de l'année $n-1$, est calculé par arbre, pour chaque année n , tel que :

$$IC = (L_n - L_{n-1}) / L_{n-1} \quad \text{Equation A.2}$$

Une étape essentielle dans le traitement des données dendrochronologiques est l'interdatation des séries individuelles. En effet, si l'attribution d'une année à un cerne peut paraître simple, selon l'espèce, les périodes ou les échantillons, cette étape peut se compliquer. Des anomalies de croissance peuvent également apparaître sous la forme de faux cernes (deux « bandes » de bois final se formant la même année) ou de cernes manquant (absence du cerne d'une année dans le secteur du tronc carotté). Les séries individuelles sont alors interdatées entre elles, afin de détecter la présence de telles anomalies et/ou des erreurs d'observation. Les séries moyennes par espèces sont ensuite interdatées en fonction des années caractéristiques (Fritts, 1976). Ces années correspondent à des conditions de croissance remarquables (fortes ou faibles) pour une majorité des arbres, liées à des conditions climatiques particulières (Schweingruber et al., 1990). Une année est caractéristique quand la variation de croissance relative avec l'année précédente est d'au moins 10% (en plus ou en moins) et qu'au moins 75 % des arbres du peuplement présentent le même comportement (Becker et al., 1994).

Courbes dendrochronologiques standardisées

La croissance radiale des espèces est soumise à plusieurs « signaux » agissant à des échelles de temps ou des fréquences différentes (Figure A.12 ; Lebourgeois et Merian, 2010). On distingue alors :

- L'échelle interannuelle ou signal haute fréquence : les variations des largeurs de cerne sont principalement dépendantes des comportements physiologiques des espèces vis-à-vis des conditions environnementales telles que le climat ou des perturbations ponctuelles (incendies, pathogènes) ;
- L'échelle de la décennie ou signal moyenne fréquence : les variations des largeurs de cerne à cette échelle peuvent encore être la résultante des conditions environnementales (arrière effets d'une année stressante), mais également de la sylviculture (éclaircie), ou de phénomènes de dépérissements ;
- L'échelle du siècle ou signal basse fréquence : les variations de largeurs de cerne à cette échelle mettent en avant les effets de l'âge sur les espèces ainsi que les conditions environnementales (pollution atmosphérique, dérive climatique) et/ou les choix sylvicoles agissant à long terme.

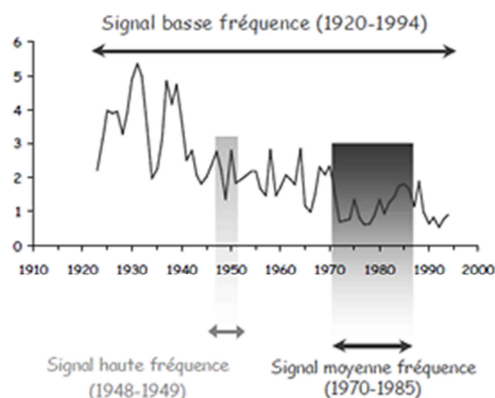


Figure A.12 : Exemple d'une courbe de largeurs de cerne brute, sur laquelle on peut observer les effets des signaux à basse, moyenne ou haute fréquence. Figure extraite de Lebourgeois et Merian (2010).

Afin de ne conserver que le signal haute fréquence (effets des conditions environnementales sur la variabilité interannuelle), les courbes de largeur de cerne sont standardisées. La standardisation s'effectue selon une procédure consistant tout d'abord en un ajustement par une fonction

mathématique des données brutes (L) afin d'obtenir des valeurs prédites (Lp), puis au calcul d'indices (L/Lp) ou de résidus (L-Lp), dégagés alors des signaux haute et moyenne fréquence (Lebourgeois et Merian, 2010). Les courbes de largeurs de cerne individuelles (par arbre), ont été standardisées à partir de programmes développés sur R (Macro Dendro 4 ; Lebourgeois et al., 2005). Selon Lebourgeois et Merian (2010): « à partir de ces valeurs standardisées (qui sont exprimées en % ou sans unité), on peut alors comparer valablement la croissance d'arbres d'âges différents, calculer une courbe représentative de la croissance moyenne du peuplement et analyser le signal « date » dans les séries de cerne ». Pour les hêtres et les douglas, les courbes moyennes de 1972 à 2011 des largeurs de cerne standardisées sont obtenues, pour les années ne présentant pas le nombre d'arbres maximum, par la même procédure que pour les courbes moyennes de largeurs de cerne. Pour les sapins étant donné la courte période d'échantillonnage la standardisation des courbes n'est pas intéressante.

2) Résultats et discussion

2.1) Courbes dendrochronologiques brutes

Les courbes dendrochronologiques moyennes de largeurs de cernes et d'accroissement en surface couvrent les périodes 1972-2011 pour les hêtres et le douglas, et 1995-2011 pour les sapins (Figure A.13). L'accroissement en surface du hêtre tend à diminuer depuis 1972 et la variabilité interannuelle semble augmenter à partir des années 1990 (Figure A.13 a). Des années comme 2007 ou 2008 présentent des accroissements en surface tout aussi importants que dans les années 1970. Les accroissements en surface du douglas affichent une hausse globale de 1972 à 2002, puis tendent à diminuer légèrement depuis lors (Figure A.13 b). La variabilité interannuelle semble également plus forte depuis les années 2000 pour cette espèce. Pour les sapins les accroissements en surface tendent légèrement à augmenter depuis 1995, mais étant donné le peu d'années disponibles cette tendance est à considérer avec prudence (Figure A.13 c). La largeur de cerne moyenne depuis 1972 est de 2.0 (± 0.7) et 4.4 (± 1.0) mm, pour les hêtres et les douglas respectivement et de 3.6 (± 0.7) mm depuis 1995 pour les sapins. Les accroissements en surface moyens sont

respectivement de $21.7 (\pm 6.0)$, $90.2 (\pm 18.2)$ et $56.8 (\pm 8.0)$ cm², pour les hêtres et douglas (1972-2011) et les sapins (1995-2011). Les largeurs de cernes mesurées pour les hêtres et les douglas sont comparables à celles mesurées sur d'autres sites à proximité en Belgique ou en France, selon Manise et Vincke (2012).

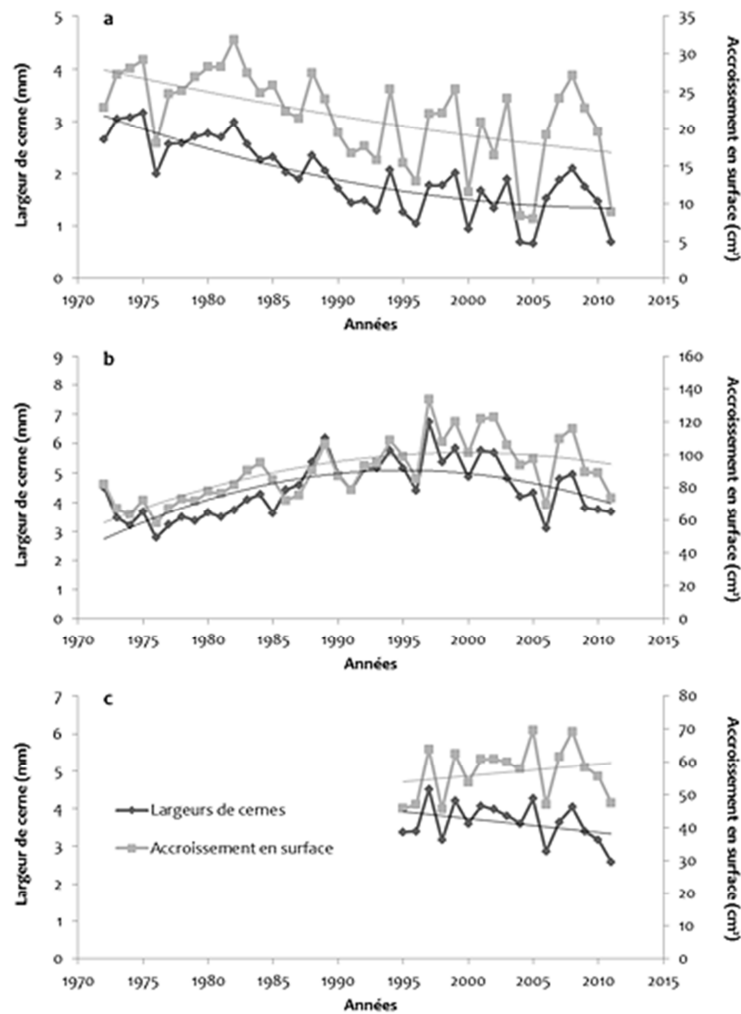


Figure A.13 : Largeurs de cernes (L, mm) et accroissements en surface (cm²) moyens, évalués à partir de mesures dendrochronologiques, de 1972 à 2011 pour a) les hêtres et b) les douglas et de 1995 à 2011 pour c) les sapins. Pour les hêtres et les douglas les courbes de tendances sont polynomiales, et linéaires pour les sapins (largeurs de cernes : gris foncé ; accroissement en surface : gris clair).

2.2) Indice de croissance, années caractéristiques et courbes dendrochronologiques standardisées

Les hêtres et les douglas comptent respectivement depuis 1972, 11 et 12 années caractéristiques, dont 6 positives pour les hêtres et seulement 3 pour les douglas (Figure A.14). L'année 1976 est caractéristique pour les 2 espèces, avec une réduction de croissance moyenne de 39 et 34 % pour les hêtres et les douglas respectivement, par rapport à 1975.

A partir de 1995, les 3 espèces présentent 3 années caractéristiques communes. L'année 1997, année caractéristique positive pour l'ensemble des espèces. L'année 2006, positive pour les hêtres, mais négative pour les résineux. Puis l'année 2011, négative pour l'ensemble des espèces (Figures A.14 et A.15).

L'année 2003, particulièrement sèche et chaude (Bréda et al., 2004), est uniquement caractéristique pour les hêtres et les douglas. Cette année-là a été bénéfique pour la croissance des hêtres, qui chute par contre les 2 années suivantes (2004 année caractéristique négative ; Figures A.13 a et A.14). Pour les douglas, les conditions environnementales en 2003 provoquent une diminution des largeurs de cernes l'année même.

L'année 2006, comme 2003, est positive pour les hêtres, avec l'indice de croissance (IC) moyen positif le plus élevé depuis 1972, alors qu'à l'inverse elle est négative pour les résineux, avec l'IC moyen négatif le plus élevé pour les douglas (équivalent à celui des sapins ; Figures A.14 et A.15). D'un point de vue climatique, cette année présente un écart à la moyenne positif pour l'ETP, durant la saison « végétation », faisant partie des plus élevés et équivalent à 2004 ou 1999, mais environ 3 fois inférieur à celui de 2003 (Figure A.10). Après une forte diminution de la croissance en 2004 et 2005, les hêtres retrouvent une croissance normale pouvant alors expliquer que 2006 présente l'IC positif le plus important depuis 1972. Manise et Vincke (2012) évaluent également 2006 comme année caractéristique négative pour l'ensemble des peuplements d'épicéas échantillonnés et un autre peuplement de Douglas en Belgique (Spa, environ 35 km). Ils précisent « qu'en analysant les données météorologiques, il apparaît que la période 2003-2006 a été assez défavorable au niveau climatique (aussi bien au niveau des températures que de la pluviométrie), ce qui explique les pertes de croissance pour un nombre important de sites durant cette période ».

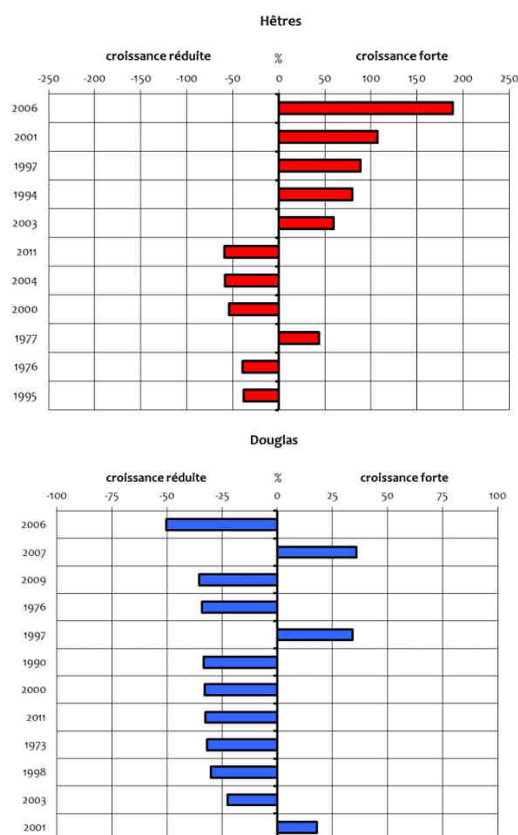


Figure A.14 : Années caractéristiques pour les hêtres (en haut) et les douglas (en bas), de 1972 à 2011, triées par ordre décroissant de % de réduction ou d'augmentation de la croissance vis-à-vis de l'année précédente (indice de croissance moyen).

Les variations interannuelles chez le douglas sont plus modérées que chez le hêtre, en particulier pour les années caractéristiques positives (Figure A.14). Cette tendance se retrouve de manière générale sur l'ensemble des sites échantillonnés en Belgique et en France, au sein de l'étude de Manise et Vincke (2012). Les hêtres sont généralement connus pour retrouver une croissance forte à la suite d'épisodes de stress environnementaux (Lebourgeois, 2005). Il est intéressant de noter que pour les hêtres et les sapins (malgré le peu d'années analysées pour cette espèce), 2011 est l'année caractéristique présentant l'IC négatif le plus élevé. Il est équivalent pour les douglas à celui mesuré en 1976. Il semble que la croissance radiale des 3 espèces soit particulièrement sensible aux conditions printanières sèches et chaudes telles que celles observées en 2011.

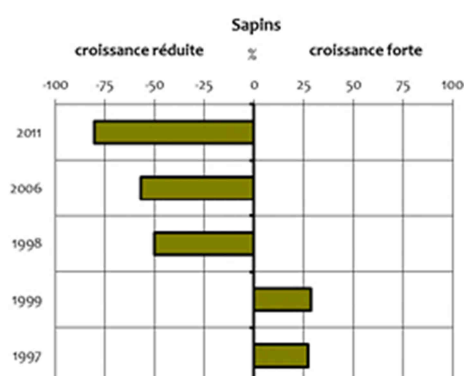


Figure A.15 : Années caractéristiques pour les sapins, de 1995 à 2011, triées par ordre décroissant de % de réduction ou d'augmentation de la croissance vis-à-vis de l'année précédente (indice de croissance moyen).

Lors de l'observation des courbes de largeurs de cernes standardisées, il apparaît que la variabilité interannuelle moyenne augmente pour les hêtres depuis 1993, alors que pour les douglas cette tendance est moins prononcée (Figure A.16). Cette augmentation de la variabilité reflète une sensibilité de la croissance des arbres vis-à-vis du climat de plus en plus importante.

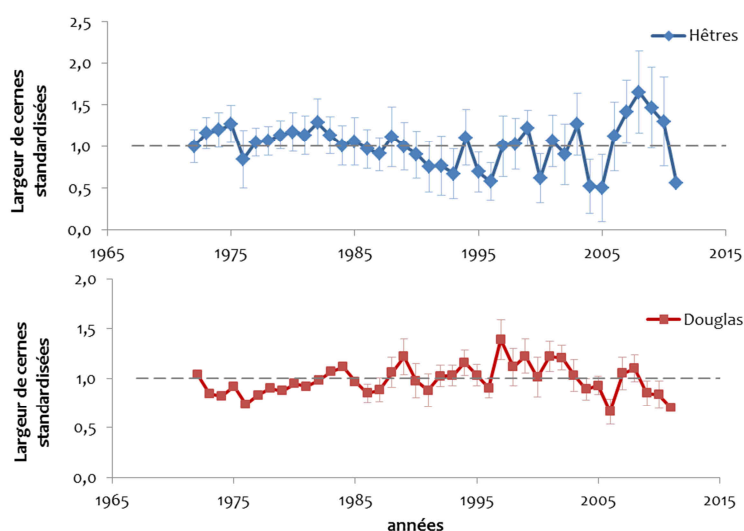


Figure A.16 : Moyennes et écart-types des largeurs de cernes standardisées pour les hêtres (en haut) et les douglas (en bas), évaluées à partir de mesures dendrochronologiques, de 1972 à 2011. Les écart-types sont évalués pour les années présentant un nombre d'arbres échantillonnés identiques et maximal (24 pour les hêtres et 20 pour les douglas). Les valeurs de largeurs de cernes standardisées en dehors de ces années, sont modélisées (Annexe 8, section 1.2).

Annexe 8 : Inter-validations des méthodes de mesures d'accroissement radial

Année 2010

La correspondance entre les accroissements en circonférence (ou largeur de cernes) à l'échelle de l'arbre, obtenus par les différentes méthodes de mesure est probante (Figure A.17). La Spina (2011) trouve également des résultats fortement corrélés entre la mesure de cernes par dendrochronologie et à partir de dendromètres, en 2010, sur les hêtres.

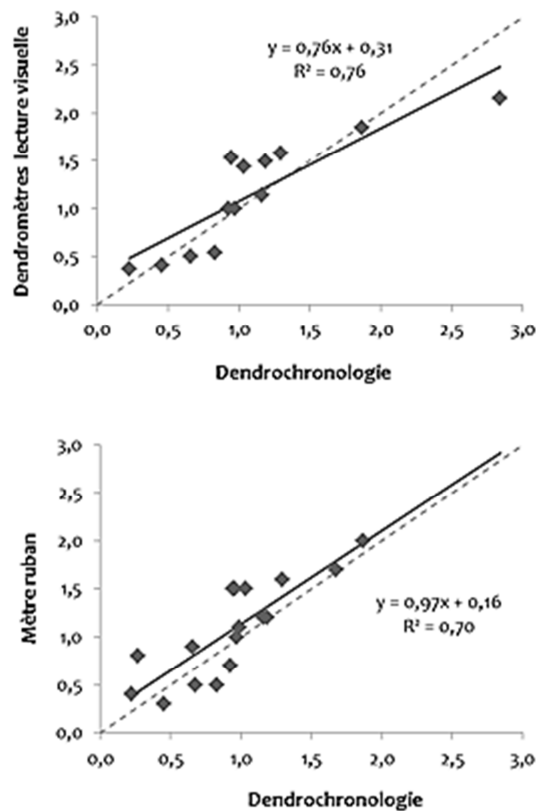


Figure A.17 : Accroissements en circonférence, pour les hêtres et les sapins, mesurés en 2010, à partir de la lecture visuelle sur les dendromètres (à gauche ; à partir du DOY 63), et au mètre ruban (à droite), en fonction de ceux mesurés par dendrochronologie. Les équations et R^2 des régressions linéaires sont indiquées sur chaque graphique.

Année 2011

En 2011, mis à part pour un arbre, la correspondance entre les accroissements en circonférence mesurés par dendrochronologie, avec ceux mesurés par les dendromètres, que ça soit par lecture visuelle ou en continu à partir des variations du potentiomètre, sont bonnes (Figures A.18 a et b). Sur la Figure A.19, l'intercept non-nul de la droite de régression semble indiquer que les accroissements ont débuté un peu avant la mise en route des dendromètres. La correspondance entre les mesures dendrochronologiques et celles au mètre ruban, pour cette année est par contre mauvaise (Figure A.18 c). En comparaison à 2010, l'accroissement en 2011 est bien plus faible. Il est possible que la mesure au mètre ruban, ne soit pas des plus adaptée pour une évaluation interannuelle de l'accroissement en circonférence lorsque ce-dernier est faible, étant donné la variabilité de mesure que l'on peut rencontrer en fonction de l'emplacement de la mesure, de la période, ou encore de l'opérateur, lorsque l'on travaille au mètre ruban. L'ensemble des résultats valident en tous cas les mesures saisonnières réalisées à l'aide des dendromètres. Nous considérons alors comme fiables les profils journaliers mesurés en 2011 (Section IV.2).

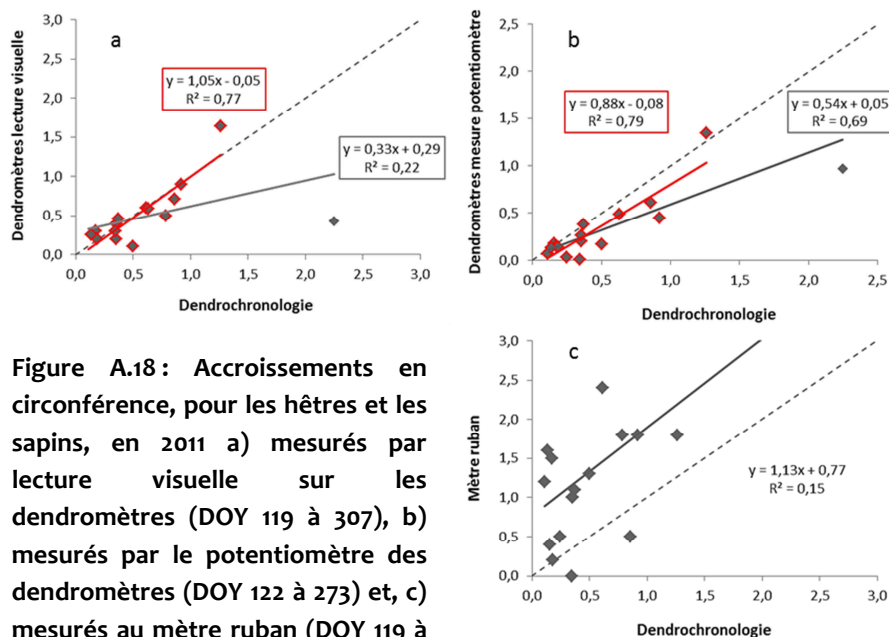
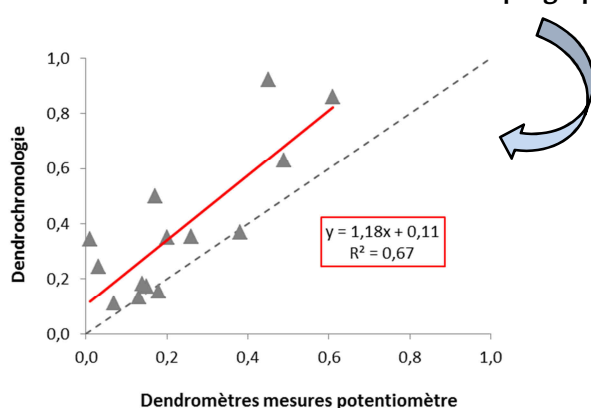


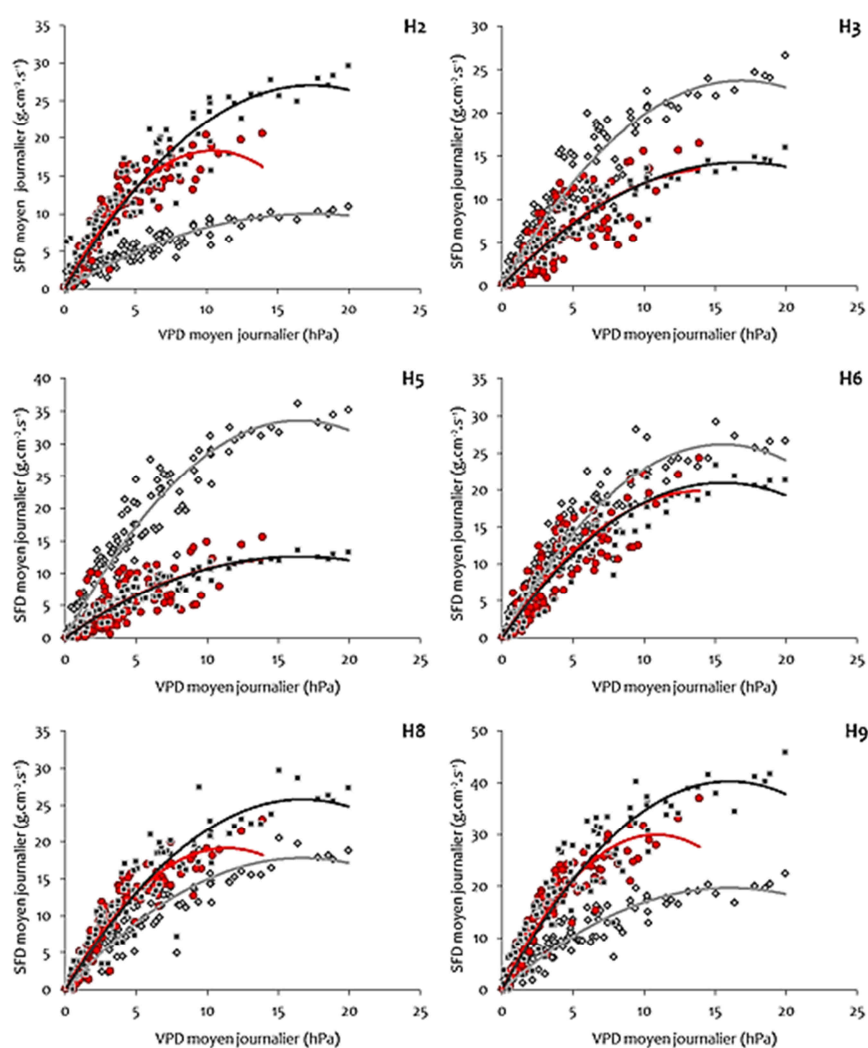
Figure A.18 : Accroissements en circonférence, pour les hêtres et les sapins, en 2011 a) mesurés par lecture visuelle sur les dendromètres (DOY 119 à 307), b) mesurés par le potentiomètre des dendromètres (DOY 122 à 273) et, c) mesurés au mètre ruban (DOY 119 à 307), en fonction de ceux mesurés par dendrochronologie. Pour les graphes a et b les régressions linéaires sont établies pour l'ensemble des points (trait gris), et sans le losange gris faisant largement dévier les relations (trait rouge) et correspondant à un sapin. Les équations et R^2 des régressions linéaires sont indiquées sur chaque graphique.

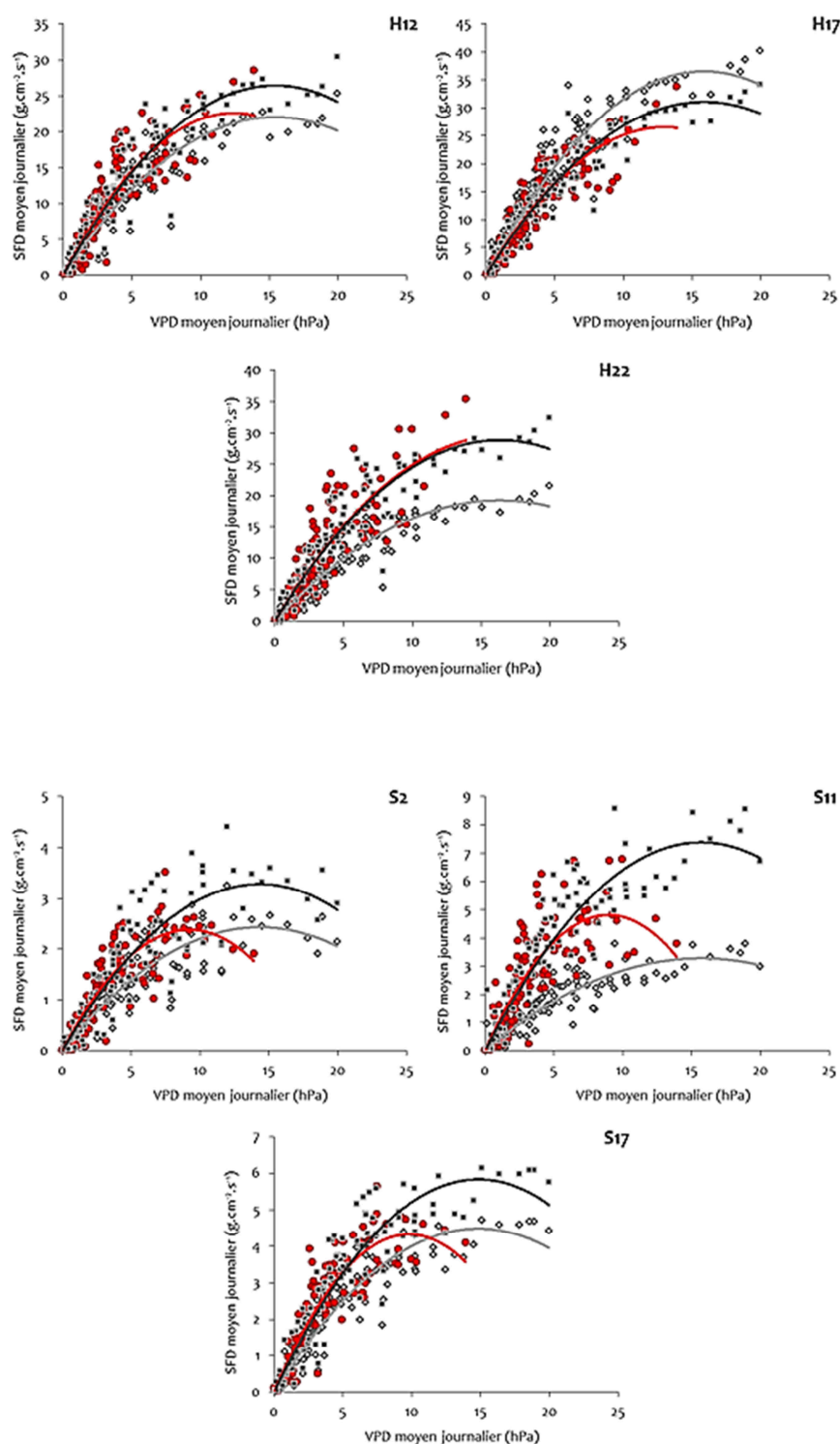
Figure A.19 : Accroissements en circonférence, pour les hêtres et les sapins, mesurés par dendrochronologie, en fonction de ceux mesurés par les potentiomètres des dendromètres, pour des accroissements inférieurs à 1 cm, pour l'année 2011 (DOY 122 à 273). Les équations et R^2 des régressions linéaires sont indiquées sur chaque graphique.

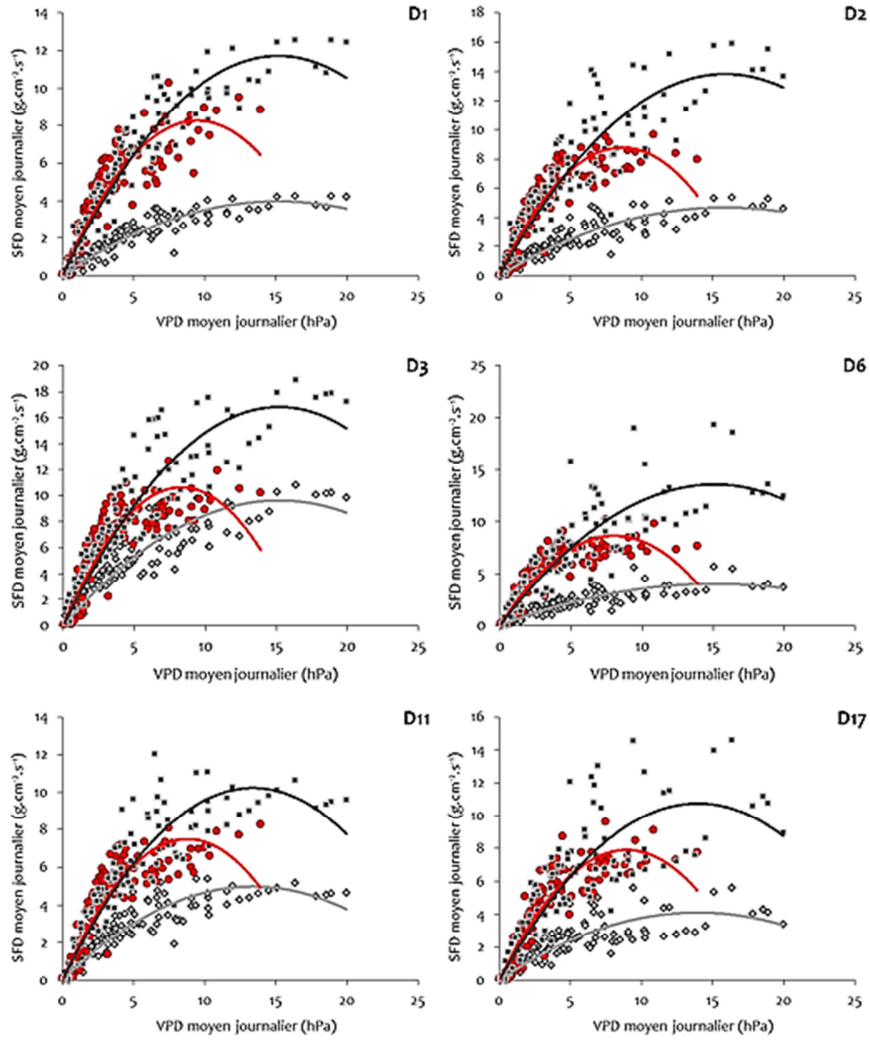


Annexe 9 : Calibrations des capteurs de flux de sève en 2010

Figure A.20 : Calibration graphique par arbre (H : hêtres ; S : sapin ; D : douglas) des relations $SFD = f(VPD)$ mesurées en 2010 (courbes gris clair) en fonction de celles mesurées en 2011 (courbes rouges). Le facteur de calibration obtenu par arbre entre la relation en 2010 non calibrée et calibrée (courbes noires) est retenu comme facteur de correction pour les SFD mesurées en 2010.

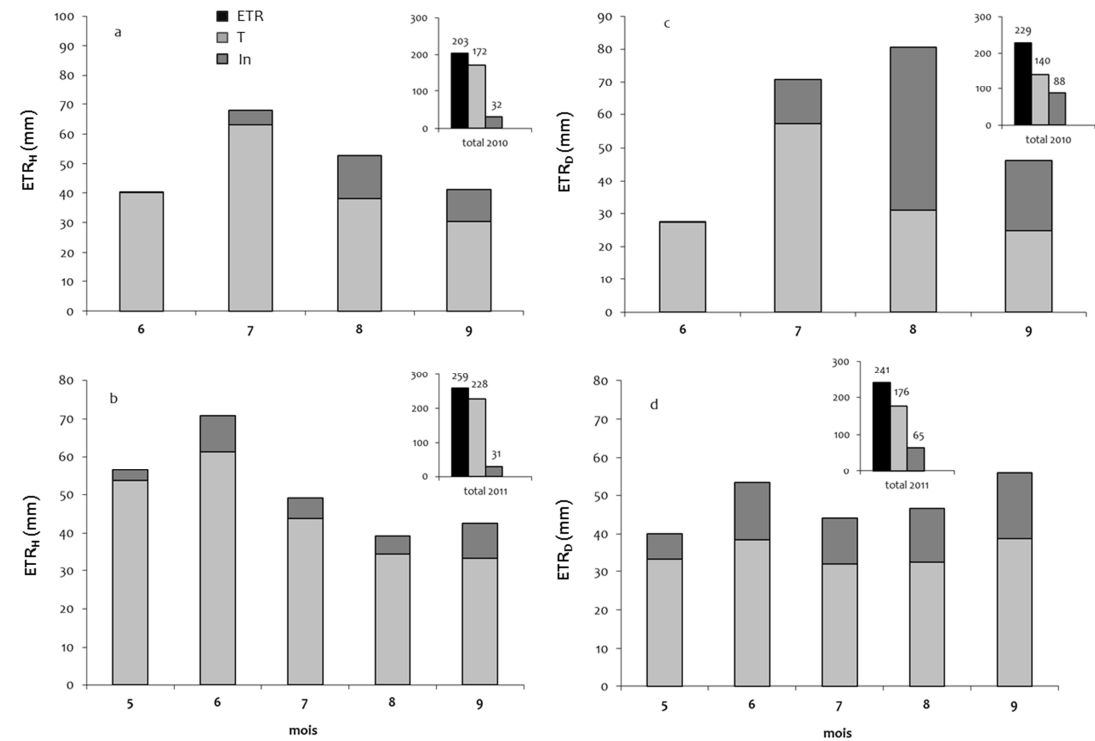






Annexe 10 : ETR analytique mensuelle

Figure A.21: ETR mensuelle (mm) mesurée par la méthode analytique comme la somme de la transpiration (T, mm) et de l'interception (In, mm), en 2010 (a et c) et en 2011 (b et d) pour les sous-peuplements de hêtres (a et b) et de douglas (c et d). Les sommes sur l'ensemble de mois sont indiquées.



Annexe 11 : Inter-validations des méthodes d'estimation de l'ETR

1) Jours sans pluie : méthode analytique et du bilan hydrique du sol

La méthode analytique et de bilan hydrique du sol permettent de faire une comparaison des mesures à l'échelle des sous-peuplements de hêtres et de douglas. L'échelle spatiale prise en compte par les 2 méthodes n'est cependant pas la même, puisque les variations journalières de R_t sont issues par sous-peuplement, de 2 profils de mesure. De plus la méthode du bilan hydrique est difficilement réductible au pas de temps journalier lorsqu'il pleut régulièrement, les flux d'eau dans le sol tendant vers un « équilibre » sur des pas de temps plus long.

Les résultats confirment la difficulté, avec le protocole de mesure mis en place, d'obtenir des estimations journalières de l'ETR par la méthode du bilan hydrique du sol, même les jours sans pluie. La concordance avec la méthode analytique n'est pas satisfaisante pour les jours sans pluie, quel que soit le sous-peuplement (Figure A.22). Les R^2 des relations obtenues en fonction des calculs de RU envisagés sont plus élevés pour le sous-peuplement de hêtres, tout en restant faibles cependant (0.34). Pour les 3^{èmes} jours consécutifs sans pluie, les relations s'améliorent (Figure A.22). Les relations entre ΔR_t et ET, par sous-peuplement et calcul de RU, sont similaires à celles présentées entre ΔR_t et T.

Contrairement à ces résultats, Wilson et al. (2001) sur un pas de temps journalier, constatent une bonne adéquation entre les mesures par la méthode du bilan hydrique du sol et par eddy covariance.

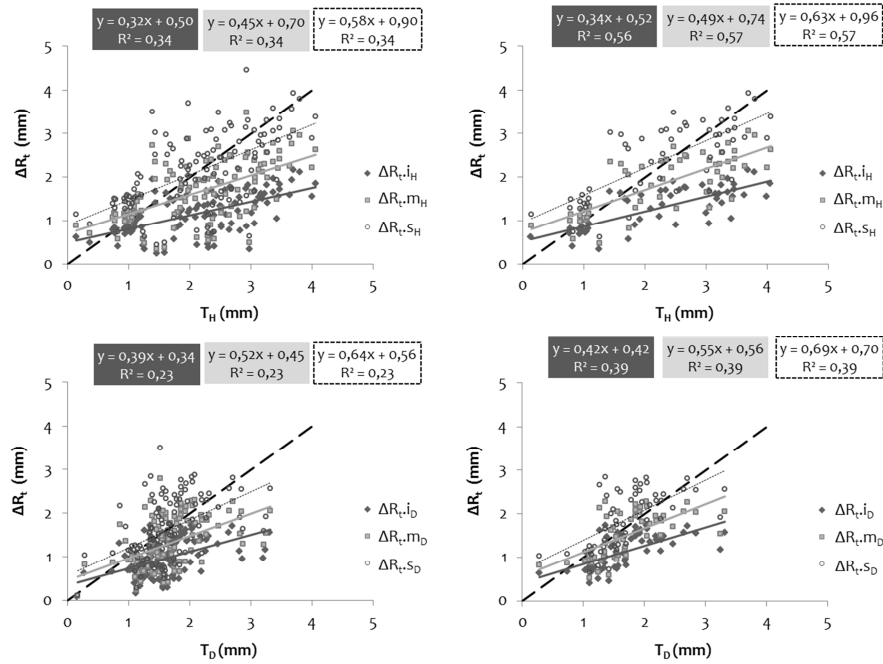


Figure A.22 : Variations journalières de la réserve en eau disponible (ΔR_t), selon le calcul inférieur ($\Delta R_{t.i}$), moyen ($\Delta R_{t.m}$) et supérieur ($\Delta R_{t.s}$) de réserve utile (RU), en fonction de la transpiration journalière (T , mm), mesurée à partir de la méthode de dissipation thermique. Les relations sont établies, pour les sous-peuplements de hêtres (H ; en haut) et de douglas (D ; en bas), pour les jours sans pluie (à gauche) et les 3^{ème} jours consécutifs sans pluie (à droite), en 2010 (DOY 141 à 275) et en 2011 (DOY 127 à 281). Les équations et les R^2 des régressions linéaires sont indiqués en fonction du scénario envisagé.

2) Tous les jours : méthode analytique et eddy covariance

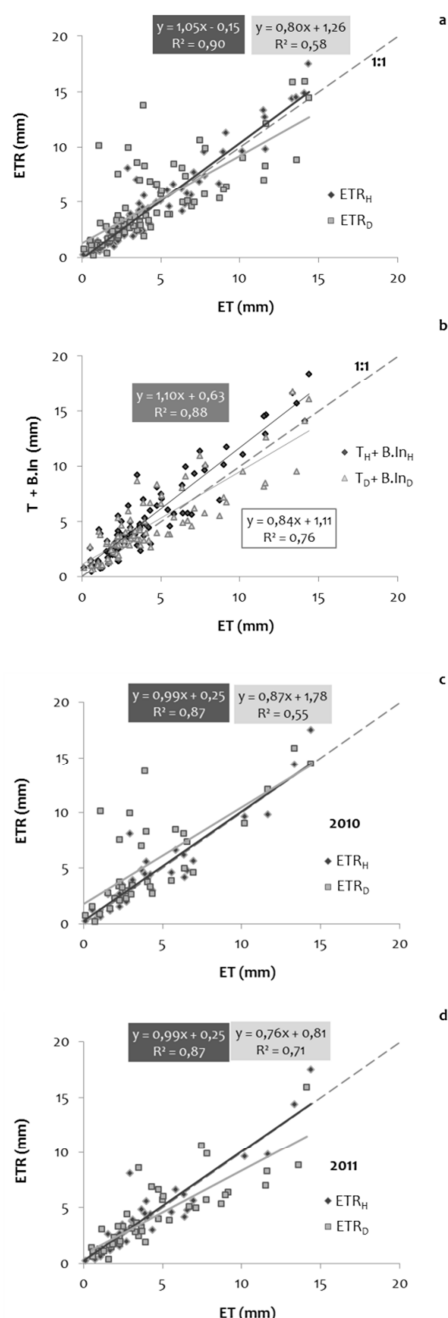


Figure A.23 : Evapotranspiration réelle (mm) évaluée à l'échelle des sous-peuplements de hêtres et de douglas, par la méthode analytique (ETR_H et ETR_D; graphes a, c et d) ou par la somme de la transpiration mesurée et de l'interception modélisée par BILJOU© (T + B.In; graphe b), en fonction de l'évapotranspiration réelle mesurée par eddy covariance (ET, mm). Pour les graphes a et b, les années 2010 et 2011 sont confondues. Le graphe c, correspond aux mesures de 2010 et le graphe d, de 2011. Les équations et les R² des régressions linéaires sont indiqués en fonction du scénario envisagé. Les relations sont établies à partir des DOY 171 à 275 en 2010 et DOY 135 à 281 en 2011.

3) Flux d'ETR saisonnier

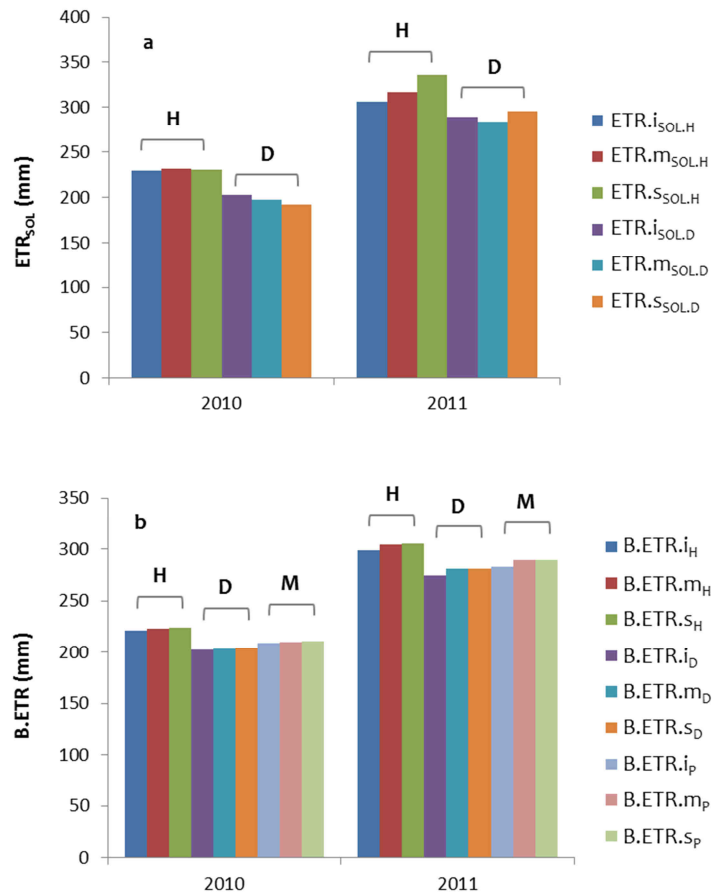


Figure A.24 : Cumuls saisonniers de l'évapotranspiration réelle, en 2010 (DOY 171 à 275) et en 2011 (DOY 127 à 281), a) mesurés par la méthode du bilan hydrique du sol pour les sous-peuplement de hêtres (ETR_{SOL.H}) et de douglas (ETR_{SOL.D}), selon le calcul de RU envisagé (i : inférieur ; m : moyen ; s : supérieur) ; et b) modélisés par BILJOU© pour les sous peuplements de hêtres (B.ETR_H) et de douglas (B.ETR_D) et le peuplement mixte (B.ETR_p), selon le calcul de RU envisagé (i : inférieur ; m : moyen ; s : supérieur).

Annexe 12 : Relations largeurs de cernes et flux de carbone

Le gain de carbone annuel enregistré au niveau du tronc à partir de l'accroissement radial ne représente qu'une partie des flux enregistrés par eddy covariance, à l'échelle de l'écosystème. La GPP inclut également le gain de carbone au niveau des racines et du sol et la NEE la respiration autotrophe et hétérotrophe. Il est cependant intéressant de voir si les années à faible NEE ou GPP peuvent être reliées aux années à faible croissance radiale. À l'échelle de l'arbre, il est difficile d'évaluer le gain en volume d'un tronc à partir des largeurs de cernes, et des incertitudes plus ou moins importantes demeurent vis-à-vis des branches et des racines (Granier et al., 2008). Des modèles de biomasse peuvent être développés, afin de comparer des gains en carbone avec la mesure par eddy covariance, et non pas des largeurs de cernes, mais ces modèles demandent un nombre de paramètres importants. Les largeurs de cernes standardisées sont alors simplement exprimées en fonction des écarts annuels à la moyenne 1998-2008, de la NEE et de la GPP, afin de tester d'éventuelles relations (Figure A.25).

De manière générale, les relations obtenues sont faibles. Pour la NEE, la meilleure relation est obtenue avec les largeurs de cernes des hêtres, ces dernières expliquant 52 % de la variabilité interannuelle de la NEE (Figure A.25 a). Les flux mesurés par eddy covariance étant majoritairement représentatifs des secteurs feuillus, ce résultat semble cohérent. Par contre la relation établie entre les largeurs de cernes des hêtres et la GPP est moins bonne (Figure A.25 b, $R^2 = 0.17$). Il paraît logique que les largeurs de cernes soient mieux corrélées aux flux de NEE, ces derniers intégrant la respiration autotrophe (mais également la respiration hétérotrophe), contrairement à la GPP. Les relations entre la NEE et les largeurs de cernes et les accroissements en surface de chaque espèce ont également été testées et fournissent des résultats similaires à ceux obtenus avec les largeurs de cernes standardisées. Granier et al. (2008) pour une hêtraie à Hesse, calculent des accroissements en biomasse à partir d'accroissement en circonférence et de relations allométriques, pour des parcelles dans la zone de footprint de mesure d'eddy covariance. À l'échelle annuelle, les relations

obtenues sont également faibles. Sur un pas de temps de 15 à 30 jours durant la période de végétation, les accroissements cumulés en biomasse mesurés par eddy covariance et à partir des accroissements en circonférence sont par contre bien corrélés. Les auteurs expliquent cela par un fort couplage entre l'assimilation de carbone et la croissance radiale des arbres durant la période de végétation, alors qu'en dehors de ces périodes de croissance la respiration découple la relation.

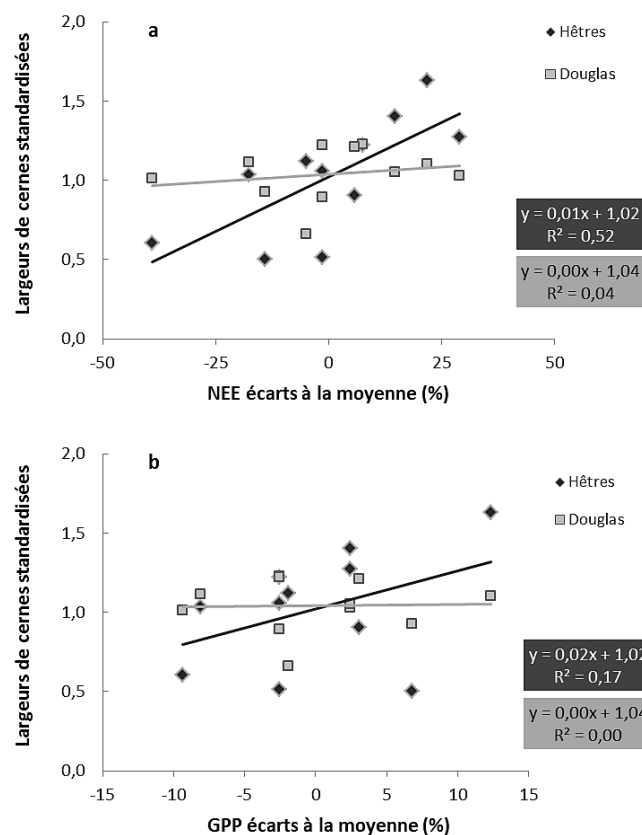


Figure A.25 : Largeurs de cernes standardisées, pour les hêtres et les douglas, obtenues à partir de mesures dendrochronologiques, en fonction a) des écarts annuels à la moyenne établie de 1998 à 2008 de la NEE annuelle, exprimés en %, et b) des écarts annuels à la moyenne établie de 1998 à 2008 de la GPP annuelle, exprimés en %, pour les années 1998 à 2008. Les équations et R² des régressions linéaires, obtenues en fonction des espèces, sont indiqués.

Annexe 13 : L'efficiencia de l'utilisation de l'eau (WUE)

1) Matériels et méthodes

L'efficiencia de l'utilisation de l'eau est utilisée comme un indice de productivité afin de comparer les espèces. Représentant une entrée de carbone sur une sortie d'eau, son calcul diffère selon l'échelle considérée. À l'échelle de l'arbre, la WUE est caractérisée par le rapport entre l'assimilation nette en carbone, A , et la transpiration, T . À l'échelle du peuplement, et/ou de l'écosystème, la WUE peut être abordée comme le rapport entre la NPP, la NEE ou la GPP, selon les mesures disponibles, et T ou ETR (Kuglitsch et al., 2008).

Une première approche pour l'estimation de la WUE sur le site de Vielsalm, à l'échelle du sous-peuplement, est développée à partir des mesures d'eddy covariance, sur la période 1998-2008. Ce travail fait suite aux travaux de Renchon (2013), sur la variabilité interannuelle des flux de carbone sur le site (Section II.1.2). La distinction entre la respiration autotrophe et hétérotrophe, à partir des mesures d'eddy covariance n'est pas réalisable. À partir de la NEE, il est alors possible d'obtenir la GPP après évaluation de la TER, mais pas la NPP. La WUE pour chaque sous-peuplement, est alors calculée comme le rapport entre GPP et ET. Le calcul est fait par secteurs (NE(2) et SW(2)). Pour le secteur NE(2), le sous-peuplement peut être associé sans trop de risques au type résineux, composé principalement de douglas. Pour le secteur SW(2), il reste difficile par contre de l'associer à un sous-peuplement de hêtre et il serait plus prudent selon cette approche de parler de sous-peuplement mixte. La WUE est estimée à l'échelle de la demi-heure, à partir du rapport des moyennes de GPP et ET par secteur, par classes de PPFD et de VPD. Une approche journalière de 2010 à 2011 serait réalisable à partir des flux transpiratoires, mais l'analyse des flux de carbone suite au changement de la tour reste à faire. Les sous-peuplements restent difficilement distinguables et le rapport NPP/T n'est pas calculable, mais par cette méthode les mesures de carbone et de vapeur d'eau ont l'avantage de provenir de la même source.

2) Résultats : première approche pour une estimation de l'efficience de l'utilisation de l'eau (WUE)

Selon Kuglitsch et al. (2008), ET est mieux corrélée à la GPP qu'à la NEE, cette dernière prenant en compte la respiration, dont le couplage avec les flux d'eau est moins fort qu'avec la photosynthèse. Sans distinction vis-à-vis du footprint ou des conditions climatiques, la WUE mesurée par eddy covariance (GPP/ET) sur le site de Vielsalm, est en moyenne de $6.2 (\pm 0.6) \text{ g CO}_2.\text{kg H}_2\text{O}^{-1}$ de 1998 à 2008. Pour 3 années, les écarts à la moyenne dépassent 10 % de cette dernière (Figure A.26). Il s'agit de 2003, présentant l'écart négatif le plus important (-15 %), 2006 (-11 %) et 2008, avec un écart à la moyenne positif, le plus fort sur l'ensemble de la période (+23 %). Le même calcul avec la correction apportée à ET vis-à-vis des jours pluvieux, donne une moyenne de WUE, de 1998 à 2008, égale à $4.8 (\pm 0.4) \text{ g CO}_2.\text{kg H}_2\text{O}^{-1}$. Avec l'ETR modélisée par BILJOU© à l'échelle de la parcelle C100, la WUE moyenne annuelle est estimée à $3.8 (\pm 0.3) \text{ g CO}_2.\text{kg H}_2\text{O}^{-1}$. Les WUE annuelles calculées de 1998 à 2008 à partir d'ET ou d'ET « corrigée » suivent les mêmes tendances (Figures A.26). La chute de l'indice de productivité est moins forte en 2003 pour le scénario ET « corrigé ». L'année 2008, reste celle avec l'indice de productivité le plus important (+19 %). La variabilité interannuelle de la WUE calculée avec l'ETR modélisée est plus faible qu'avec l'ETR mesurée par eddy covariance (corrigée ou non ; Figure A.26). L'année 2004 avec B.ETR.m_p a une WUE inférieure à 2003 contrairement aux autres calculs.

Granier et al. (2008) reportent un ratio GPP/ET, variant de 3.56 à $5.25 \text{ g CO}_2.\text{kg H}_2\text{O}^{-1}$, à Hesse dans le nord-est de la France, pour une forêt de hêtres de 40 ans. Ils précisent que les tables européennes de production pour le hêtre estiment un maximum de productivité jusqu'à 60 ans, avec un pic entre 30 et 50 ans. En comparaison, les résultats obtenus à Vielsalm, à partir des données d'ET, indiquent une productivité supérieure du peuplement, pourtant 2 à 3 fois plus vieux. Par contre, la WUE calculée avec les données d'ET « corrigées » ou d'ETR modélisée, sont davantage comparables.

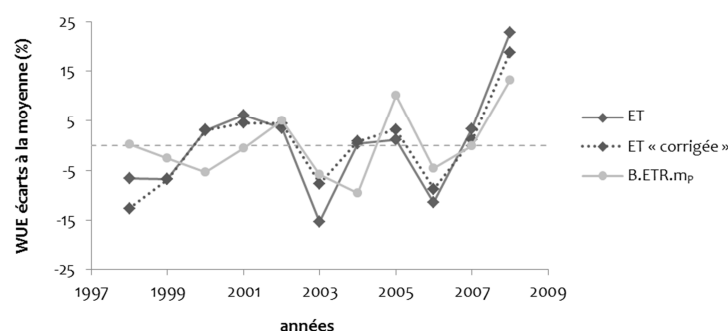


Figure A.26 : Écarts à la moyenne, calculée de 1998 à 2008, exprimés en %, de la WUE annuelle mesurée par eddy covariance, comme le rapport entre la GPP ($\text{g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) et ET ($\text{kg H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) ou ET « corrigée » (Section V.4.3), ou l'ETR modélisée par BILJOU® pour le peuplement mixte (Parcelle C100) et le calcul de RU moyen (B.ETR.m_p).

Les courbes de GPP moyennes, en fonction des classes de VPD, présentées Figure II.7 (Section II.1.2), ont été obtenues à partir des années 1998 à 2008, sauf 1999 et 2000. Pour le calcul de la WUE, le même type de relation pour la GPP, exprimée en $\text{g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ et pour ET, exprimée en $\text{kg H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jr}^{-1}$, ont été établies (Figures A.27 a et b), en retirant cependant de l'analyse l'année 2004 également, en raison du pourcentage de données absentes. En discriminant les données en fonction des secteurs SW(2) et NE(2), une estimation de la WUE pour la classe de PPFD à saturation, en fonction des classes de VPD, est alors disponible pour un sous-peuplement composé principalement de résineux, et un composé à majorité par les feuillus (Figure A.27).

Quel que soit le secteur, la WUE diminue avec une augmentation du VPD, tel qu'il est observé par Law et al. (2002) et Ponton et al. (2006). La hausse d'ET journalière pour le secteur NE en comparaison au secteur SW (Section V.1) est confirmée sur les données bi-horaires, pour la classe de PPFD à saturation, quelle que soit la classe de VPD (Figure A.27 b). Les GPP moyennes en fonction des classes de VPD entre les secteurs NE(2) et SW(2) présentent globalement peu de différences, amenant pour le secteur NE(2) à une estimation plus faible de la WUE quelle que soit la classe de VPD. L'indice de productivité du sous-peuplement composé à majorité de hêtres est plus élevé que celui composé principalement de conifères (+19 % en moyenne). L'écart de WUE s'accroît entre les 2 secteurs avec les classes de VPD, passant

de 7 % pour la première, à 33 % pour la dernière. Le problème de sous-estimation d'ET, constaté lors de journée pluvieuse, est en toute logique limité ici, les résultats étant issus des données pour la classe de PPFD à saturation. Ces résultats sont en accord avec la littérature, décrivant des WUE généralement les plus élevées pour les peuplements feuillus, puis mixtes et enfin résineux, pour les zones tempérées (Kuglitsch et al., 2008; Law et al., 2002).

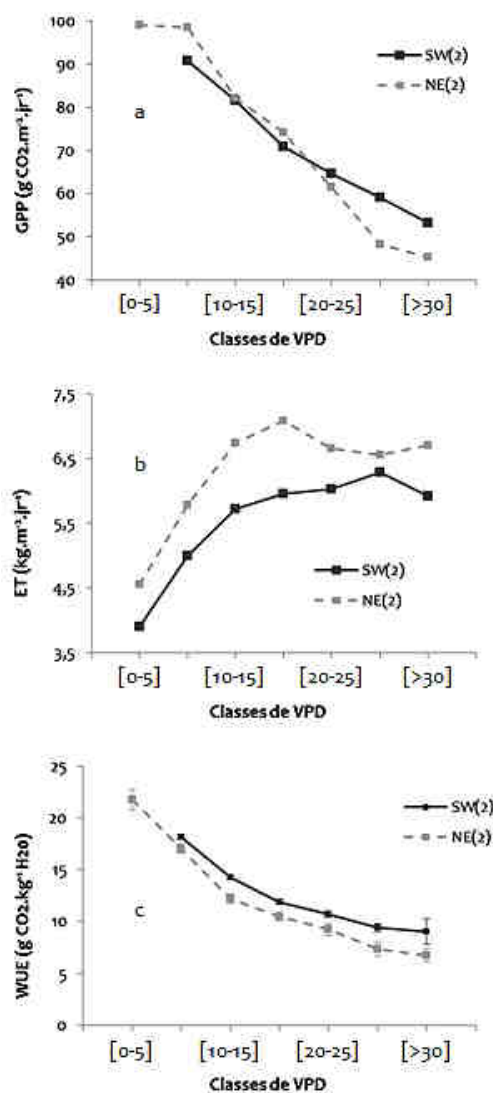


Figure A.27 : Moyenne et écart-type de a) la GPP (g CO₂.m⁻².jr⁻¹), b) ET (kg H₂O.m⁻².jr⁻¹) et c) de la WUE (g CO₂. kg⁻¹ H₂O), pour la classe de PPFD à saturation (<1000 μmol.m⁻².s⁻¹), en fonction des classes de VPD (hPa), établis à partir des données bi-horaires mesurées par eddy covariance, de 1998 à 2008 (sans 1999, 2000 et 2004, pour cause de valeurs manquantes), durant la période de végétation, en fonction des secteurs SW(2) (trait continu) et NE(2) (pointillés).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aboal, J.R., Morales, D., Hernández, M. and Jiménez, M.S., 1999. The measurement and modelling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands. *Journal of Hydrology*, 221(3-4): 161-175.
- Allen, C.D. et al., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4): 660-684.
- Allerup, P., Madsen, H. and Vejen, F., 1997. A comprehensive model for correcting point precipitation. *Nordic Hydrology*, 28(1): 1-20.
- Améglio, T. et al., 1998. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil*, 207(2): 155-167.
- André, F., Jonard, M. and Ponette, Q., 2008a. Influence of species and rain event characteristics on stemflow volume in a temperate mixed oak-beech stand. *Hydrological Processes*, 22(22): 4455-4466.
- André, F., Jonard, M. and Ponette, Q., 2008b. Precipitation water storage capacity in a temperate mixed oak-beech canopy. *Hydrological Processes*, 22(20): 4130-4141.
- Angeles, G. et al., 2004. The cohesion-tension theory. *New Phytologist*, 163(3): 451-452.
- Arya, S., 1988. *Introduction to Micrometeorology*. Academic Press, San Diego.
- Aubinet, M. et al., 2001. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(4): 293-315.
- Aubinet, M. et al., 1999. Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology, pp. 113-175.
- Aubinet, M., Heinesch, B. and Longdoz, B., 2002. Estimation of the carbon sequestration by a heterogeneous forest: Night flux corrections, heterogeneity of the site and inter-annual variability. *Global Change Biology*, 8(11): 1053-1071.
- Aubinet, M., Heinesch, B., Perrin, D. and Moureaux, C., 2005. Discriminating net ecosystem exchange between different vegetation plots in a heterogeneous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(3-4): 315-328.
- Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D. and Rothe, A., 2002. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 59(3): 233-253.
- Aussenac, G., 1968. Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sci. forest.*, 25(3): 135-156.
- Aussenac, G., 1972. Étude de l'évapotranspiration réelle de quatre peuplements forestiers dans l'Est de la France. *Ann. Sci. forest.*, 29(3): 369-389.
- Aussenac, G., 1975. Couverts forestiers et facteurs du climat: leurs interactions, conséquences écophysologiques chez quelques résineux. Thèse de doctorat.
- Aussenac, G. and Boulangeat, C., 1980. Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus silvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Ann. For. Sci.*, 37(2): 91-107.
- Aussenac, G. and Granier, A., 1978. Quelques résultats de cinétique journalière du potentiel de sève chez les arbres forestiers. *Ann. Sci. For.*, 35: 19-32.
- Aussenac, G. and Granier, A., 1979. Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus silvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. *Ann. Sci. forest.*, 36(4): 265-280.

Références bibliographiques

- Aussenac, G. and Granier, A., 1988. Effects of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(1): 100-105.
- Aussenac, G., Granier, A. and Ibrahim, M., 1984. (Influence of soil drying on water relations and growth of Douglas fir, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Influence du dessèchement du sol sur le fonctionnement hydrique et la croissance du douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco., 5(3): 241-253.
- Aussenac, G. and Valette, J.C., 1982. Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. Sci. For.*, 39(1): 41-62.
- Badalotti, A., Anfodillo, T. and Grace, J., 2000. Evidence of osmoregulation in *Larix decidua* at Alpine treeline and comparative responses to water availability of two co-occurring evergreen species. *Annals of Forest Science*, 57(7): 623-633.
- Baldocchi, D., 2008. TURNER REVIEW No. 15. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: Lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 56(1): 1-26.
- Baldocchi, D. et al., 2001. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11): 2415-2434.
- Barrett, D.J., Hatton, T.J., Ash, J.E. and Ball, M.C., 1995. Evaluation of the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rainforest and eucalypt forest species of south-eastern Australia. *Plant, Cell & Environment*, 18(4): 463-469.
- Becker, M., Nieminen, T.M. and Geremia, F., 1994. Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂. *Annales des Sciences Forestières*, 51(5): 477-492.
- Beier, C. et al., 2012. Precipitation manipulation experiments – challenges and recommendations for the future. *Ecology Letters*, 15(8): 899-911.
- Benecke, P., 1984. Der Wasserhaushalt eines Buchen- und eines Fichtenwaldökosystems im Hochsolling. *Schr Forstl Fak Univ Göttingen*, 77: 1-158.
- Betsch, P., 2010. Les relations hydriques chez le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) : résistances au transfert de l'eau, régulation de la transpiration et contribution des réserves d'eau échangeable en réponse à la sécheresse. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie - Paris 6.
- Biron, P., 1994. Le cycle de l'eau en forêt de moyenne montagne: flux de sève et bilans hydriques stationnels (bassin versant du Strengbach à Aubure-Hautes Vosges). Thèse de l'Université Louis Pasteur (Strasbourg), 244 pp. + annexes.
- Bonneau, M., 1961. Évaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, n spécial: 16-26.
- Bouten, W., Heimovaara, T.J. and Tiktak, A., 1992. Spatial patterns of throughfall and soil water dynamics in a Douglas fir stand. *Water Resources Research*, 28(12): 3227-3233.
- Boyce, R. and McCune, D., 1992. Water holdup capacity and residence time of red spruce and balsam fir branches. *Trees*, 6(1): 10-27.
- Brázdil, R. et al., 2010. European climate of the past 500 years: new challenges for historical climatology. *Climatic Change*, 101(1-2): 7-40.

- Bréda, N. and Badeau, V., 2008. Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *Comptes Rendus - Geoscience*, 340(9-10): 651-662.
- Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E. and Granier, A., 1993. Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of *Quercus petraea* and *Quercus robur* under water stress. *Ann. Sci. For.*, 50: 571-582.
- Bréda, N., Granier, A. and Aussenac, G., 1995. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiology*, 15(5): 295-306.
- Bréda, N., Granier, A. and Aussenac, G., 2004. The 2003 drought in the climate context of the last 54 years - Ecophysiological analysis and impact on forest trees. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années: Analyse écophysologique et influence sur les arbres forestiers, 56(2): 109-131.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A. and Dreyer, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6): 625-644.
- Bréda, N., Lefèvre, Y. and Badeau, V., 2002. Forest soil extractable water: Specificity and estimation. *Réservoir en eau des sols forestiers tempérés: Spécificité et difficultés d'évaluation*(3): 24-32.
- Bréda, N.J.J., 2003. Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392): 2403-2417.
- Breshears, D.D. et al., 2008. Foliar absorption of intercepted rainfall improves woody plant water status most during drought. *Ecology*, 89(1): 41-47.
- Brooks, J.R., Meinzer, F.C., Warren, J.M., Domec, J.-C. and Coulombe, R.O.B., 2006. Hydraulic redistribution in a Douglas-fir forest: lessons from system manipulations. *Plant, Cell & Environment*, 29(1): 138-150.
- Brough, D.W., Jones, H.G. and Grace, J., 1986. Diurnal changes in water content of the stems of apple trees, as influenced by irrigation. *Plant, Cell & Environment*, 9(1): 1-7.
- Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R. and Jamagne, M., 1996. Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des sols*, 31.
- Bücking, W. and Krebs, A., 1986. Interzeption und Bestandesniederschläge von Buche und Fichte im Schönbuch. In: Einsele G (ed) *Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch*. VCH, Weinheim, Germany: 113-131.
- Burba, G., 2013. *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates*. LI-COR Biosciences.
- Burgess, S.S.O., Adams, M.A., Turner, N.C. and Ong, C.K., 1998. The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 115(3): 306-311.
- Burgess, S.S.O. and Dawson, T.E., 2004. The contribution of fog to the water relations of *Sequoia sempervirens* (D. Don): foliar uptake and prevention of dehydration. *Plant, Cell & Environment*, 27(8): 1023-1034.

- Bush, S.E., Hultine, K.R., Sperry, J.S. and Ehleringer, J.R., 2010. Calibration of thermal dissipation sap flow probes for ring- and diffuse-porous trees. *Tree Physiology*, 30(12): 1545-1554.
- Buttafuoco, G. and Castrignanò, A., 2005. Study of the spatio-temporal variation of soil moisture under forest using intrinsic random functions of order $k < i >$. *Geoderma*, 128(3): 208-220.
- Cabibel, B. and Do, F., 1991. Thermal measurement of sap flux in trunks and roots and hydrous behaviour of trees. I. Theoretical analysis of the errors in sap-flux estimations and measurement validation in the presence of external thermal gradients. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs, 11(8): 669-678.
- Calvet, R., 2003. Le sol: propriétés et fonctions, 2. France Agricole Editions.
- Čermák, J., Cienciala, E., Kučera, J. and Hällgren, J.-E., 1992. Radial velocity profiles of water flow in trunks of Norway spruce and oak and the response of spruce to severing. *Tree Physiology*, 10(4): 367-380.
- Čermák, J., Deml, M. and Penka, M., 1973. A new method of sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum*, 15(3): 171-178.
- Čermák, J. and Kučera, J., 1981. The compensation of natural temperature gradient at the measuring point during the sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum*, 23(6): 469-471.
- Čermák, J., Kučera, J., Bauerle, W.L., Phillips, N. and Hinckley, T.M., 2007. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 27(2): 181-198.
- Čermák, J., Kučera, J. and Nadezhdina, N., 2004. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees - Structure and Function*, 18(5): 529-546.
- Čermák, J. and Nadezhdina, N., 1998. Sapwood as the scaling parameter - Defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? *Annales des Sciences Forestieres*, 55(5): 509-521.
- Choisnel, E., De Villele, O. and Lacroze, F., 1992. Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européenne. Commission des communautés européennes Luxembourg.
- Chuine, I., 2000. A Unified Model for Budburst of Trees. *Journal of Theoretical Biology*, 207(3): 337-347.
- Ciais, P. et al., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058): 529-533.
- Clearwater, M.J., Meinzer, F.C., Andrade, J.L., Goldstein, G. and Holbrook, N.M., 1999. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, 19(10): 681-687.
- Clement, R.J., 2005. Mass and energy exchange of a plantation forest in Scotland using micrometeorological methods, University of Edinburgh.
- Cochard, H., 1992. Vulnerability of several conifers to air embolism. *Tree Physiol.*, 11: 73-83.

- Cochard, H., Bréda, N., Granier, A. and Aussenac, G., 1992a. Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L). *Ann. Sci. For.*, 49: 225-233.
- Cochard, H., Cruiziat, P. and Tyree, M.T., 1992b. Use of positive pressures to establish vulnerability curves: Further support for the air-seeding hypothesis and implications for pressure-volume analysis. *Plant Physiology*, 100(1): 205-209.
- Cochard, H. and Granier, A., 1999. The water function of forest trees. *Fonctionnement hydraulique des arbres forestiers*, 51(2): 121-134.
- Cochard, H., Lemoine, D. and Dreyer, E., 1999. The effects of acclimation to sunlight on the xylem vulnerability to embolism in *Fagus sylvatica* L. *Plant, Cell and Environment*, 22(1): 101-108.
- Cochard, H., Peiffer, M., Le Gall, K. and Granier, A., 1997. Developmental control of xylem hydraulic resistances and vulnerability to embolism in *Fraxinus excelsior* L.: Impacts on water relations. *Journal of Experimental Botany*, 48(308): 655-663.
- Couchat, P., 1967. La méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols. *Rapport CEA(3298)*.
- Crockford, R.H. and Richardson, D.P., 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemslow and interception effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(16-17): 2903-2920.
- Cruiziat, P., Cochard, H. and Améglio, T., 2002. Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Ann. For. Sci.*, 59(7): 723-752.
- Cuenca, R.H., Stangel, D.E. and Kelly, S.F., 1997. Soil water balance in a boreal forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D24): 29355-29365.
- Davi, H. et al., 2008. Modelling leaf mass per area in forest canopy as affected by prevailing radiation conditions. *Ecological Modelling*, 211(3-4): 339-349.
- Davis, J. and Chudobiak, W., 1975. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. *Geol. Surv. Can. Pap*, 75(1A): 75-79.
- de Ligne, A., Heinesch, B. and Aubinet, M., 2010. New Transfer Functions for Correcting Turbulent Water Vapour Fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 137(2): 205-221.
- de Oliveira Reis, F., Campostrini, E., de Sousa, E.F. and Silva, M.G.e., 2006. Sap flow in papaya plants: Laboratory calibrations and relationships with gas exchanges under field conditions. *Scientia Horticulturae*, 110(3): 254-259.
- Delmelle, V., 2012. Éco-hydrologie d'un peuplement forestier ardennais : caractérisation et dynamique de la réserve en eau utile et de l'évapotranspiration réelle. Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Bioingénieur. Université Catholique de Louvain Faculté d'Ingénierie Biologique, Agronomique et Environnementale.
- Delzon, S., Sartore, M., Granier, A. and Loustau, D., 2004. Radial profiles of sap flow with increasing tree size in maritime pine. *Tree Physiology*, 24(11): 1285-1293.
- Dittmar, C., Zech, W. and Elling, W., 2003. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173(1-3): 63-78.
- Dixon, H., 1936. The convection of heat and materials in the stem of a tree. *The Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society*. Royal Dublin Society, 21: 477-488.
- Dixon, H.H., 1914. *Transpiration and the ascent of sap in plants*. Macmillan and Company, limited.

Références bibliographiques

- Dixon, H.H. and Joly, J., 1894. On the ascent of sap. *Proceedings of the Royal Society of London*, 57(340-346): 3-5.
- Do, F. and Rocheteau, A., 2002a. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies. *Tree Physiology*, 22(9): 641-648.
- Do, F. and Rocheteau, A., 2002b. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. *Tree Physiology*, 22(9): 649-654.
- Domec, J.-C. et al., 2010. Hydraulic redistribution of soil water by roots affects whole-stand evapotranspiration and net ecosystem carbon exchange. *New Phytologist*, 187(1): 171-183.
- Domec, J.C., Meinzer, F.C., Gartner, B.L. and Woodruff, D., 2006. Transpiration-induced axial and radial tension gradients in trunks of Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 26(3): 275-284.
- Domec, J.C., Pruyn, M.L. and Gartner, B.L., 2005. Axial and radial profiles in conductivities, water storage and native embolism in trunks of young and old-growth ponderosa pine trees. *Plant, Cell and Environment*, 28(9): 1103-1113.
- Domec, J.C., Warren, J.M., Meinzer, F.C., Brooks, J.R. and Coulombe, R., 2004. Native root xylem embolism and stomatal closure in stands of Douglas-fir and ponderosa pine: mitigation by hydraulic redistribution. *Oecologia*, 141(1): 7-16.
- Ducharne, A., 2002. *Projet GLCC-Seine: questions relatives à l'ETP. Note technique*(2).
- Ducrey, M., 1988. Réactions à la sécheresse de quelques espèces forestières méditerranéennes. *Rev. For. Fr.*, 40.
- Dufrêne, E. and Bréda, N., 1995. Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods. *Oecologia*, 104(2): 156-162.
- Dupouey, J.L., Leavitt, S., Choisnel, E. and Jourdain, S., 1993. Modelling carbon isotope fractionation in tree rings based on effective evapotranspiration and soil water status. *Plant, Cell & Environment*, 16(8): 939-947.
- Ewers, B.E., Oren, R., Kim, H.S., Bohrer, G. and Lai, C.T., 2007. Effects of hydraulic architecture and spatial variation in light on mean stomatal conductance of tree branches and crowns. *Plant, Cell & Environment*, 30(4): 483-496.
- FAO, 2010. *Evaluation des ressources forestières mondiales 2010. Rapport final. Forestry Paper 163.*
- Ferguson, H. and Gardner, W.H., 1962. Water Content Measurement in Soil Columns by Gamma Ray Absorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 26(1): 11-14.
- Fernández, M.E., Gyenge, J. and Schlichter, T., 2009. Water flux and canopy conductance of natural versus planted forests in Patagonia, South America. *Trees - Structure and Function*, 23(2): 415-427.
- Fiora, A. and Cescatti, A., 2006. Diurnal and seasonal variability in radial distribution of sap flux density: implications for estimating stand transpiration. *Tree Physiology*, 26(9): 1217-1225.
- Ford, C.R., Hubbard, R.M., Kloeppel, B.D. and Vose, J.M., 2007. A comparison of sap flux-based evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(3-4): 176-185.

- Ford, C.R., McGuire, M.A., Mitchell, R.J. and Teskey, R.O., 2004. Assessing variation in the radial profile of sap flux density in *Pinus* species and its effect on daily water use. *Tree Physiology*, 24(3): 241-249.
- Fritts, H., 1976. *Tree rings and climate*, 567 pp. Academic, San Diego, Calif.
- Froux, F., Huc, R., Ducrey, M. and Dreyer, E., 2002. Xylem hydraulic efficiency versus vulnerability in seedlings of four contrasting Mediterranean tree species (*Cedrus atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* and *Pinus nigra*). *Annals of Forest Science*, 59(4): 409-418.
- Galoux, A., 1966. La variabilité génécologique du hêtre commun (*Fagus silvatica* L.) en Belgique.
- Gash, J.H.C., 1986. A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 35(4): 409-413.
- Gebauer, T., Horna, V. and Leuschner, C., 2008. Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiology*, 28(12): 1821-1830.
- Gerke, H., 1987. Untersuchungen zum Wasserhaushalt eines Kalkbuchenwald-Ökosystems und zur Wasserbewegung in flachgründigen Böden und im durchwurzelten Kalkgestein als Grundlage zur Modellentwicklung. *Ber Forschungszentrum Waldökosysteme Göttingen A*, 27(1-189).
- Gerrits, A.M.J., Pfister, L. and Savenije, H.H.G., 2010. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest. *Hydrological Processes*, 24(21): 3011-3025.
- GIEC, 2013. Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique.
- Goldstein, A.H. et al., 2000. Effects of climate variability on the carbon dioxide, water, and sensible heat fluxes above a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada (CA). *Agricultural and Forest Meteorology*, 101(2-3): 113-129.
- Goldstein, G. et al., 1998. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell & Environment*, 21(4): 397-406.
- Goudriaan, J. and Van Laar, H.H., 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes*.
- Goulden, M.L., Munger, J.W., Song-Miao, F., Daube, B.C. and Wofsy, S.C., 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 2(3): 169-182.
- Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. For. Sci.*, 42(2): 193-200.
- Granier, A., 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3(4): 309-320.
- Granier, A. et al., 1994. Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: A quantitative and qualitative analysis. *Tree Physiology*, 14(12): 1383-1396.

Références bibliographiques

- Granier, A. et al., 2003. Deciduous Forests: Carbon and Water Fluxes, Balances and Ecophysiological Determinants. In: R. Valentini (Editor), Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests. Ecological Studies. Springer Berlin Heidelberg, pp. 55-70.
- Granier, A., Badeau, V. and Bréda, N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers.
- Granier, A., Biron, P. and Lemoine, D., 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(4): 291-308.
- Granier, A. et al., 1990. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51(3-4): 309-319.
- Granier, A., Bréda, N., Biron, P. and Villette, S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116(2-3): 269-283.
- Granier, A., Bréda, N., Longdoz, B., Gross, P. and Ngao, J., 2008. Ten years of fluxes and stand growth in a young beech forest at Hesse, North-eastern France. *Annals of Forest Science*, 65(7).
- Granier, A., Huc, R. and Colin, F., 1992. Transpiration and stomatal conductance of two rain forest species growing in plantations (*Simarouba amara* and *Goupia glabra*) in French Guyana. *Ann. For. Sci.*, 49(1): 17-24.
- Granier, A., Hue, R. and Barigah, S.T., 1996. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78(1-2): 19-29.
- Granier, A., Pilegaard, K. and Jensen, N.O., 2002. Similar net ecosystem exchange of beech stands located in France and Denmark. *Agricultural and Forest Meteorology*, 114(1-2): 75-82.
- Granier, A. et al., 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(1-2): 123-145.
- Green, S., Clothier, B. and Jardine, B., 2003. Theory and Practical Application of Heat Pulse to Measure Sap Flow. *Agron. J.*, 95(6): 1371-1379.
- Gross, K. and Koch, W., 1991. Water relations of *Picea abies*. I. Comparison of water relations parameters of spruce shoots examined at the end of the vegetation period and in winter. *Physiologia Plantarum*, 83(2): 290-295.
- Gurr, C.G., 1962. Use of Gamma Rays in Measuring Water Content and Permeability in Unsaturated Columns of Soil. *Soil Science*, 94(4): 224-229.
- Hacke, U. and Sauter, J.J., 1995. Vulnerability of xylem to embolism in relation to leaf water potential and stomatal conductance in *Fagus sylvatica* f. *purpurea* and *Populus balsamifera*. *Journal of Experimental Botany*, 46(9): 1177-1183.
- Heil, K., 1996. Wasserhaushalt und Stoffumsatz in Fichten- (*Picea abies* (L.) Karst.) und Buchenökosystemen (*Fagus sylvatica* L.) der höheren Lagen des Bayerischen Waldes. PhD thesis, University of Munich.
- Heinesch, B., 2007. Mesure et analyse du transport advectif de CO₂ dans une forêt sur versant.

- Heinesch, B., Yernaux, M. and Aubinet, M., 2007. Some methodological questions concerning advection measurements: A case study. *Boundary-Layer Meteorology*, 122(2): 457-478.
- Heinesch, B., Yernaux, Y. and Aubinet, M., 2008. Dependence of CO₂ advection patterns on wind direction on a gentle forested slope. *Biogeosciences*, 5(3): 657-668.
- Hénin, S., 1977. Cours de physique du sol: L'eau et le sol-Les propriétés mécaniques-La chaleur et le sol.
- Herbst, M., Eschenbach, C. and Kappen, L., 1999. Water use in neighbouring stands of beech (*Fagus sylvatica* L.) and black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Ann. For. Sci.*, 56(2): 107-120.
- Herbst, M., Rosier, P.T.W., McNeil, D.D., Harding, R.J. and Gowing, D.J., 2008. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(11): 1655-1667.
- Herzog, K., Häsler, R. and Thum, R., 1995. Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem: their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration. *Trees*, 10(2): 94-101.
- Hinckley, T.M., Lassoie, J.P. and Running, S.W., 1978. Temporal and Spatial Variations in the Water Status of Forest Trees. *Forest Science*, 24(3): a0001-z0001.
- Hölscher, D., Koch, O., Korn, S. and Leuschner, C., 2005. Sap flux of five co-occurring tree species in a temperate broad-leaved forest during seasonal soil drought. *Trees*, 19(6): 628-637.
- Holst, T. et al., 2004. Measuring and modelling plant area index in beech stands. *Int J Biometeorol*, 48(4): 192-201.
- Howard, A.R., Van Iersel, M.W., Richards, J.H. and Donovan, L.A., 2009. Night-time transpiration can decrease hydraulic redistribution. *Plant, Cell & Environment*, 32(8): 1060-1070.
- Huart, O. et al., 2003. Le point sur la maladie du hêtre en Wallonie. *Forêt Wallonne*(64).
- Huber, B., 1932. Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme.
- Huber, B. and Schmidt, E., 1937. Eine Kompensationsmethode zur thermoelektrischen Messung langsamer Saftströme.
- Hultine, K.R. et al., 2010. Sap flux-scaled transpiration by tamarisk (*Tamarix* spp.) before, during and after episodic defoliation by the saltcedar leaf beetle (*Diorhabda carinulata*). *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11): 1467-1475.
- Huntington, T.G., 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4): 83-95.
- Huxman, T.E. et al., 2004. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 429(6992): 651-654.
- Ibrom, A., Dellwik, E., Flyvbjerg, H., Jensen, N.O. and Pilegaard, K., 2007. Strong low-pass filtering effects on water vapour flux measurements with closed-path eddy correlation systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 147(3-4): 140-156.
- Iroumé, A. and Huber, A., 2002. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile. *Hydrological Processes*, 16(12): 2347-2361.
- Irvine, J. and Grace, J., 1997. Continuous measurements of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. *Planta*, 202(4): 455-461.

Références bibliographiques

- Ittner, E., 1968. Der Tageshang der Geschwindigkeit des Transpirationsstromes im Stamm einer 75-jährigen Fichte. *Oecologia Plantarum*, 3: 177-183.
- Jackson, M., 2003. Ridge, I. (ed) *Plants. Annals of Botany*, 91(7): 940-941.
- James, W.O. and Baker, H., 1933. Sap pressure and the movements of sap. *New Phytologist*, 32(5): 317-355.
- Jarvis, P.G. and McNaughton, K.G., 1986. Stomatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region, pp. 1-49.
- Jonard, F., André, F., Ponette, Q., Vincke, C. and Jonard, M., 2011. Sap flux density and stomatal conductance of European beech and common oak trees in pure and mixed stands during the summer drought of 2003. *Journal of Hydrology*, 409(1-2): 371-381.
- Kaimal, J.C. and Finnigan, J.J., 1994. *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*. Oxford University Press.
- Köhler, F., 1887. Köhler's Medizinal-Pflanzen in naturgetreuen Abbildungen mit kurz erläuterndem. *Atlas zur Pharmacopoea germanica*, 1 of 3.
- Köstler, J.N., Brückner, E. and Bibelriether, H., 1968. *Die Wurzeln der Waldbäume*. P. Parey.
- Köstner, B., 2001. Evaporation and transpiration from forests in Central Europe - Relevance of patch-level studies for spatial scaling. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 76(1-2): 69-82.
- Köstner, B., Biron, P., Siegwolf, R. and Granier, A., 1996. Estimates of water vapor flux and canopy conductance of Scots pine at the tree level utilizing different xylem sap flow methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 53(1-3): 105-113.
- Köstner, B., Granier, A. and Cermák, J., 1998. Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. *Ann. For. Sci.*, 55(1-2): 13-27.
- Kramer, P.J., 1940. Sap Pressure and Exudation. *American Journal of Botany*, 27(10): 929-931.
- Kuglitsch, F. et al., 2008. Characterisation of ecosystem water-use efficiency of european forests from eddy covariance measurements. *Biogeosciences Discussions*, 5(6).
- Kuradji, K., Yuri, T., Nobuaki, T. and Isamu, K., 2001. Generation of stemflow volume and chemistry in a mature Japanese cypress forest. *Hydrological Processes*, 15(10): 1967-1978.
- La Spina, S., 2011. Etude du déclin soudain du hêtre : effets de stress climatiques sur la sensibilité des arbres aux attaques de scolytes. (Unpublished doctoral dissertation). Université Libre de Bruxelles, Brussels.
- Laffineur, Q. et al., 2011. Isoprene and monoterpene emissions from a mixed temperate forest. *Atmospheric Environment*, 45(18): 3157-3168.
- Lagergren, F. and Lindroth, A., 2002. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112(2): 67-85.
- Laitat, E., Chermanne, B. and Portier, B., 1999. Biomass, carbon and nitrogen allocation in open top chambers under ambient and elevated CO₂ and in mixed forest stand. *Forest Ecosystem Modelling, Upscaling and Remote Sensing*. The Hague, SPB Academic Publishing bv., The Netherlands: 33-59.

- Lambot, S., Javaux, M., Hupet, F. and Vanclooster, M., 2002. A global multilevel coordinate search procedure for estimating the unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 38(11): 6-1-6-15.
- Lambot, S. and Vanclooster, M., 2010. Hydrodynamique des sols, modélisation. Syllabus du cours BRES2102, Document non publié, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- Lang, S., 1999. Ökophysiologische und anatomische Untersuchungen zum Saftfluß in verschiedenen Splintholzbereichen von *Fagus sylvatica* L. PhD thesis, University of Karlsruhe.
- Law, B.E. et al., 2002. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1-4): 97-120.
- Lawlor, D.W., 1998. Plant responses to global change: Temperature and drought stress. *Responses of Plant Metabolism to Air Pollution and Global Change*: 193-208.
- Le Dantec, V., Dufrêne, E. and Saugier, B., 2000. Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperate deciduous stands. *Forest Ecology and Management*, 134(1-3): 71-81.
- Lebourgeois, F., 2005. Dendroecological approach to the sensitivity of the beech tree (*fagus sylvatica* L.) to the climate in France and Europe. *Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (fagus sylvatica L.) au climat en france et en Europe*, 57(1): 33-49.
- Lebourgeois, F., Bréda, N., Ulrich, E. and Granier, A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19(4): 385-401.
- Lebourgeois, F. and Merian, P., 2010. Principes et méthodes de la dendrochronologie. FIF-ENGREF (www2.nancy.inra.fr/unites/lerfob/ecologie-fores-tiere/pages-perso/f-lebourgeois/documents/docrecherche/Manuel_Dendro2010.pdf, 28/10/2011).
- Lecomte, H., Florkin, P., Morimont, J. and Thirion, M., 2002. La forêt wallonne: état de la ressource à la fin du 20e siècle. Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Jambes, 69p.
- Légende_de_la_Carte_Numérique_des_Sols_de_Wallonie_version_2, 2007. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Laboratoire de Géopédologie, en relation avec le PCNSW (convention pour le compte de la Région Wallone – DGA): 54 p + 2 annexes.
- Lemoine, D., Granier, A. and Cochard, H., 1999. Mechanism of freeze-induced embolism in *Fagus sylvatica* L. *Trees*, 13(4): 206-210.
- Leuning, R. and Judd, M.J., 1996. The relative merits of open- And closed-path analysers for measurement of eddy fluxes. *Global Change Biology*, 2(3): 241-253.
- Leuschner, C., 1994. Walddynamik in der Lüneburger Heide: Ursachen, Mechanismen und die Rolle der Ressourcen. Habilitation thesis, University of Göttingen.
- Leuschner, C. et al., 2001. Drought responses at leaf, stem and fine root levels of competitive *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. trees in dry and wet years. *Forest Ecology and Management*, 149(1-3): 33-46.

Références bibliographiques

- Limm, E., Simonin, K., Bothman, A. and Dawson, T., 2009. Foliar water uptake: a common water acquisition strategy for plants of the redwood forest. *Oecologia*, 161(3): 449-459.
- Link, T.E., Unsworth, M. and Marks, D., 2004. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3-4): 171-191.
- Lloyd, C.R., Gash, J.H.C., Shuttleworth, W.J. and de O. Marques F, A., 1988. The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian rain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43(3-4): 277-294.
- Longdoz, B., Yernaux, M. and Aubinet, M., 2000. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: Impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biology*, 6(8): 907-917.
- Loustau, D., Berbigier, P., Granier, A. and Moussa, F.E.H., 1992. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *Journal of Hydrology*, 138(3-4): 449-467.
- Lu, P., Biron, P., Breda, N. and Granier, A., 1995. Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) under soil drought in the Vosges mountains: Water potential, stomatal conductance and transpiration. *Annales des Sciences Forestieres*, 52(2): 117-129.
- Lu, P., Müller, W.J. and Chacko, E.K., 2000. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiology*, 20(10): 683-692.
- Lu, P., Urban, L. and Zhao, P., 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *ACTA BOTANICA SINICA-ENGLISH EDITION*, 46(6): 631-646.
- Lu, P., Woo, K.C. and Liu, Z.T., 2002. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements. *Journal of Experimental Botany*, 53(375): 1771-1779.
- Lüttschwager, D. and Remus, R., 2007. Radial distribution of sap flux density in trunks of a mature beech stand. *Ann. For. Sci.*, 64(4): 431-438.
- Manion, P.D. and Lachance, D., 1992. Forest decline concepts. American Phytopathological Society (APS).
- Manise, T. and Vincke, C., 2012. ACTION 2.1.2b : Estimation du bilan hydrique et du risque de stress hydrique pour des peuplements d'avenir en Région wallonne. Rapport final.
- Marshall, D., 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant physiology*, 33(6): 385.
- Martínez-Vilalta, J., Piñol, J. and Beven, K., 2002. A hydraulic model to predict drought-induced mortality in woody plants: an application to climate change in the Mediterranean. *Ecological Modelling*, 155(2-3): 127-147.
- McDowell, N. et al., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4): 719-739.
- McDowell, N.G. et al., 2011. The interdependence of mechanisms underlying climate-driven vegetation mortality. *Trends in Ecology & Evolution*, 26(10): 523-532.

- Meehl, G.A. and Tebaldi, C., 2004. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 305(5686): 994-997.
- Meinzer, F.C. et al., 2004. Converging patterns of uptake and hydraulic redistribution of soil water in contrasting woody vegetation types. *Tree Physiology*, 24(8): 919-928.
- Meiresonne, L. et al., 2003. Water flux estimates from a Belgian Scots pine stand: a comparison of different approaches. *Journal of Hydrology*, 270(3-4): 230-252.
- Michelot, A., Simard, S., Rathgeber, C., Dufrêne, E. and Damesin, C., 2012. Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree Physiology*, 32(8): 1033-1045.
- Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F.W. and Hegerl, G.C., 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470(7334): 378-381.
- Moncrieff, J.B. et al., 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, 188-189(1-4): 589-611.
- Monsi, S. and Saeki, T., 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Journal of Japanese Botany*, 14: 22-52.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19: 205-234.
- Moore, K.E., Fitzjarrald, D.R., Sakai, R.K. and Freedman, J.M., 2000. Growing season water balance at a boreal jack pine forest. *Water Resources Research*, 36(2): 483-493.
- Musy, A. and Soutter, M., 1991. *Physique du sol*, 6. PPUR presses polytechniques.
- Nadezhdina, N., Čermák, J. and Ceulemans, R., 2002. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: Scaling errors associated with positioning of sensors. *Tree Physiology*, 22(13): 907-918.
- Nadezhdina, N., Čermák, J., Gašpárek, J., Nadezhdin, V. and Prax, A., 2006. Vertical and horizontal water redistribution in Norway spruce (*Picea abies*) roots in the Moravian Upland. *Tree Physiology*, 26(10): 1277-1288.
- Nadezhdina, N., Čermák, J. and Nadezhdin, V., 1998. Heat field deformation method for sap flow measurements. In: Čermák, J., Nadezhdina, N. (Eds.), *Proceedings of the 4th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants*. Publishing House of Mendel University, Czech Republic: pp. 72-92.
- Nadezhdina, N. et al., 2009. Stem-mediated hydraulic redistribution in large roots on opposing sides of a Douglas-fir tree following localized irrigation. *New Phytologist*, 184(4): 932-943.
- Nageleisen, L.-M. and Huart, O., 2005. Problèmes sanitaires d'actualité en hêtraie: La maladie du hêtre dans les ardennes. *Revue forestière française*, 57(2): 249-254.
- Neftel, A., Spirig, C. and Ammann, C., 2008. Application and test of a simple tool for operational footprint evaluations. *Environmental Pollution*, 152(3): 644-652.
- Niinemets, Ü. and Valladares, F., 2006. Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs*, 76(4): 521-547.

Références bibliographiques

- Oishi, A.C., Oren, R. and Stoy, P.C., 2008. Estimating components of forest evapotranspiration: A footprint approach for scaling sap flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(11): 1719-1732.
- Oliveira, R., Dawson, T., Burgess, S.O. and Nepstad, D., 2005. Hydraulic redistribution in three Amazonian trees. *Oecologia*, 145(3): 354-363.
- Oren, R., Phillips, N., Ewers, B.E., Pataki, D.E. and Megonigal, J.P., 1999. Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest. *Tree Physiology*, 19(6): 337-347.
- Oren, R., Phillips, N., Katul, G., Ewers, B.E. and Pataki, D.E., 1998. Scaling xylem sap flux and soil water balance and calculating variance: A method for partitioning water flux in forests. *Annales des Sciences Forestières*, 55(1-2): 191-216.
- Peck, A. and Mayer, H., 1996. Einfluß von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Wäldern. *Forstw Cbl*, 115(1): 1-9.
- Peiffer, M., 2005. Paramétrisation du bilan hydrique et établissement des flux d'eau et de nutriments dans des séquences de hêtraies de plaine. Doctorat sciences forestières, Paristech > ENGREF.
- Pélegrin, P. and Buscarlet, L., 1960. Determination of the moisture content and density of soils by means of neutron-or γ -ray-emitting probes. *Bull. Inst. Agron Gembl. Hors. Ser.*, 2: 854-871.
- Penman, H., 1956. Evaporation: an introductory survey. *Neth. J. Agric. Sci*, 4(1): 9-29.
- Pereira Dos Santos, L.A., 1997. Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier (Grenoble 1).
- Perrier, A., 1977. Etudes des variations de l'évapotranspiration a partir d'un modele analytique prenant en compte les variations verticales des densites de surface foliaire et des resistances stomatiques. *Meteorologie*.
- Phillips, N., Bond, B.J., McDowell, N.G. and Ryan, M.G., 2002. Canopy and hydraulic conductance in young, mature and old Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 22(2-3): 205-211.
- Phillips, N., Oren, R. and Zimmermann, R., 1996. Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring-porous tree species. *Plant, Cell & Environment*, 19(8): 983-990.
- Pilegaard, K., Ibrom, A., Courtney, M.S., Hummelshøj, P. and Jensen, N.O., 2011. Increasing net CO₂ uptake by a Danish beech forest during the period from 1996 to 2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7): 934-946.
- Ponton, S. et al., 2006. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques. *Global Change Biology*, 12(2): 294-310.
- Prieto, I., Armas, C. and Pugnaire, F.I., 2012. Water release through plant roots: new insights into its consequences at the plant and ecosystem level. *New Phytologist*, 193(4): 830-841.
- Pypker, T.G., Bond, B.J., Link, T.E., Marks, D. and Unsworth, M.H., 2005. The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130(1-2): 113-129.

- Rameau, J.-C., 2001. Données de l'IFN et habitats forestiers. *Revue forestière française*, 53(3-4): 359-364.
- Renaud, J. and Nageleisen, L., 2004. Results from the European network for damage monitoring. *Département de la santé des forêts, Bilan de la santé des forêts en*, 2005: 21.
- Renchon, A., 2013. Inter-annual variability of carbon sequestration by a mixed forest. Master thesis presented with a view to obtaining a bioengineer master degree in environment sciences and technology. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech.
- Richards, L.A., 1941. A Pressure-Membrane Extraction Apparatus for Soil Solution. *Soil Science*, 51(5): 377-386.
- Roberts, J., 1983. Forest transpiration: A conservative hydrological process? *Journal of Hydrology*, 66(1-4): 133-141.
- Robins, P., 1974. A method of measuring the aerodynamic resistance to the transport of water vapour from forest canopies. *Journal of applied ecology*: 315-325.
- Rondeux, J., Bourland, N., Huart, O. and Lecomte, H., 2002. Maladie du hêtre. Bilan chiffré de la situation à l'été 2001. *Forêt Wallonne*(60).
- Rondeux, J., Huart, O., Lecomte, H. and Bourland, N., 2003. La maladie du hêtre en Région Wallonne: état des lieux chiffré de 2001 à 2003. *Silva Belgica*, 110(3).
- Rothacher, J., 1963. Net Precipitation under a Douglas-Fir Forest. *Forest Science*, 9(4): 423-429.
- Roupsard, O. et al., 2006. Partitioning energy and evapo-transpiration above and below a tropical palm canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139(3-4): 252-268.
- Running, S.W., 1979. Relating plant capacitance to the water relations of *Pinus contorta*. *Forest Ecology and Management*, 2(0): 237-252.
- Runyon, J., Waring, R.H., Goward, S.N. and Welles, J.M., 1994. Environmental limits on net primary production and light-use efficiency across the Oregon transect. *Ecological Applications*, 4(2): 226-237.
- Rutter, A.J., Morton, A.J. and Robins, P.C., 1975. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. Appl. Ecol.*, 12: 367-380.
- Sarvas, R., 1972. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. Active period. *Metsantutkimuslaitoksen Julkaisuja*, 76(3).
- Saugier, B., Granier, A., Pontailler, J.Y., Dufrêne, E. and Baldocchi, D.D., 1997. Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods. *Tree Physiology*, 17(8-9): 511-519.
- Saur, E., 2008. Communication didactique ENITA (Ecole Nationale d'Ingénieurs des travaux agricoles) : Etat de l'eau dans le sol (Cours Climat Plante).
- Saurer, M., Borella, S., Schweingruber, F. and Siegwolf, R., 1997. Stable carbon isotopes in tree rings of beech: climatic versus site-related influences. *Trees*, 11(5): 291-297.
- Saxe, H., Cannell, M.G.R., Johnsen, Ø., Ryan, M.G. and Vourlitis, G., 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 149(3): 369-399.
- Schaber, J. and Badeck, F.-W., 2003. Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. *Int J Biometeorol*, 47(4): 193-201.

Références bibliographiques

- Schar, C. et al., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427(6972): 332-336.
- Schipka, F., Heimann, J. and Leuschner, C., 2005. Regional variation in canopy transpiration of Central European beech forests. *Oecologia*, 143(2): 260-270.
- Schuepp, P.H., Leclerc, M.Y., MacPherson, J.I. and Desjardins, R.L., 1990. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorology*, 50(1-4): 355-373.
- Schume, H., Jost, G. and Katzensteiner, K., 2003. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)–European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand. *Geoderma*, 112(3–4): 273-287.
- Schwartz, M.D., Ahas, R. and Aasa, A., 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 12(2): 343-351.
- Schwärzel, K. et al., 2009. Soil water content measurements deliver reliable estimates of water fluxes: A comparative study in a beech and a spruce stand in the Tharandt forest (Saxony, Germany). *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11): 1994-2006.
- Schweingruber, F., Aellen-Rumo, K., Weber, U. and Wehrli, U., 1990. Rhythmic growth fluctuations in forest trees of Central Europe and the Front Range in Colorado. *Trees*, 4(2): 99-106.
- Seneviratne, S.I. et al., 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4): 125-161.
- Sergent, A.-S. and Bréda, N., 2013. Récent dépérissement du douglas : des sécheresses extrêmes et récurrentes en cause. *Forêt-entreprise*, 208: 19-23.
- Sevanto, S., Mikkelsen, T.N., Pilegaard, K. and Vesala, T., 2003. Comparison of tree stem diameter variations in beech (*Fagus sylvatica* L.) in Sorø Denmark and in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Hyttälä, Finland. *Boreal environment research*, 8: 457-464.
- Sevanto, S., Vesala, T., Perämäki, M. and Nikinmaa, E., 2002. Time lags for xylem and stem diameter variations in a Scots pine tree. *Plant, Cell & Environment*, 25(8): 1071-1077.
- Simonin, K.A., Santiago, L.S. and Dawson, T.E., 2009. Fog interception by *Sequoia sempervirens* (D. Don) crowns decouples physiology from soil water deficit. *Plant, Cell & Environment*, 32(7): 882-892.
- Siqueira, M., Katul, G. and Porporato, A., 2009. Soil Moisture Feedbacks on Convection Triggers: The Role of Soil–Plant Hydrodynamics. *Journal of Hydrometeorology*, 10(1): 96-112.
- Skomarkova, M.V. et al., 2006. Inter-annual and seasonal variability of radial growth, wood density and carbon isotope ratios in tree rings of beech (*Fagus sylvatica*) growing in Germany and Italy. *Trees*, 20(5): 571-586.
- Smith, F.W., Sampson, D.A. and Long, J.N., 1991. Notes: Comparison of Leaf Area Index Estimates from Tree Allometrics and Measured Light Interception. *Forest Science*, 37(6): 1682-1688.
- Snyder, K.A., Richards, J.H. and Donovan, L.A., 2003. Night-time conductance in C₃ and C₄ species: do plants lose water at night? *Journal of Experimental Botany*, 54(383): 861-865.

- Staelens, J., De Schrijver, A., Van Avermaet, P., Genouw, G. and Verhoest, N., 2005. A comparison of bulk and wet-only deposition at two adjacent sites in Melle (Belgium). *Atmospheric Environment*, 39(1): 7-15.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K. and Verhoest, N.E.C., 2008. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 22(1): 33-45.
- Steppe, K. et al., 2004. Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. *Journal of Structural Biology*, 148(1): 11-21.
- Steppe, K., De Pauw, D.J.W., Doody, T.M. and Teskey, R.O., 2010. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7-8): 1046-1056.
- Swanson, R.H. and Whitfield, D.W.A., 1981. A Numerical Analysis of Heat Pulse Velocity Theory and Practice. *Journal of Experimental Botany*, 32(1): 221-239.
- Taneda, H. and Sperry, J.S., 2008. A case-study of water transport in co-occurring ring-versus diffuse-porous trees: contrasts in water-status, conducting capacity, cavitation and vessel refilling. *Tree Physiology*, 28(11): 1641-1651.
- Tang, C., 1996. Interception and recharge processes beneath a *Pinus elliotii* forest. *Hydrological Processes*, 10(11): 1427-1434.
- Tardieu, F., 1993. Will Increases in Our Understanding of Soil-Root Relations and Root Signalling Substantially Alter Water Flux Models? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 341(1295): 57-66.
- Tardieu, F. and Davies, W.J., 1992. Stomatal Response to Abscissic Acid Is a Function of Current Plant Water Status. *Plant Physiology*, 98(2): 540-545.
- Tardieu, F. and Simonneau, T., 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany*, 49(Special Issue): 419-432.
- Thomé, O., 1885. *Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz*, Gera, Germany.
- Tiktak, A. and Bouten, W., 1994. Soil water dynamics and long-term water balances of a Douglas fir stand in the Netherlands. *Journal of Hydrology*, 156(1-4): 265-283.
- Topp, G.C. and Davis, J.L., 1982. Measurement of soil water content using time domain reflectometry., pp. 269-287.
- Tourné, R. and Boistard, S., 1998. Comparison of two sap flow methods for the estimation of tree transpiration. *Ann. For. Sci.*, 55(6): 707-713.
- Tuzet, A., Perrier, A. and Leuning, R., 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell & Environment*, 26(7): 1097-1116.
- Tyree, M. and Yang, S., 1990. Water-storage capacity of *Thuja*, *Tsuga* and *Acer* stems measured by dehydration isotherms. *Planta*, 182(3): 420-426.
- Tyree, M.T., Cochard, H., Cruiziat, P., Sinclair, B. and Ameglio, T., 1993. Drought-induced leaf shedding in walnut: Evidence for vulnerability segmentation. *Plant Cell Environ.*, 16: 879-882.

Références bibliographiques

- Tyree, M.T. and Sperry, J.S., 1988. Do Woody Plants Operate Near the Point of Catastrophic Xylem Dysfunction Caused by Dynamic Water Stress?: Answers from a Model. *Plant Physiology*, 88(3): 574-580.
- Tyree, M.T. and Sperry, J.S., 1989. Vulnerability of Xylem to Cavitation and Embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40(1): 19-36.
- Ueda, M. and Shibata, E.i., 2001. Diurnal changes in branch diameter as indicator of water status of Hinoki cypress *Chamaecyparis obtusa*. *Trees*, 15(6): 315-318.
- Unsworth, M. et al., 2004. Components and Controls of Water Flux in an Old-growth Douglas-fir–Western Hemlock Ecosystem. *Ecosystems*, 7(5): 468-481.
- van den Honert, T.H., 1948. Water transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, 3(0): 146-153.
- van der Molen, M.K. et al., 2011. Drought and ecosystem carbon cycling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7): 765-773.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892-898.
- Vandegehuchte, M.W., 2013. Measuring sap flow and stem water content in trees: a critical analysis and development of a new heat pulse method (Sapflow +). PhD thesis, Ghent University, Belgium.
- Vandegehuchte, M.W. and Steppe, K., 2012. Sapflow+: A four-needle heat-pulse sap flow sensor enabling nonempirical sap flux density and water content measurements. *New Phytologist*, 196(1): 306-317.
- Vieweg, G. and Ziegler, H., 1960. Thermoelektrische Registrierung der Geschwindigkeit des Transpirationsstromes. *Ber. dtsh. bot. Ges.*, 73(22): 1-226.
- Vincke, C., Breda, N., Granier, A. and Devillez, F., 2005. Evapotranspiration of a declining *Quercus robur* (L.) stand from 1999 to 2001. I. Trees and forest floor daily transpiration. *Annals of Forest Science*, 62(6): 503-512.
- Wareing, P.F., 1948. PHOTOPERIODISM IN WOODY SPECIES. *Forestry*, 22(2): 211-221.
- Waring, R.H., 1987. Characteristics of trees predisposed to die. *Bioscience*, 37(8): 569-574.
- Waring, R.H. and Running, S.W., 1978. Sapwood water storage: its contribution to transpiration and effect upon water conductance through the stems of old-growth Douglas-fir. *Plant, Cell & Environment*, 1(2): 131-140.
- Warren, C.R., Bleby, T. and Adams, M.A., 2007a. Changes in gas exchange versus leaf solutes as a means to cope with summer drought in *Eucalyptus marginata*. *Oecologia*, 154(1): 1-10.
- Warren, J.M., Meinzer, F.C., Brooks, J.R., Domec, J.-C. and Coulombe, R., 2007b. Hydraulic redistribution of soil water in two old-growth coniferous forests: quantifying patterns and controls. *New Phytologist*, 173(4): 753-765.
- Warren, J.M., Meinzer, F.C., Brooks, J.R. and Domec, J.C., 2005. Vertical stratification of soil water storage and release dynamics in Pacific Northwest coniferous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130(1-2): 39-58.
- Weissen, F. et al., 1991. Le fichier écologique des essences. Volume 2. Ministère de la Région Wallonne, Division de la Nature et des Forêts, Jambes, 190 p.

- Western, A.W., Grayson, R.B. and Blöschl, G., 2002. SCALING OF SOIL MOISTURE: A Hydrologic Perspective. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 30(1): 149-180.
- Whitehead, D., 1998. Regulation of stomatal conductance and transpiration in forest canopies. *Tree Physiology*, 18(8-9): 633-644.
- Wilson, K.B., Hanson, P.J., Mulholland, P.J., Baldocchi, D.D. and Wullschleger, S.D., 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(2): 153-168.
- Wullschleger, S.D., Childs, K.W., King, A.W. and Hanson, P.J., 2011. A model of heat transfer in sapwood and implications for sap flux density measurements using thermal dissipation probes. *Tree Physiology*, 31(6): 669-679.
- Yates, D.J. and Hutley, L.B., 1995. Foliar Uptake of Water by Wet Leaves of *Sloanea woollsii*, an Australian Subtropical Rainforest Tree. *Australian Journal of Botany*, 43(2): 157-167.
- Zimmermann, A. and Zimmermann, B., 2014. Requirements for throughfall monitoring: The roles of temporal scale and canopy complexity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190: 125-139.
- Zimmermann, M.H., 1983. Xylem structure and the ascent of sap. Springer-Verlag.
- Zweifel, R., Item, H. and Häsler, R., 2000. Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young Norway spruce trees. *Trees - Structure and Function*, 15(1): 50-57.
- Zweifel, R., Item, H. and Häsler, R., 2001. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree Physiology*, 21(12-13): 869-877.

Résumé

Les changements climatiques impactant le cycle de l'eau, le bilan hydrique des forêts doit être précisé afin de leur assurer une gestion durable. L'évapotranspiration réelle (ETR) est la composante du bilan intégrant la réponse des arbres dans le cycle de l'eau.

L'ETR d'un peuplement mixte (hêtre et douglas ; Vielsalm, Belgique), a été caractérisée en 2010-2011 à partir de 4 méthodes : i) l'eddy covariance (ET), ii) l'analytique, décomposant l'ETR (transpiration et interception), iii) le bilan hydrique du sol et iv) la modélisation. L'objectif : évaluer **l'évapotranspiration réelle, ses composantes et sa régulation**, en distinguant les contributions des espèces, et incluant la **validation d'ET**, mesurée depuis 1998.

L'effet espèce est faible sur la réserve en eau utile du sol (RU), établie en moyenne pour les hêtres et les douglas à 203 et 221 mm. La variabilité spatiale des teneurs en eau du sol est grande, définissant des limites inférieures de RU de 98 et 133 mm. En 2010-2011, pour des LAI similaires, la transpiration journalière moyenne des hêtres (2.2 mm/j) excède celle des douglas (1.6 mm/j). Les variations interannuelles des flux transpiratoires modélisés sont faibles depuis 1998, comme les indices de stress hydriques.

En journalier, ou en saisonnier, les évaluations de l'ETR en 2010-2011 par les 4 méthodes donnent des résultats concordants et similaires entre sous-peuplements (de l'ordre de 1.5 à 2 mm.j⁻¹). Les hêtres et les douglas se distinguent par la répartition des flux constituant leur ETR. Les flux d'interception mesurés sont plus faibles pour les hêtres (10% contre 23 % pour les douglas). Les mesures d'ET en 2010-2011 sont validées. Sur la période 1998-2008, une sous-estimation d'ET les jours pluvieux (de 83 à 22 % pour $1 \leq ET \leq 4$ mm) est mise en évidence.