

Faculté des bioingénieurs

Évaluation de la sensibilité des ressources en eau du bassin versant de l'Amblève et de l'Ourthe aux changements climatiques

Auteur·es : Pauline Vermeiren
Promoteur·rices : Pr. Mathieu Javaux
Dr. Alice Alonso,
Lecteur·rices : Pr. Marnik Vanclooster,
Dr. Daniel Caviedes Voullième
Année académique 2022-2023
Bioingénieur : Sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Je tiens sincèrement à remercier toutes les personnes qui ont pu contribuer à l'élaboration de ce mémoire. Tout d'abord, je remercie mes promoteurs le Professeur Mathieu Javaux et Alice Alonso pour leur suivi constant tout au long de l'année, leurs précieux conseils ainsi que pour la relecture de mon mémoire avant sa remise. Ceci a réellement permis de me faire progresser à tous les niveaux. Je les remercie également pour la confiance qu'ils m'ont accordée pour la réalisation de ce projet. Merci aussi au Professeur Marnik Vanclooster et à Daniel Caviedes Voullieme pour avoir accepté d'être mes lecteurs.

Ensuite, je souhaiterais remercier Yassir Abouaimad pour son aide quant à sa transmission de connaissance liée à l'hydrologie ainsi qu'aux outils numériques tels que QGIS permettant de construire ma zone d'étude. Merci aussi à Elise Verstraeten pour ses conseils en matière de codage et pour la manipulation des données de l'Institut Météorologique de Belgique.

Merci à Mokrane Kadir pour m'avoir transmis ses connaissances concernant le logiciel sur les indicateurs d'altération hydrologique, ce qui m'a permis de traiter les données de débits.

Concernant les aspects de géomatique, merci à Baptiste Delhey.

Je voudrais également remercier Maxime Thomas et l'équipe enseignante qui m'ont conseillée pour la rédaction du mémoire.

Un grand merci également au "JÜLICH supercomputing centre" qui m'a permis de traiter mes données sur leur supercomputer.

Enfin, un immense merci à ma famille, mes amis et mes proches pour leur soutien psychologique, leur relecture et leurs nombreux conseils tout au long de ce travail qui fut un véritable défi à relever.

Table des matières

1	Introduction générale	1
2	État de l'art	3
2.1	Changements climatiques et hydrologiques dans le monde	3
2.2	Changements climatiques et hydrologiques en Belgique	8
2.2.1	Hydrologie en Belgique	8
2.2.2	Changements climatiques	13
2.2.3	Lien entre changement climatique et hydrologie	19
3	Objectifs	23
4	Matériel et méthodes	24
4.1	Les bassins versants d'étude de l'Ourthe et de l'Amblève	24
4.2	Bilan hydrologique	29
4.3	Construction de la base de données	30
4.3.1	Précipitations	30
4.3.2	Evapotranspiration	32
4.3.3	Débit	33
4.3.4	Niveau des nappes phréatiques	34
4.4	Traitement des données	36
4.4.1	Bilan hydrologique	36
4.4.2	Analyse des tendances sur les variables hydrologiques	37
5	Résultats	40
5.1	Bilan hydrologique annuel	40
5.2	Analyse des tendances des variables hydrologiques	45
5.2.1	Précipitations	45
5.2.2	Evapotranspiration	51
5.2.3	Différence entre précipitations et ETR réelle (P-ETR)	53
5.2.4	Débits	55
5.2.5	Niveau des nappes phréatiques	62
6	Discussion	65
6.1	Évolution des variables hydrologiques sur les 30 dernières années	65
6.1.1	Précipitations et évapotranspiration	65

6.1.2	Différence entre les précipitations et l'évapotranspiration	69
6.1.3	Débits	70
6.1.4	Niveau des nappes	72
6.2	Discussion de la méthodologie	74
6.3	Perspectives	75
7	Conclusion	76
	 Annexes	 85
A	Caractéristiques des RCP	85
B	Les outils du réseau WACONDAH	86
C	Coupe hydrogéologique des différentes unités hydrogéologiques où se trouvent les piézomètres du bassin d'étude	87
D	Lithologie et porosité effective et totale correspondantes	90
E	Analyse exploratoire des données	91
F	Tendances non significatives	97

Table des figures

2.1	Trajectoires des scénarios RCP 2.6 en vert, RCP 4.5 en rouge, RCP 6.0 en bleu, RCP 8.5 en brun (Moss et al., 2008).	4
2.2	Augmentation de la température moyenne au niveau global entre la période 1850-1900 et la période 2081-2100. Les barres pleines représentent les données pour l'AR6 et les barres en pointillés font référence au AR5. (GIEC, 2021).	5
2.3	Évolution de la température moyenne en degrés Celsius par rapport à la période 1850-1900 (GIEC, 2021).	6
2.4	Tendance du VDP au niveau de la période 1901-2017. Cette variable a été déterminée sur base du VPD calculé à partir de la température de l'air et de la pression de vapeur de la version TS 3.26 de la Climate Research Unit (CRU) (Harris et al., 2014) (Grossiord et al., 2020).	6
2.5	Évolution des précipitations moyennes annuelles en pourcentage par rapport à la période 1850-1900 (GIEC, 2021).	7
2.6	Représentation des quatre districts internationaux dans lesquels la Belgique s'inscrit c'est-à-dire la Meuse, l'Escaut, le Rhin ainsi que la Seine.	9
2.7	Proportion des districts internationaux de la Meuse, Escaut, Rhin et Seine en Wallonie constituant les bassins fluviaux (Service public de Wallonie, 2021).	9
2.8	Les 15 bassins versants du plan de gestion de la Wallonie inscrits dans les quatre bassins versants fluviaux : la Meuse, l'Escaut, le Rhin et la Seine.	10
2.9	Bilan hydrique de la Wallonie réalisé en 2008 (millions de m ³)	12
2.10	Prises d'eau principales en Wallonie avec les prises d'eau en surface en bleu et souterraines en bleu foncé si l'eau est destinée à la distribution publique et mauve si elle concerne les industries extractives ou autres industries. Le fond de la carte représente les principaux types de formations aquifères (SPW, 2021).	13
2.11	Écarts de température annuelle à la température moyenne de 1961 à 1990 sur la période 1833-2019 calculés à partir des données de mesures de 8 stations historiques (Ostende, Jalhay, Saint-Trond, Uccle, Anvers, Leopoldsburg, Gembloux et Stavelot). La ligne orange représente la courbe de tendance (IRM, 2020).	13
2.12	Changement de la température exprimé comme : l'écart de la température moyenne annuelle par rapport à la température moyenne au cours de la période de référence 1850-1899, et la moyenne décennale progressive sur 10 ans ("progressive ten-year average") de l'écart par rapport à la même période de référence, à l'échelle du monde, de l'Europe et de la Belgique (Brouwers et al., 2015).	14

2.13	Écarts en % des précipitations cumulées chaque année de 1880 à 2019 par rapport à la moyenne des précipitations de la période de référence (1961-1990) pour la Belgique, calculées à partir des données de mesures de 8 stations historiques (Ostende, Jalhay, Saint-Trond, Uccle, Anvers, Leopoldsburg, Gembloux et Stavelot). La ligne rouge représente la courbe de tendance (IRM, 2020).	17
2.14	Carte de Wallonie reprenant les tendances dans l'amplitude des débits maximum annuels (Degré and Grandry, 2021)	21
4.1	Bassin versant de l'Amblève et de l'Ourthe. Les cours d'eau principaux, les plans d'eau principaux en rouge ainsi que le point culminant située à la " Baraque Fraiture" ont été ajoutés.	25
4.2	Topographie de la Wallonie avec mise en évidence des bassins versant de l'Ourthe et de l'Amblève	25
4.3	Occupation du sol au sein des bassins versants de l'Amblève et de l'Ourthe	27
4.4	Formations aquifères au sein de la Wallonie avec mise en évidence du BV de l'Ourthe et de l'Amblève en rouge. Les code des masses d'eau souterraines présentes dans les deux BV sont indiquées sur la carte.	27
4.5	Bassin versant de l'Ourthe redéfini à Tabreux représenté par la station limnimétrique 6621 et le Bassin versant de l'Amblève redéfini à Tabreux représenté par la station limnimétrique 5921.	28
4.6	Polygones de Thiessen dessinés en beige à l'aide du logiciel QGIS permettant de pondérer les données de chaque centroïde de l'IRM (points bleus) sur la surface du bassin. L'exemple est donné ici pour le BV de l'Ourthe à Tabreux (en rouge).	31
4.7	Niveau piézométrique au sein d'une nappe libre, captive avec un puits non artésien et captive avec un puits artésien (Service public de Wallonie, sdb)	34
4.8	Stations piézométriques en noir présentes au sein des BV de l'Ourthe à Tabbreux (en gris) et de l'Amblève (en bleu)	35
5.1	Comparaison des différentes composantes du bilan hydrologique du BV d'étude de l'Amblève à Martinrive. La courbe bleue représente les précipitations annuelles (P) au sein du BV, la courbe mauve concerne le débit intégré (Q) avec la bande représentant son erreur absolue qui est de 10%. L'ETR annuelle (ETR) est représentée en vert foncé avec aussi son incertitude qui est de 24%. L'intégration du stock d'eau est représenté par la courbe en vert clair.	40

5.2	Bilan hydrologique pour le bassin d'étude de l'Amblève avec le membre de gauche de l'équation 4.1 qui est représenté par la courbe bleue P-ETR qui ne sont autre que la différence entre les précipitations annuelles (P) et l'évapotranspiration réelle annuelle (ETR). L'erreur absolue sur l'ETR de 24% a été prise en compte dans P-ETR et est représenté par la bande bleue claire. Le débit intégré (Q) chaque année est représentée par la courbe mauve et son erreur absolue de 10% par la bande mauve. Les points rouges représentent le membre de droite de l'équation 4.1 qui reprend la somme du débit intégré sur la zone d'étude et l'intégration du stock d'eau ($Q + \phi d\text{Stock}$). Les données de la variation du stock d'eau n'étant pas disponibles pour toute la période étudiée, il a été choisi de distinguer cette addition du débit intégré seul.	41
5.3	Comparaison des différents produit d'ETR issues de MODIS (en bleu), GLDAS (en vert) et ERA5 (en jaune) pour voir lequel estime le plus correctement l'ETR au niveau du BV de l'Amblève à Martinrive. La courbe mauve représente le débit intégré sur le BV et la rouge la somme du débit intégré sur le BV et l'intégration du stock d'eau de la nappe sur le BV.	41
5.4	Écart calculé en prenant la différence entre P-ETR et le débit intégré mis en fonction des précipitations (en bleu), ETR (en vert) et des débits en mauve. Une droite de régression est associée à chaque jeu de données et permet de tester la significativité (BV étude Amblève à Martinrive)	42
5.5	Bilan hydrologique pour le bassin d'étude de l'Ourthe avec le membre de gauche de l'équation 4.1 qui est représenté par la différence entre les précipitations annuelles (P) et l'évapotranspiration réelle annuelle (ETR), la courbe bleue. L'erreur absolue sur l'ETR de 24% a été prise en compte dans P-ETR et est représenté par la bande bleue claire. Le débit intégré (Q) chaque année est représenté par la courbe mauve et son erreur absolue de 10% par la bande mauve. Les points rouges représentent le membre de droite de l'équation 4.1 qui reprend la somme du débit intégré sur la zone d'étude et l'intégration du stock d'eau ($Q + \phi d\text{Stock}$). Les données de la variation du stock d'eau n'étant pas disponibles pour toute la période étudiée, il a été choisi de distinguer cette addition du débit intégré seul.	43
5.6	Comparaison des différentes composantes du bilan hydrologique du bassin d'étude de l'Ourthe. La courbe bleue représente les précipitations annuelles (P) au sein du BV, la courbe mauve concerne le débit intégré (Q) avec la bande représentant son erreur absolue qui est de 10%. L'ETR annuelle est représentée en vert foncé avec aussi son incertitude qui est de 24%. L'intégration du stock d'eau est représentée par la courbe en vert clair ($Q + \phi d\text{Stock}$).	43
5.7	Écart calculé en prenant la différence entre P-ETR et le débit intégré mis en fonction des précipitations(en bleu), ETR (en vert) et des débits (en mauve). Une droite de régression est associée à chaque jeu de données et permet de tester la significativité de la pente (BV étude Ourthe à Tabreux).	44
5.8	Précipitations cumulées chaque année sur la période 1991-2022 au sein du BV d'étude de l'Amblève à Martinrive avec une droite de régression linéaire [mm/an]	45

5.9	Précipitations cumulées chaque année sur la période 1991-2022 sur le BV de l'Amblève à Martinrive avec la moyenne des précipitations cumulées sur la période considérée représentée par la droite rouge [mm/an].	45
5.10	Différence entre les précipitations cumulées chaque année et la normale pluviométrique calculée pour la période 1991-2022. Les précipitations sont en rouge lorsque cette différence est positive et en bleu lorsque celle-ci est négative [mm/an]. Les bâtonnets rouges représentent les précipitations qui sont supérieures à la normale pluviométrique et les bâtonnets bleus représentent les précipitations qui sont sous la normale pluviométrique.	46
5.11	Précipitations cumulées sur 6 mois avec en rouge la période du premier avril au 30 septembre et en bleu la période du premier octobre au 31 mars. Le temps représente des années hydrologiques commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 1992 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.	46
5.12	Nombre de jours par semestre où la lame d'eau précipitée est supérieure à 20 mm dans le BV de l'Amblève à Martinrive. La série rouge représente le semestre du 1 avril au 30 septembre et la série bleue du 1 octobre au 31 mars. Le temps représente des années hydrologiques commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 1992 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.	47
5.13	Nombre de jours secs par semestre, c'est-à-dire le nombre de jours sans précipitations significatives (lame d'eau précipitée inférieure à 1 mm). La série rouge représente le semestre du 1 avril au 30 septembre et la série bleue du 1 octobre au 31 mars. Le temps représente des années hydrologiques commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 1992 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992. Les équations en rouge sont celles des droites de régression linéaire des semestres d'avril à septembre dont les pentes sont significatives.	48
5.14	Nombre de jours secs par saison, c'est-à-dire le nombre de jours sans précipitations significatives (lame d'eau précipitée inférieure à 1 mm). Une série est en jaune pour la saison de l'été, en vert pour le printemps, en bleu pour l'hiver et en rouge pour l'automne. Une droite de régression linéaire de la même couleur que chaque saison est tracée pour chaque série de données et l'équation de la droite est ajoutée lorsque les pentes sont significatives. Le temps représente des années hydrologiques commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 1992 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.	48
5.15	Evapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR) annuelle, issues du produit MODIS, en orange et vert respectivement. Evapotranspiration de référence (ET0) annuelle, issue de l'IRM, en bleu. Des droites de régression linéaire sont tracées pour chaque variable.	51
5.16	Relation entre l'ETP et l'ET0 dont la pente de la droite représente le coefficient cultural (K_c)	51

5.17	ETR cumulée saisonnale en jaune pour la saison de l'été, en vert pour le printemps, en bleu pour l'hiver et en rouge pour l'automne. Une droite de régression linéaire de la même couleur que chaque saison est ajoutée pour chaque série de données. La période de traitement s'étend du premier octobre 2001 au 30 septembre 2022 sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux. L'année a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 2002 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002.	52
5.18	Percentile 95 de l'ETR calculé en été. Une droite de régression linéaire est ajoutée pour tester la significativité de la pente. La période de traitement s'étend du premier octobre 2001 au 30 septembre 2022 sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux. L'année hydrologique a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 2002 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002.	52
5.19	Eau utile représentée par la différence entre les précipitations et l'ETR cumulées chaque année (P-ETR) pour la période 2001-2022 sur le BV de l'Amblève [mm/an]. Une droite de régression linéaire en bleu est ajoutée pour tester la significativité de la pente.	53
5.20	Les cumuls de P-ETR entre le premier octobre et le 31 mars sont distingués en termes de précipitations et d'ETR. Les barres en bleu clair représentent les précipitations cumulées sur le semestre. L'ETR cumulée sur le semestre est indiquée en vert, et les barres bleu ciel représentent la différence entre les barres bleu clair et les barres vertes.	54
5.21	Percentile 95 (p95) de P-ETR calculée par année hydrologique. Une droite de régression linéaire est ajoutée pour tester la significativité de la pente. La période de traitement s'étend du premier octobre 2001 au 30 septembre 2022. L'année a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 2002 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002.	54
5.22	P-ETR cumulée entre le premier octobre et 31 mars avec distinction des précipitations et ETR. Les bâtonnets en bleu clair représentent les précipitations cumulées sur le semestre. L'ETR cumulée sur le semestre est représentée en vert et les bâtonnets bleus ciel sont la différence entre les bâtonnets bleus clair et verts. . . .	55
5.23	Débit à l'exutoire du BV d'étude de l'Amblève et de l'Ourthe, intégré sur la zone d'étude d'une superficie de 1066,29 km ² et de 1615,57km ² respectivement. Cette intégration est réalisée chaque année sur la période 1991-2022. La droite en mauve est une droite de régression linéaire dont la significativité de la pente a été testée.	56
5.24	Différence entre le débit intégré sur le BV versant d'étude de l'Amblève à Martinrive chaque année et le module avec le bâtonnet de couleur rouge lorsque cette différence est positive et bleu lorsque celle-ci est négative [mm/an].	56
5.25	Courbes des débits classés de chacune des années hydrologiques avec mise en évidence de la fréquence au dépassement à partir de 95%. Le temps est représenté par des années hydrologiques. Par exemple 2020 est l'année qui commence en octobre 2020 et qui se finit le 30 septembre 2021.	57

5.26	"Environmental Flow Component" (EFC) permettant de distinguer les débits extrêmement faibles en rouge, les petits débits en vert foncé, les impulsions de débits élevés en mauve, les petites et larges inondations en vert clair et orange respectivement, de l'Amblève au niveau de la station à l'exutoire du bassin d'étude pour la période 1991-2022 avec droite de régression linéaire.	58
5.27	"Environmental Flow Component" (EFC) permettant la distinction entre les débits extrêmement faibles en rouge, petits débits en vert foncé, impulsions de débits élevés en mauve, petite et large inondation en vert clair et orange respectivement, de l'Ourthe au niveau de la station à l'exutoire du bassin d'étude pour la période 1991-2022 avec droite de régression linéaire.	58
5.28	"Extreme low peak", c'est-à-dire les débits minimums considérés dans la catégorie d'extrêmement faibles de l'Amblève au niveau de la station à l'exutoire du BV pour la période 1991-2022. Une droite de régression linéaire est associée à ces données.	59
5.29	« Low pulse count » de l'Amblève au niveau de la station à l'exutoire du bassin d'étude pour la période 1991-2022 avec droite de régression linéaire.	59
5.30	Débits faibles du mois d'avril au niveau de la station 6621 en amont de l'exutoire à Martinrive du bassin d'étude de l'Amblève pour la période 1991-2022. L'année hydrologique 1992 par exemple représente la période du premier octobre 1991 au 30 septembre 2022. Une droite de régression linéaire est associée à ces données. .	60
5.31	Débits faibles du mois de février au niveau de la station 5921 en amont de l'exutoire à Tabreux du bassin d'étude de l'Ourthe pour la période 1991-2022. L'année hydrologique 1992 par exemple représente la période du premier octobre 1991 au 30 septembre 2022. Une droite de régression linéaire est associée à ces données. .	60
5.32	Moyenne annuelle (1 octobre -30 septembre) de la côte piézométrique en fonction du temps des différentes stations piézométriques situées au sein du BV d'étude de Amblève dont l'exutoire a été défini à Martinrive. Ce bassin d'étude a été représenté avec les piézomètres qui le constituent à la figure 5.32d (1991-2022). Une droite de régression linéaire est tracée pour chacune des séries où un test sur la pente a été réalisé.	62
5.33	Moyenne annuelle (1 octobre -30 septembre) de la côte piézométrique en fonction du temps des différentes stations piézométriques situées au sein du BV d'étude de Ourthe dont l'exutoire a été défini à Tabreux. Ce bassin d'étude a été représenté avec les piézomètres qui le constituent à la figure 5.33g (1991-2022).	63
6.1	Changements enregistrés dans les précipitations annuelles normalisées (% par décennie) au cours de la période allant de 1951 à 2019, en utilisant des analyses de tendances linéaires. Les stations où les tendances sont significatives à un niveau de confiance de 95 % sont repérées par un point noir (IRM, 2020).	66

6.2	Changements enregistrés dans les précipitations saisonnières normalisées (% par décennie) au cours de la période allant de 1951 à 2019, en utilisant des analyses de tendances linéaires. (a) hiver, (b) printemps, (c) été et (d) automne. Les stations où les tendances des données présentent une signification statistique à un niveau de confiance de 95 % sont repérées par un point noir (IRM, 2020).	67
6.3	Carte représentant la topographie de la Wallonie où sont reprises les stations de l'étude HydroTrend ainsi que les tendances obtenues pour les débits maximum annuels (Grandry et al., 2018).	72
6.4	Carte représentant l'agglomération de la commune de Durbuy avec les captages et les stations piézométriques présentes sur le territoire (PZ828, PZ1328, PZ4044, PZ34384, PZ4046 (IDELUX, 2022)).	73
C.1	Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 49 5-6	87
C.2	Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 55 1-2	87
C.3	Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 60 3-4	88
C.4	Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 49 7 -8	88
C.5	Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 49 1-2	88
C.6	Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 56 1-2	89
C.7	Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 49 7-8	89
E.1	Série temporelle et histogramme des précipitations journalières sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive [mm/jour]	91
E.2	Cycle saisonnier des précipitations cumulées par mois sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive pour la période 1991-2022.	91
E.3	Série temporelle et histogramme des précipitations journalières sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux [mm/jour]	92
E.4	Cycle saisonnier des précipitations cumulées par mois sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux pour la période 1991-2022.	92
E.5	Série temporelle et histogramme de l'ET0 journalières sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive [mm/jour]	92
E.6	Série temporelle et histogramme de l'ETP journalières sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive [mm/jour]. Les données cumulées sur 8 jours ont été divisées par 8 obtenir des données journalières.	92
E.7	Série temporelle et histogramme de l'ETR journalières sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive [mm/jour]. Les données cumulées sur 8 jours ont été divisées par 8 obtenir des données journalières.	93
E.8	Cycle saisonnier de l'ET0, l'ETP et l'ETR cumulées par mois sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive pour la période 2001-2022.	93
E.9	Série temporelle et histogramme de l'ET0 journalières sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux [mm/jour]	93
E.10	Série temporelle et histogramme de l'ETP journalières sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux [mm/jour]. Les données cumulées sur 8 jours ont été divisées par 8 obtenir des données journalières.	93

E.11	Série temporelle et histogramme de l'ETR journalières sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux [mm/jour]. Les données cumulées sur 8 jours ont été divisées par 8 obtenir des données journalières.	93
E.12	Cycle saisonnier de l'ET0, l'ETP et l'ETR cumulées par mois sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux pour la période 2001-2022.	94
E.13	Série temporelle et histogramme du débit mesuré à la station 6621 à Martinrive [mm/jour]	94
E.14	Cycle saisonnier des débits par mois mesuré à la station 6621 à Martinrive pour la période 1991-2022.	94
E.15	Série temporelle et histogramme du débit mesuré à la station 5921 à Tabreux [mm/jour]	94
E.16	Cycle saisonnier des débits par mois mesuré à la station 5921 à Tabreux pour la période 1991-2022.	95
E.17	Côte piézométrie des nappes mesurées à l'aide des stations piézométriques PZ2016, PZ7067 et PZ7172 présentes au sein du bassin d'étude de l'Amblève.	95
E.18	Côte piézométrie des nappes mesurées à l'aide des stations piézométriques PZ7066, PZ1328 et PZ828, PZ34044, PZ34284 et PZ34046 présentes au sein du BV d'étude de l'Ourthe à Tabreux.	95
E.19	Variation du stock de la nappe en prenant la différence entre tous les premiers octobre de chaque année pour les stations piézométriques au sein du bassin versant d'étude de l'Amblève à Martinrive.	96
E.20	Variation du stock de la nappe en prenant la différence entre tous les premiers octobre de chaque année pour les stations piézométriques au sein du bassin versant d'étude de l'Ourthe à Tabreux.	96
F.1	Précipitations cumulées chaque année sur la période 1991-2022 sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux avec une droite de régression linéaire [mm/an]	97
F.2	Précipitations cumulées pour chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive. L'année a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 1992 sur le graphique traduit l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.	97
F.3	Précipitations cumulées pour chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux. L'année a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 1992 sur le graphique traduit l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.	98
F.4	ETR cumulée pour sur deux semestres (octobre-mars et avril-septembre) avec leur droite de régression linéaire respective pour la période octobre 2001-septembre 2022 sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive. L'année 1992 sur le graphique traduit l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.	98

F.5	ETR cumulée pour sur deux semestres (octobre-mars et avril-septembre) avec leur droite de régression linéaire respective pour la période octobre 2001-septembre 2022 sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux. L'année 1992 sur le graphique traduit l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.	98
F.6	ETR cumulées pour les quatre saisons avec leur droite de régression linéaire respective pour la période octobre 2001-septembre 2022 sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.	99
F.7	P-ETR cumulée sur la période du premier octobre au 31 mars et du premier avril au 30 septembre sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive (2001-2022) . .	99
F.8	P-ETR cumulées pour chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive. L'année 2002 sur le graphique traduit l'année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002. .	99
F.9	P-ETR cumulées pour chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux. L'année 2002 sur le graphique traduit l'année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002. . . .	99
F.10	P-ETR cumulée pour la saison de l'été avec la distinction entre les précipitations et l'ETR cumulées sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.	100
F.11	P-ETR cumulée pour la saison de l'hiver avec la distinction entre les précipitations et l'ETR cumulées sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.	100
F.12	P-ETR cumulée pour la saison de le printemps avec la distinction entre les précipitations et l'ETR cumulées sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.	100
F.13	P-ETR cumulée pour la saison de l'automne avec la distinction entre les précipitations et l'ETR cumulées sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive. . . .	100
F.14	Percentiles 2,7 / 50 et 97 annuels du débit à l'exutoire du bassin versant d'étude de l'Amblève sur une période de 30 ans	101
F.15	Percentiles 2,7 / 50 et 97 annuels du débit à l'exutoire du bassin versant d'étude de l'Ourthe sur une période de 30 ans	101
F.16	Débit intégré sur la période du premier octobre au 31 mars et du premier avril au 30 septembre sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive	101
F.17	Débit intégré sur la période du premier octobre au 31 mars et du premier avril au 30 septembre sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux.	102
F.18	Débit intégré sur chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.	102
F.19	Débit intégré sur chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux.	102

Liste des tableaux

2.1	Prédictions pour la Belgique des moyennes de températures mensuelles sur 100 ans selon les simulations de CMIP5 suivant les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 dans le cadre du projet CORDEX (Termonia et al., 2018).	15
2.2	Prédictions des moyennes de précipitations mensuelles et nombre de jours humides sur 100 ans en Belgique selon les simulations de CMIP5 suivant les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 dans le cadre du projet CORDEX (Termonia et al., 2018)	18
4.1	Tableau de synthèse reprenant les différentes sources de données avec leur résolution spatiale, temporelle ainsi que leur étendue et leur unité.	30
4.2	Stations piézométriques du bassin d'étude avec leur unité hydrogéologique correspondante	36
4.3	Durée des saisons considérées	37
4.4	Définition des cinq composantes de débits utilisés dans l'algorithme du logiciel IAH pour calculer les EFC sur la période du premier octobre 1991 jusqu'au 30 septembre 2022	39
5.1	Résultats statistiques des variables liées à la pluie. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu'il n'y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert. Lorsque la période n'est pas précisée c'est que cela se réfère à la période d'étude : 1991-2022	50
5.2	Résultats statistiques des variables liées à l'évapotranspiration. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu'il n'y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert. L'ET0 a été testée sur la période 1991-2022 et l'ETP et ETR sur la période 2001-2022 étant donné que les données n'étaient pas disponibles avant.	53

5.3	Résultats statistiques des variables liées à l'eau utile. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu'il n'y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert. Comme les données d'ETR ne sont disponibles qu'à partir de 2001, la période testée est 2001-2022.	55
5.4	Résultats statistiques des variables liées aux débits de la station 6621 à Martinrive et 5921 à Tabreux. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu'il n'y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert.	61
5.5	Résultats statistiques des variables liées aux profondeurs des nappes mesurées à l'aide des piézomètres situés au sein des BV de l'Amblève à Martinrive et de l'Ourthe à Tabreux. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu'il n'y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert.	64
A.1	Caractéristiques principales des différents scénarios RCP	85
D.1	Lithologie (SPW, 2010b)	90

Liste des acronymes

BV Bassin Versant

CMIP Coupled Model Intercomparison Project

CORDEX COordinated Regional Climate Downscaling Experiment

DCENN Direction des Cours d'Eau Non navigables

DESO Direction des Eaux Souterraines

DGH Direction de la Gestion Hydrologique

EFC Environmental Flow Component

ET0 Evapotranspiration de référence

ETP Evapotranspiration potentielle

ETR Evapotranspiration réelle

GES Gaz à Effet de Serre

IAH Indicateur d'Altération Hydrologique

IRM Institut Royal Météorologique de Belgique

MAR Modèle Atmosphérique Régional

MCG Modèle de Circulation Globale

MCR Modèle de Circulation Régionall

MNT Modèle Numérique de Terrain

MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

RCP Representative Concentration Pathways

SPW Service Publique de Wallonie

SSP Shared Socio-economic Pathways

WACONDAH WAter CONtrol DAta system for Hydrology and water management

Chapitre 1

Introduction générale

Depuis la fin du 19ème siècle, la température de la surface terrestre augmente à cause de l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère causée par l'impact des activités humaines (GIEC, 2021). Ces changements climatiques génèrent aussi une multiplication de la fréquence des événements extrêmes telles que les épisodes de sécheresse ou les inondations dans le monde.

La Belgique aussi est vulnérable face à ces événements extrêmes comme les stress thermiques urbains, les sécheresses ainsi que les fortes précipitations engendrant des inondations (Marbaix and van Ypersele, 2004). Cela s'est observé récemment avec les sécheresses de 2022 (Faranda et al., 2023).

Cette vulnérabilité s'explique notamment par le fait que la densité de population de la Belgique est importante avec une population de plus de 11 millions d'habitants (Service Public Fédéral Belge, 2022b) pour une superficie de $30\,688\text{ km}^2$ (Service Public Fédéral Belge, 2023). De plus, le pays est sensible à l'élévation du niveau des mers car situé en partie à la côté avec près de 15% de la superficie de la Flandre (comprenant la zone côtière et les polders de l'Escaut) qui se trouve à une altitude inférieure à cinq mètres au-dessus du niveau moyen de la mer (Brouwers et al., 2015). Aussi, la Belgique est fortement urbanisée et industrialisée (Marbaix and van Ypersele, 2004).

Au niveau de la Wallonie, ces changements climatiques ont un impact sur le cycle de l'eau notamment au niveau de la recharge des nappes d'eau souterraines qui risque de diminuer. Aussi, au vue des précipitations extrêmes attendues, le risque d'inondations augmentera dans cette région. Enfin, concernant plus particulièrement la consommation d'eau, elle pourrait aussi être impactée. En effet, si la répartition des précipitations est moins régulière tout au long de l'année avec une hausse en hiver et une baisse en été, il est primordial de rester attentif au souci d'éventuelles pénuries d'eau saisonnières (SPW - DEE - Direction des Eaux souterraines, 2023).

La Région wallonne est la source d'eau principale pour la Belgique. Elle lui fournit la plupart des besoins en eau potable, c'est-à-dire, l'entièreté des besoins de la Wallonie, un cinquième des besoins de la Flandre et la majorité de ceux de la Région de Bruxelles-Capitale (AQUAWAL, AQUAWAL). Pour donner des chiffres, chaque année en Wallonie, une quantité totale d'environ 376,7 millions de m^3 d'eau potable est produite. Parmi cette production, approximativement

141,2 millions de m³ (soit environ 37%) sont acheminés vers les deux autres régions du pays. Il faut souligner que près de 20% de l'eau prélevée ne parvient pas finalement aux consommateurs en raison de pertes survenues pendant le transport, retournant ainsi dans le sol. Les sols wallons sont majoritairement calcaires permettant une meilleure capacité de rétention d'eau que les sols sableux de Flandre (SPW - DEE - Direction des Eaux souterraines, 2023).

Un manque d'eau pourrait avoir des impacts considérables aussi bien au niveau environnemental qu'au niveau socio-économique, politique et géo-politique. Par ailleurs, avec un déficit hydrique, la qualité des eaux peut s'atténuer et mettre en péril la biodiversité de la faune et la flore (van Ypersele Jean-Pascal, 2021).

Il est dès lors primordial de s'intéresser aux ressources en eaux wallonnes pour comprendre leurs dynamiques et l'impact des changements climatiques sur celles-ci. Il est indispensable de comprendre comment les bassins versants vont réagir face aux changements climatiques. Par la suite, ceci permettrait d'améliorer la gestion des ressources en eau en établissant des plans stratégiques visant à atténuer ou à s'adapter aux effets négatifs éventuels tant au niveau environnemental qu'au niveau économique et social.

Ces changements peuvent être analysés de près grâce aux campagnes de mesure du terrain, à l'usage de la télédétection ainsi qu'à la modélisation.

L'objectif de ce mémoire est de faire une évaluation des ressources en eaux de bassins versants de l'Amblève à Martinrive et de Ourthe à Tabreux en répondant à la question : Les variables hydrologiques des bassins versants de l'Amblève à Martinrive et de l'Ourthe à Tabreux ont-elles subi des modifications au cours des 30 dernières années (1991-2022) ? Au cours de la même période, le fonctionnement hydrologique du bassin versant a-t-il été altéré ?

Dans ce travail, à la suite d'une analyse sur les connaissances actuelles concernant les changements climatiques et hydrologiques passés et futurs, dans le monde et en Belgique, une analyse approfondie sera réalisée sur l'état passé des ressources en eau des deux bassins versants d'étude. Cette recherche historique, sur la période 1991-2022, peut être accomplie à l'aide de la mise en place d'une base de données reprenant toutes les variables hydrologiques d'intérêts telles que le débit, les précipitations, l'évapotranspiration réelle, potentielle et de référence ainsi que le niveau des nappes souterraines nécessaires à l'établissement du bilan hydrologique. Différentes sources d'information sont disponibles pour obtenir ces données comme les mesures de terrain provenant d'une multitude de stations de mesure. Les données satellitaires sont aussi sollicitées pour obtenir des informations telles que les données d'évapotranspiration réelle et potentielle par le capteur MODIS.

Une fois les données récoltées, le bilan hydrologique annuel sera construit pour chaque bassin afin de vérifier la fiabilité des données. Ensuite, une analyse des tendances de chacune des variables hydrologiques sera réalisée.

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Changements climatiques et hydrologiques dans le monde

Au cours du 20ème siècle, la température moyenne de la terre s'est élevée de 1,09°C au niveau global entre la période de référence de 1850-1900 et la période 2010-2020 (GIEC, 2021). Au niveau de l'Europe, depuis les années 1980, les températures ont augmenté à un rythme plus de deux fois supérieur à la moyenne mondiale, plaçant ainsi le continent en tête des régions les plus impactées (SPF, 2023).

L'hémisphère Nord a tendance à se réchauffer davantage que l'hémisphère Sud. Par ailleurs, les 29 années les plus chaudes entre 1850 et 2015, à l'échelle mondiale ont été enregistrées à partir de 1980 (Brouwers et al., 2015). Cette croissance est liée à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) rejetés dans l'atmosphère par les activités humaines. Ceux-ci viennent s'additionner aux gaz déjà présents et par conséquent amplifient l'effet de serre, ce qui réchauffe davantage la surface du globe (GIEC, 2021).

Au niveau mondial, d'après le dernier rapport du GIEC, il est pratiquement certain que dans la plupart des régions du globe, les vagues de chaleur définies comme : "une période de conditions atmosphériques anormalement chaudes et désagréables " (GIEC, 2013) seraient plus fortes et plus fréquentes depuis les années 50 contrairement aux épisodes de froids extrêmes qui suivraient eux une tendance inverse.

Par ailleurs, des scénarios climatiques sont utilisés pour élaborer des projections de variables climatiques telles que la température. Dans le dernier rapport du GIEC, sont utilisés les scénarios des "Shared Socio-economic Pathways" (SSP), ou autrement dit les "Trajectoires communes d'évolution socio-économique". Ces scénarios prennent en compte d'une part des mesures socio-économiques liées à l'adaptation et l'atténuation des changements climatiques et d'autre part les scénarios "Representative Concentration Pathways" (RCP). Ces derniers ont pour objectif de mettre à disposition des projections de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, dans le temps. Il est nécessaire de prendre en compte diverses possibilités de directions. Ces scénarios RCP ont, par conséquent, été établis selon des trajectoires de concentrations de GES ainsi que le forçage radiatif correspondant en W/m² en 2100 (Tabari et al., 2015) et 2300 pour

les nouveaux scénarios (Sohier and Degré, 2021). Le forçage radiatif se définit comme étant le déséquilibre d'un système climatique causé par des éléments provenant de l'extérieur tels que l'activité solaire, les éruptions volcaniques ainsi que l'impact des activités humaines (Durand, 2018). Si ce forçage est positif, le système va vers un réchauffement. Afin d'avoir une certaine cohérence entre les différents modèles climatiques, quatre scénarios principaux ont été retenus : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5. Le tableau A.1 en annexe A permet de visualiser les caractéristiques principales des différents scénarios dont les trajectoires sont dessinées sur la figure 2.1.

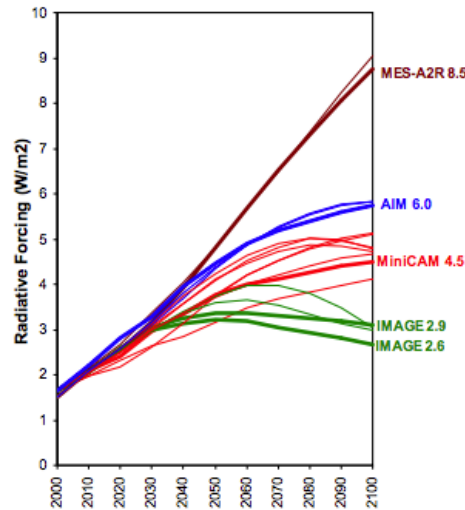


FIGURE 2.1 – Trajectoires des scénarios RCP 2.6 en vert, RCP 4.5 en rouge, RCP 6.0 en bleu, RCP 8.5 en brun (Moss et al., 2008).

En combinant les SSP et RCP, cinq scénarios sont dressés dans le sixième rapport du GIEC (AR6) sorti en 2021. Le scénario SSP1-1.9 est le scénario le plus optimiste tandis que le scénario SSP5-8.5 représente la situation la plus défavorable où aucune mesure d'atténuation n'est envisagée. Le scénario SSP1-1.9 relate au niveau mondial un réchauffement limité à 1,5°C en 2100 et des émissions nettes nulles de CO_2 à partir de 2050. Ceci correspond à ce qu'il a été déterminé par l'accord de Paris en 2015.

Les projections climatiques prévoient, selon les scénarios SSP de la "phase 6 du Projet d'Intercomparaison de Modèles Couplés" (CMIP6), une augmentation de la température de surface entre 1-1,8°C et 3,3-5,7°C selon le scénario le plus et moins optimiste respectivement (figure 2.2). Ces chiffres se réfèrent à la période 2081-2100 par rapport à la période 1850-1900.

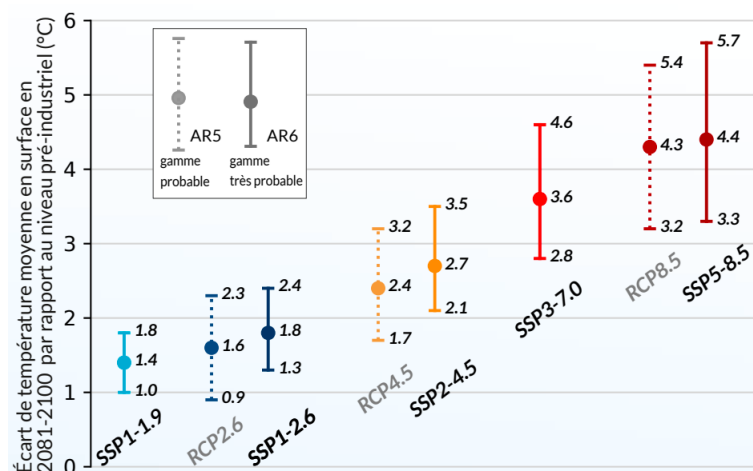


FIGURE 2.2 – Augmentation de la température moyenne au niveau global entre la période 1850-1900 et la période 2081-2100. Les barres pleines représentent les données pour l'AR6 et les barres en pointillés font référence au AR5. (GIEC, 2021).

Le « Projet d'Intercomparaison de Modèles Couplés » (CMIP) est un programme mis en place par le « World Climate Research Programme » (WCRP) en 1995 permettant de coordonner à l'échelle mondiale, la communauté de modélisation du climat. De plus, il met à disposition des projections climatiques globales qui appuient les activités du WCRP, la science liée au climat et les décideurs. Ces projections ont pour but d'améliorer la compréhension des changements climatiques aussi bien dans le passé que dans le présent et dans le futur. Le CMIP est notamment indispensable pour des organismes d'évaluations climatiques tels que le GIEC (World Climate Research Programme, 2022).

Au fil des années, les modèles climatiques CMIP évoluent. Grâce aux avancées technologiques, les résolutions spatiales des modèles climatiques s'affinent et des composantes physiques supplémentaires sont ajoutées aux modèles pour les améliorer. Actuellement les CMIP6 sont les plus récents et ont d'ailleurs été employés pour le dernier rapport du GIEC de 2021 (AR6). Leur sensibilité climatique, c'est-à-dire la manière dont la température de l'air évolue en réponse à un certain niveau de forçage radiatif, est plus importante que pour les modèles de la CMIP5 ce qui par conséquent augmente le réchauffement. En outre, une amélioration est réalisée au niveau de la simulation de la balance énergétique concernant les modèles de circulation générale (Sohier and Degré, 2021).

Le réchauffement climatique se réalise principalement au niveau des continents et dans l'hémisphère Nord peu importe le degré de réchauffement (figure 2.3). Les cartes reprises sur la figure 2.3 traduisent une élévation de la température globale de 2 et 4°C (GIEC, 2021).

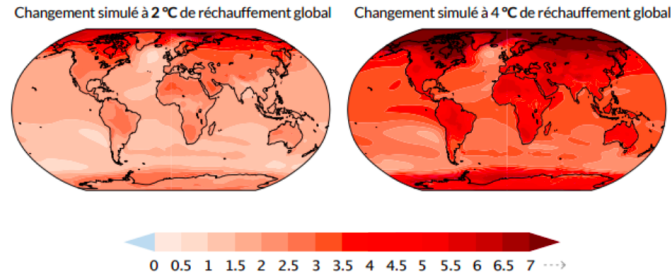


FIGURE 2.3 – Évolution de la température moyenne en degrés Celsius par rapport à la période 1850-1900 (GIEC, 2021).

Au niveau du Déficit de Pression de Vapeur (VDP) caractérisé comme la disparité entre la "pression de vapeur réelle" (quantité d'eau effectivement présente dans l'atmosphère) et la "pression de vapeur saturante" (quantité d'eau que pourrait soutenir l'atmosphère dans des conditions saturantes), une augmentation est observée pour la période 1901-2017. La figure 2.4 montre la tendance du VDP sur l'ensemble du globe. Les courbes en gras sont des données lissées sur une période de 10 ans pour ces régions : États-Unis (USA), Canada (CAN), Amérique centrale (CAM), Amérique du Sud septentrionale (NSA), Brésil (BRA), Amérique du Sud-Ouest (SSA), Europe (EU), Afrique septentrionale (NAF), Equateur (NAF), Afrique du Sud (NAF), Amérique du Nord (NAF), Afrique du Sud (NAF), Afrique du Nord (NAF), Afrique équatoriale (EQAF), Afrique australe (SAF), Russie (RUS), Asie centrale (CAS), Moyen-Orient (MIDE), Chine (CHN), Corée et Japon (KAJ), Asie du Sud (SAS), Asie du Sud-Est (SEAS), Océanie (OCE))

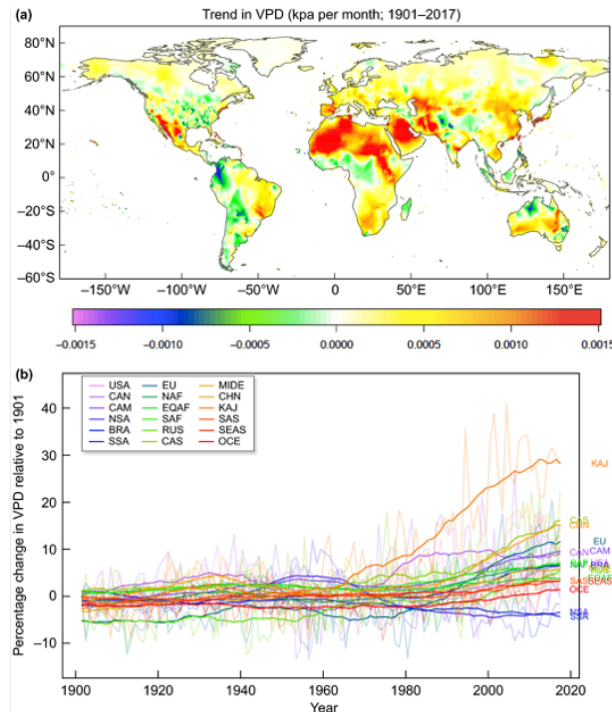


FIGURE 2.4 – Tendence du VDP au niveau de la période 1901-2017. Cette variable a été déterminée sur base du VPD calculé à partir de la température de l'air et de la pression de vapeur de la version TS 3.26 de la Climate Research Unit (CRU) (Harris et al., 2014) (Grossiord et al., 2020).

Ce phénomène en hausse est expliqué par le fait que lorsque la température de l'air s'élève, la pression de vapeur saturante augmente ce qui permet à l'atmosphère d'emmagasiner plus d'eau. Cette croissance n'est pas aussi rapide pour la pression de vapeur réelle. Par conséquent la différence entre ces deux types de pression augmente. Cette constatation s'amplifierait dans le futur. Concernant le continent européen, une hausse du VDP est observée à partir du milieu des années 1700 en Europe centrale et en Méditerranée. Cette augmentation est liée à une élévation simultanée de la température ainsi qu'une baisse des précipitations (Nagavciuc et al., 2023). Il est intéressant de noter que l'élévation de cette variable n'est pas sans conséquences. En effet, elle influencerait la physiologie des plantes qui fermeraient davantage leurs stomates ayant un impact sur leur capacité à réaliser la photosynthèse. Le taux de transpiration est aussi perturbé par l'augmentation du VDP qui l'intensifie. Ceci engendre alors un impact sur le stress hydrique des plantes qui augmente. A côté de cela le VDP intensifie les pertes d'eau des sols humides les asséchant. Les périodes de sécheresse ainsi que le stress hydrique des plantes augmentent donc en gravité et en fréquence. Cette variable a donc un impact majeur sur les ressources en eaux au niveau mondial ainsi que sur la relation entre l'eau et les plantes (Grossiord et al., 2020).

En Europe, selon l'Agence Européenne pour l'Environnement, depuis les années 60, dans le nord-est et ouest de l'Europe, les précipitations annuelles semblent augmenter jusqu'à 70 mm par décennie. A l'inverse, dans certaines zones du sud, une diminution jusqu'à 90 mm par décennie est observée. Par contre, aucun changement significatif n'est relaté au niveau des précipitations annuelles moyennes à l'échelle de l'Europe entière (European Environment Agency, 2021b). En d'autres mots, les précipitations annuelles au niveau du Sud de l'Europe semblent diminuer en raison d'une baisse des quantités d'eau précipitées en été alors qu'en Europe du Nord, l'inverse est constaté à cause d'une augmentation des précipitations en hiver (Brouwers et al., 2015).

Dans le futur, au plus la température moyenne globale augmente, au plus les régions de hautes latitudes, le Pacifique équatorial ainsi que les régions de moussons connaîtront des précipitations moyennes annuelles plus élevées. A l'inverse, les régions sub-tropicales et une petite partie des tropiques seront plus sèches (figure 2.5). Les cartes représentées sur la figure 2.5, traduisent une élévation de la température globale de 2 et 4°C (GIEC, 2021).

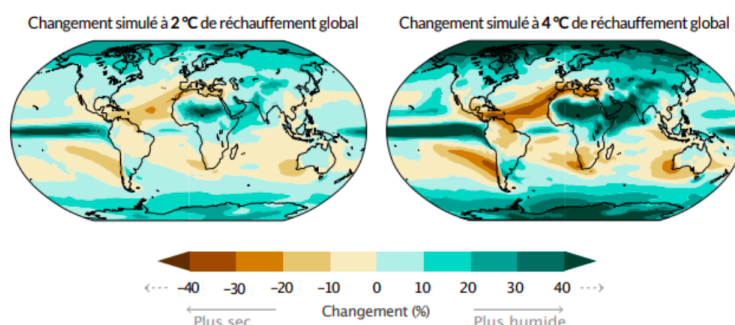


FIGURE 2.5 – Évolution des précipitations moyennes annuelles en pourcentage par rapport à la période 1850-1900 (GIEC, 2021).

Le régime des précipitations va changer selon les régions et les saisons. A l'échelle européenne,

le nord sera plus humide tandis que le sud sera moins pluvieux. Cette baisse sera d'autant plus forte en été (European Environment Agency, 2021b).

En ce qui concerne les précipitations extrêmes, la fréquence de ces variables sont en augmentation depuis 1950 sur la plupart des territoires disposant d'un jeu de données d'observations suffisant. Ces changements seraient probablement liés à l'homme (GIEC, 2021).

De plus, leur intensité est en augmentation depuis les années 60 tant au nord qu'au nord-est de l'Europe. Cependant, des divergences sont observées au niveau du sud et sud-ouest du continent (European Environment Agency, 2021a).

En d'autres termes, maintenir un réchauffement global va non seulement engendrer l'intensification du cycle de l'eau, au niveau de sa variabilité mais aussi amplifier l'intensité des événements extrêmes que ce soient les inondations ou encore les sécheresses (GIEC, 2021).

2.2 Changements climatiques et hydrologiques en Belgique

2.2.1 Hydrologie en Belgique

Un bassin versant (BV) ou encore un bassin hydrographique est une "délimitation géographique d'un espace drainé, dont l'ensemble des eaux convergent vers un même point de sortie, l'exutoire" (SPW, sd).

Un district international est "une zone terrestre et maritime, composée d'un ou plusieurs bassins hydrographiques, ainsi que des eaux côtières associées" (SPW, sd). La Belgique est inscrite dans quatre districts internationaux : la Meuse, l'Escaut, la Seine et le Rhin. Les deux plus grands fleuves de Belgique sont la Meuse et l'Escaut. Comme la figure 2.6 le montre bien, ces districts ne prennent pas en compte les limitations régionales ou nationales.

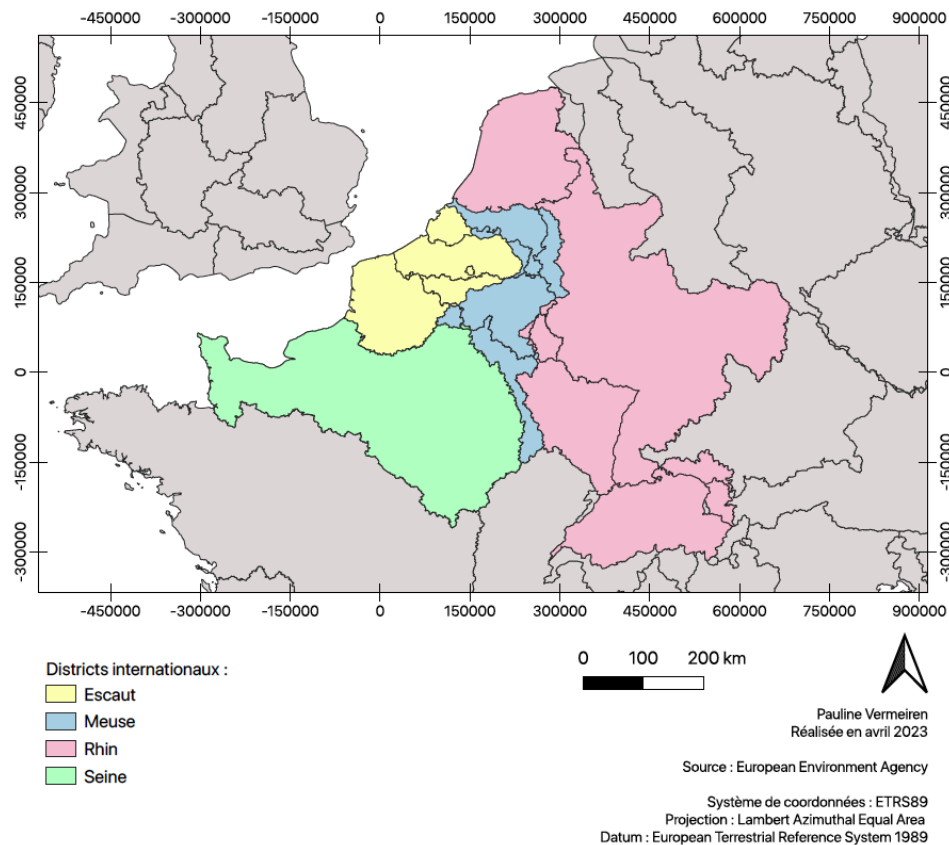


FIGURE 2.6 – Représentation des quatre districts internationaux dans lesquels la Belgique s’inscrit c’est-à-dire la Meuse, l’Escaut, le Rhin ainsi que la Seine.

Au niveau de la Région wallonne dont la superficie est de $16\,845\text{ km}^2$, le bassin dominant est celui de la Meuse. La figure 2.7 permet d’observer des proportions de chaque bassin traversant la Région wallonne (Service public de Wallonie, 2021).

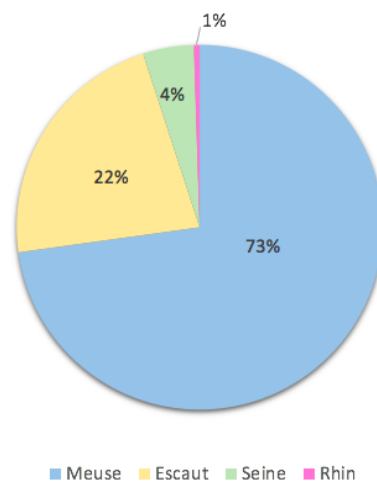


FIGURE 2.7 – Proportion des districts internationaux de la Meuse, Escaut, Rhin et Seine en Wallonie constituant les bassins fluviaux (Service public de Wallonie, 2021).

En Wallonie, plusieurs unités de gestion sont distinguées en fonction de l’échelle d’étude. La plus importante constitue les bassins fluviaux cités ci-dessus situés au sein du territoire wal-

lon. Ces quatre entités, établies par la « Directive-Cadre sur l'Eau » (Directive 2000/60/CE), comprennent la totalité du réseau hydrographique, la superficie du territoire assaini et les eaux souterraines associées.

Ces quatre districts au sein de la Wallonie peuvent être partagés en 15 unités de gestion composées de sous-BV appelés "bassins versants des plans de gestion" (figure 2.8).

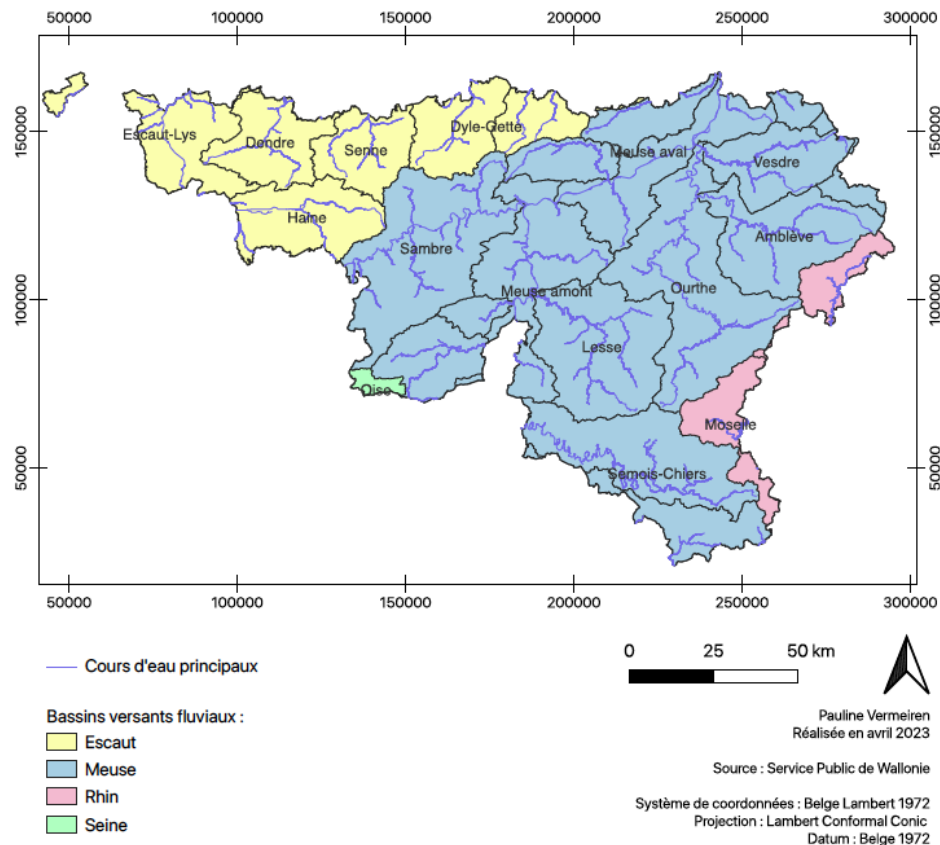


FIGURE 2.8 – Les 15 bassins versants du plan de gestion de la Wallonie inscrits dans les quatre bassins versants fluviaux : la Meuse, l'Escaut, le Rhin et la Seine.

Ces 15 sous-BV sont gouvernés par des plans de gestion permettant de mettre en application la « Directive-Cadre sur l'Eau ». Cette directive est une initiative européenne adoptée le 23 octobre 2000 dans le but d'une meilleure coordination au niveau des réglementations entre les pays européens. Elle consiste en une politique communautaire autour du secteur de l'eau imposant divers objectifs, outils et devoirs. Elle fut adoptée le 23 octobre 2000 dans le but d'une meilleure coordination au niveau des réglementations entre les pays européens (SPWARNE, sd).

Ces 15 bassins wallons peuvent être partagés en trois subdivisions : 25 bassins versants principaux, 51 sous-bassins versants principaux et enfin 390 bassins versants des masses d'eaux de surface (MESU).

Ces derniers permettent de caractériser l'état du milieu aquatique. En effet, ils sont caractérisés par leur niveau d'altération hydromorphologique c'est-à-dire s'ils ont été modifiés par l'homme ou pas. Ils permettent de caractériser l'état du milieu aquatique : les masses d'eau

naturelles, les masses d'eaux fortement modifiées (influencées par l'homme) et les masses d'eaux artificielles (mises en place par l'homme).

Les cours d'eau wallons sont définis en trois classes : les cours d'eau non navigables, navigables et les cours d'eau non classés. Les cours d'eau non navigables sont définis comme : "les rivières et ruisseaux non classés par le gouvernement parmi les voies navigables, en aval du point où leur bassin hydrographique atteint au moins 100 hectares" (Service public de Wallonie, 2023). En fonction de la taille de leur bassin hydrographique, ils seront divisés en catégorie une, deux ou trois.

Les cours d'eau navigables, aussi appelés les voix hydrauliques, sont gérés par différentes unités en fonction de leur classe et catégorie.

Enfin, les cours d'eau non classés concernent le patrimoine privé (Service public de Wallonie, 2023).

Concernant les ressources en eau au niveau de la Wallonie, le capital d'eau douce de cette région est de 13 milliards de m^3 par an. La figure 2.9 montre que cette quantité est essentiellement obtenue grâce aux précipitations (que ce soit la pluie ou la neige) qui sont régulières toute l'année. Les eaux provenant de l'étranger (France) participent également à ce capital.

La quantité d'eau qui s'infiltre et qui parvient aux nappes souterraines change considérablement selon le type de sous-sol présent. Dans les régions où le sol est composé de schiste, cette quantité est habituellement insignifiante. En revanche, dans les régions où le sous-sol est plus perméable, comme dans le cas de la craie, une grande partie des précipitations atteint la nappe souterraine, pouvant même représenter plus de la moitié du volume total des précipitations.

Le modèle EPIC-grid a été mis en place par l'"Unité Systèmes Sol - Eau de Gembloux Agro-Bio Tech (ULg)" (Sohier and Degre, 2011) et repose sur le modèle parcellaire EPIC (Williams et al., 1984). Il met en relation le climat, l'eau, le sol ainsi que les plantes. Il réalise quotidiennement des simulations pour chaque maille de BV notamment de flux d'eau vers les eaux de surface et souterraines. Pour ce qui est du bilan hydrologique à l'échelle du bassin ou de la masse d'eau, le modèle prend en compte les données d'évapotranspiration réelle (ETR) définie comme : " La masse d'eau qui, étant donné les conditions atmosphériques, est transportée sous forme de vapeur de l'interface sol-plante vers l'atmosphère" (Gérard Guyot, 1999). Il considère aussi les flux d'eau du sol et du sous-sol qui remontent en surface ainsi que les flux liés à la percolation des eaux de pluie qui vont vers les eaux souterraines.

Il est à noter que ce modèle ne prend pas en compte les transferts d'eau réalisés au sein des eaux de surface et souterraines et qu'il n'a pas été conçu pour simuler le débit des cours d'eau. De plus, en Région wallonne, il est notamment utilisé pour estimer l'état actuel et futur des nappes en fonction des conditions climatiques (Sohier and Degré, 2021).

Selon celui-ci, pour la période 1995-2019, la recharge annuelle renouvelable des nappes phréatiques en Wallonie est estimée entre 1000 (1996) et 3000 millions de m^3 (2001) dont la s'élève à 1900 3000 millions de m^3 par an.

Ceci est à ne pas confondre avec la recharge d'eau souterraine disponible qui est définie par la Directive 2000/60/CE comme « le taux moyen annuel à long terme de la recharge totale moins le taux annuel à long terme de l'écoulement requis pour atteindre les objectifs de qualité écologique des eaux de surface associées, afin d'éviter toute diminution significative de l'état écologique de ces eaux et d'éviter toute dégradation significative des écosystèmes terrestres associés ». Ce volume est estimé par Derycke and Fried (1982) à 550 millions m^3 . Il s'avère que ce chiffre n'a encore jamais été réévalué depuis 1982. La majorité de l'eau prélevée en surface (2600 millions de m^3) et dans les nappes souterraines (370 millions de m^3) est restituée dans le circuit hydrologique au niveau des rivières (2730 millions de m^3). Cependant 80 millions de m^3 par an est tout de même perdu que ce soit par évaporation ou dans les processus industriels (figure 2.9) (SPW - DEE - Direction des Eaux souterraines, 2023).

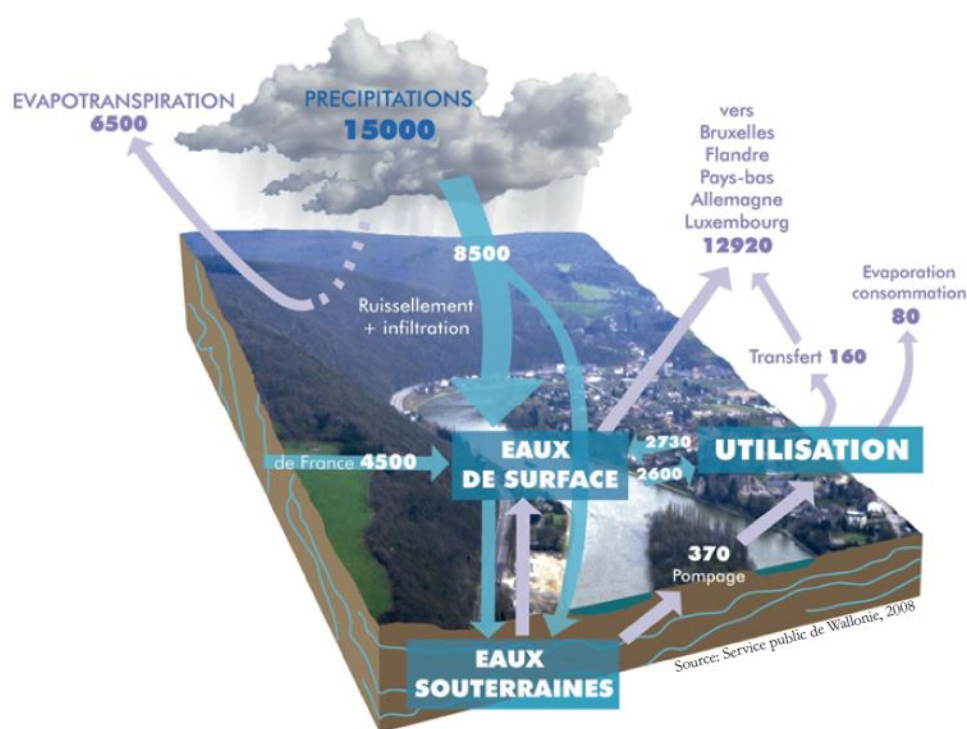


FIGURE 2.9 – Bilan hydrique de la Wallonie réalisé en 2008 (millions de m^3)

A l'heure d'aujourd'hui, les ressources en eau présentes en Wallonie permettent de combler les besoins de Bruxelles et une partie de la Flandre, même si des problèmes au niveau local de surexploitation ou de pénuries peuvent se produire certaines années. Pour donner des chiffres, sur la période 2000-2018, les prélèvements des eaux souterraines dans les nappes ne dépassaient pas en moyenne 22 % des volumes renouvelés chaque année par la recharge pluviométrique. Par exemple, lors de l'année 2018 le taux d'exploitation en eau de la Région wallonne n'était que de 4,7% sachant que le seuil européen de stress hydrique est défini à 20% (SPW, 2021).

Les principales prises d'eau peuvent être visualisées sur la figure 2.10.

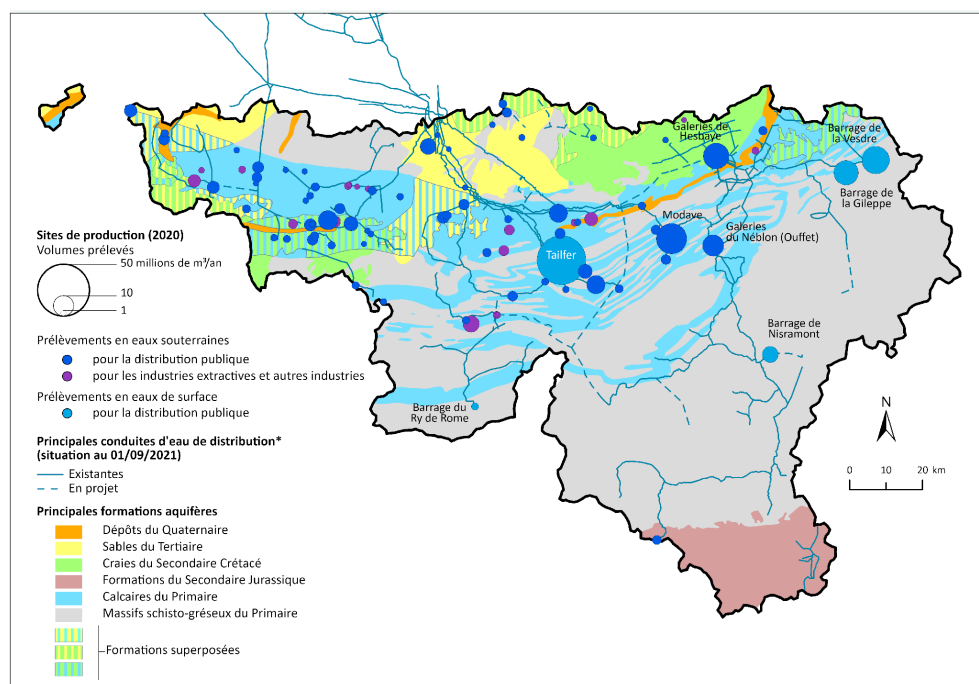


FIGURE 2.10 – Prises d'eau principales en Wallonie avec les prises d'eau en surface en bleu et souterraines en bleu foncé si l'eau est destinée à la distribution publique et mauve si elle concerne les industries extractives ou autres industries. Le fond de la carte représente les principaux types de formations aquifères (SPW, 2021).

2.2.2 Changements climatiques

La température moyenne annuelle de l'air en Belgique a augmenté entre +1.8°C et +1.9°C entre la période 1990-2019 et celle de 1880-1909. Ceci est principalement lié aux températures accrues en été et au printemps (IRM, 2020). Cette évolution n'a pas été constante au fil des années. En effet, une augmentation accélérée a eu lieu entre 1880 et 1950 et une deuxième à partir de 1980 (figure 2.11).

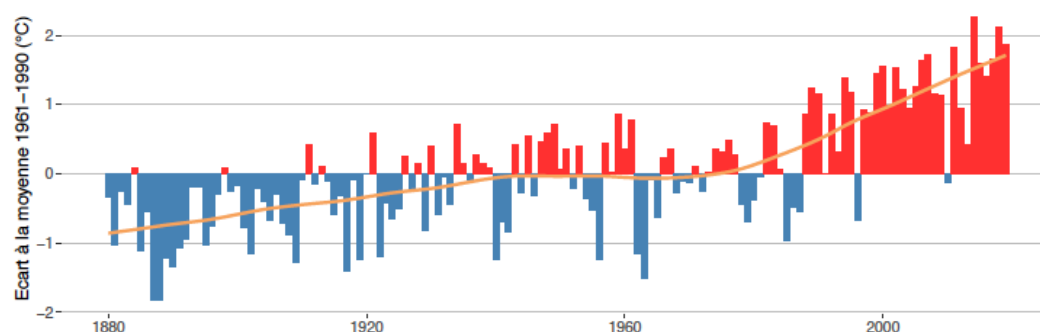


FIGURE 2.11 – Écarts de température annuelle à la température moyenne de 1961 à 1990 sur la période 1833-2019 calculés à partir des données de mesures de 8 stations historiques (Ostende, Jallhay, Saint-Trond, Uccle, Anvers, Leopoldsburg, Gembloux et Stavelot). La ligne orange représente la courbe de tendance (IRM, 2020).

La figure 2.12 permet de mettre en parallèle les changements de température au niveau mondial, européen et belge. Force est de constater que les changements au niveau de la Belgique sont plus intenses qu'à une plus grande échelle.

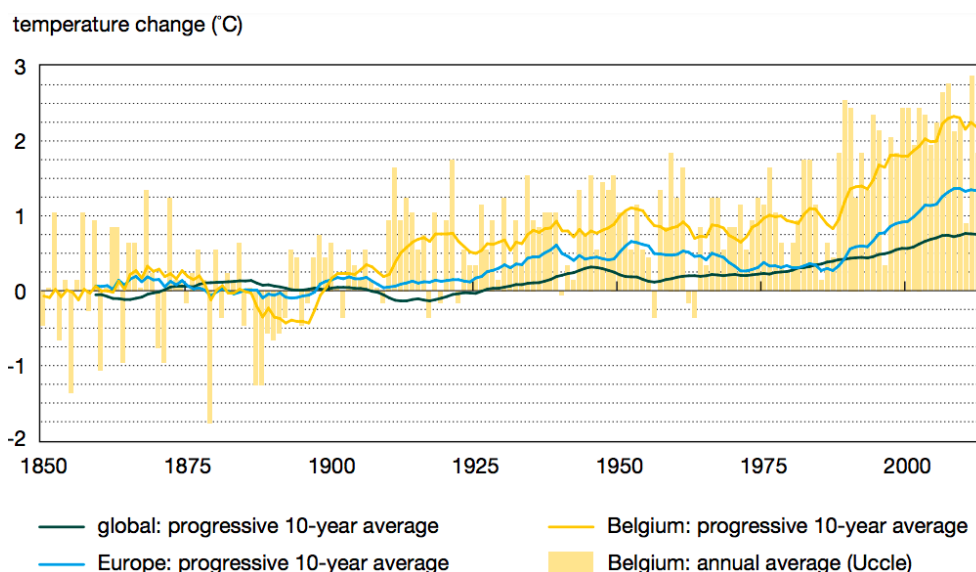


FIGURE 2.12 – Changement de la température exprimé comme : l'écart de la température moyenne annuelle par rapport à la température moyenne au cours de la période de référence 1850-1899, et la moyenne décennale progressive sur 10 ans ("progressive ten-year average") de l'écart par rapport à la même période de référence, à l'échelle du monde, de l'Europe et de la Belgique (Brouwers et al., 2015).

L'augmentation de la température moyenne de l'air se déroule durant les quatre saisons bien qu'elle soit la plus grande au printemps et la plus faible en hiver (Brouwers et al., 2015).

Sur la période 1952-2012, les températures minimales et maximales de neuf stations météorologiques présentes en Belgique auraient toutes les deux augmenté respectivement de 0,5°C et 0,4°C par décennie. Les vagues de chaleur sont qualifiées par l'IRM comme : "une période d'au moins cinq jours consécutifs au cours de laquelle la température maximale atteint ou dépasse 25°C chaque jour et la température maximale atteint ou dépasse 30°C au moins à trois reprises durant la période considérée" (IRM, 2020). Leurs fréquences auraient augmenté depuis les années 1990 (Van deVyver, 2012).

En outre, au moins une vague de chaleur a été enregistrée chaque année sur la période 2015-2019 (IRM, 2020). Une augmentation significative est observée au niveau de la station météorologique de l'IRM située à Uccle, où la fréquence des vagues de chaleur serait en moyenne plus élevée d'un facteur 0,3 par décennie. La durée le serait aussi avec en moyenne une différence de + 2 jours par décennie. Enfin, l'augmentation de l'intensité serait plus importante de +1°C/jour par décennie. Ces trois affirmations se basent sur une période de 1981 à 2019 (IRM, 2020).

Par ailleurs le nombre de jours tropicaux, c'est-à-dire relevant une température égale ou supérieure à 30°C a augmenté significativement avec un jour supplémentaire par période de 17 ans

sur la période de 1968 à 2014. Ceci est valable pour la station météorologique de l'IRM située à Uccle (Brouwers et al., 2015).

En opposition à ces observations, aucune tendance n'est remarquée pour les vagues de froid qui sont définies par l'IRM comme : " une période d'au moins cinq jours consécutifs au cours de laquelle la température maximale est négative chaque jour (c'est-à-dire qu'il gèle tout au long de la journée ; c'est ce qu'on appelle un jour d'hiver), et la température minimale atteint une valeur inférieure à -10°C au moins à trois reprises durant la période " (IRM, 2020).

Pour ce qui est des projections futures à l'échelle de la Belgique, CORDEX.BE (<http://euro-cordex.be/>) est utilisé pour rassembler les différents groupes de modélisation du pays. C'est une plate-forme qui se base sur le plan CORDEX et qui permet la comparaison des simulations à haute résolution sur la Belgique pour ensuite les situer vis à vis de l'entité CORDEX. CORDEX.be permet par conséquent de montrer les cohérences entre les simulations. Parmi les simulations comparées se trouvent celles des modèles climatiques régionaux (RCM) CMIP5, "Modèle Atmosphérique Régional" (MAR) développé par l'Université de Liège, ALARO utilisé notamment par l'IRM et le "Consortium for Small-scale Modeling-CLM "(COSMO-CLM) employé par la KULeuven et l'UCL (Termonia et al., 2018).

Pour la Belgique, les résultats obtenus à partir de modèles suivant les scénarios RCP, décrits à la section 2.1, sont différents dépendant le modèle utilisé. Cependant, ils montrent tous une augmentation de la température mensuelle moyenne pour 2100. Cette augmentation est d'autant plus importante que le forçage radiatif considéré est important. Les résultats pour le modèle CMIP5 ont été repris dans le tableau 2.1 pour le scénario RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5.

TABLE 2.1 – Prédiction pour la Belgique des moyennes de températures mensuelles sur 100 ans selon les simulations de CMIP5 suivant les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 dans le cadre du projet CORDEX (Termonia et al., 2018).

Scénario	Moyenne de la température mensuelle [°C]	
	Hiver	Ete
RCP 2.6	+ 1.7	+ 2.6
RCP 4.5	+ 2.4	+ 3.3
RCP 8.5	+ 3.8	+ 5.6

En ce qui concerne les vagues de chaleur, leur nombre total augmenterait entre 33 et 51 selon l'intensité du forçage radiatif. (Termonia et al., 2018)

Concernant le VDP, aucune information spécifique à la Belgique n'a été trouvée. Néanmoins, en regardant la carte sur la figure 2.4, il est observé que cette variable a augmenté sur la période 1901-2017.

L'évapotranspiration de référence (ET0) est définie comme : La masse d'eau qui, étant donné les conditions atmosphériques, est transportée sous forme de vapeur d'une surface de référence vers

l'atmosphère. Cette surface de référence est un gazon de 15 cm de hauteur, bien maintenu, ne présentant aucun stress hydrique, nutritionnel ou pathologique " (Gérard Guyot, 1999). En Belgique, l'ET0 représente environ la moitié des précipitations dans le cycle de l'eau. Bien que pour la période 1901-1970, il n'y ait aucune tendance significative à la hausse, à partir de 1980, une hausse de l'ET0 est observée. En effet, depuis les années 1980 jusqu'en 2014, l'ET0 a augmenté de 25 %.

Cette augmentation s'accentuerait dans le futur et serait plus intense en été qu'en hiver. L'intensité va également de pair avec le scénario d'émission de GES (Brouwers et al., 2015).

Selon Tabari et al. (2015), il est conclu sur base d'une analyse de sensibilité que la température de l'air serait le facteur d'influence principal de l'augmentation de l'ET0 projetée par les MCG CMIP5. En effet, la température de l'air contribuerait à 60% de cette augmentation pour l'hiver et à 57% pour l'été.

Le rayonnement solaire qui s'intensifie y jouerait également un rôle.

Cependant cette dernière affirmation se contredit avec le résultat des prédictions des scénarios CORDEX IRM RCP 4.5 et CORDEX IRM 8.5, c'est-à-dire les prédictions faites sur base du modèle ALARO. Effectivement, selon ces scénarios, le rayonnement solaire annuel moyen serait moins important dans le futur (période 2031-2050) par rapport à aujourd'hui (2000-2019). Cette tendance est confirmée par les MCR du CMIP5 qui prédisent également une diminution du rayonnement solaire (Sohier and Degré, 2021).

Un autre article a été analysé où Bartok et al. (2017) font la comparaison entre rayonnement solaire estimé via les MCG CMIP5 et par les MCR employés dans le contexte d'EUROCORDEX. Les scientifiques ont montré que des différences non négligeables persistent entre les deux résultats. Une augmentation du rayonnement solaire est prévue pour l'Europe suivant les modèles globaux, contrairement aux modèles régionaux qui pour trois des quatre utilisés, prédisent une diminution de ce rayonnement.

Ceci s'explique selon les auteurs de l'article par la couverture nuageuse qui ne se comporte pas de la même manière dans les deux types de modèles. Les affirmations en rapport avec l'évapotranspiration sont donc à prendre avec un certain recul car une décroissance du rayonnement solaire entraîne une diminution de l'ET0 ce qui n'est pas en phase avec ce que prédisent les modèles globaux.

Au niveau des précipitations, leur variabilité est importante dans le temps (Brouwers et al., 2015). En faisant la comparaison des données entre celles de la période de 1990 à 2019 et 1880 à 1909, une augmentation moyenne des précipitation de 15% est observée (figure 2.13).

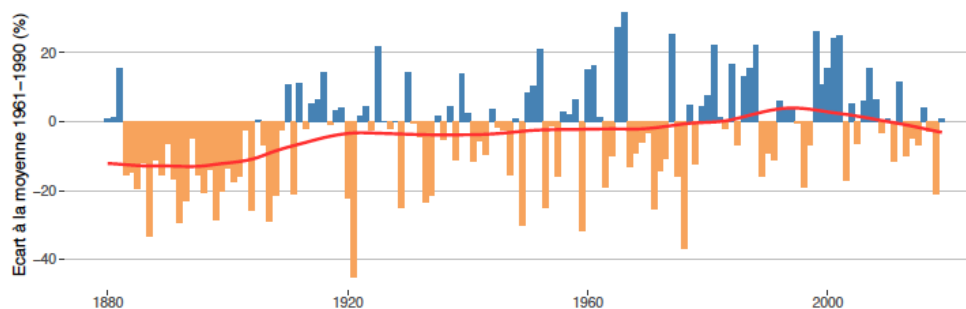


FIGURE 2.13 – Écarts en % des précipitations cumulées chaque année de 1880 à 2019 par rapport à la moyenne des précipitations de la période de référence (1961-1990) pour la Belgique, calculées à partir des données de mesures de 8 stations historiques (Ostende, Jalhay, Saint-Trond, Uccle, Anvers, Leopoldsburg, Gembloux et Stavelot). La ligne rouge représente la courbe de tendance (IRM, 2020).

Il est important de souligner que ces moyennes de précipitations sur la Belgique peuvent dissimuler la disparité entre les régions (IRM, 2020). Effectivement, un doublement des quantités précipitées est observé entre les zones les plus sèches comme Saint-Trond et les zones les plus humides telles que les Hautes Fagnes. De plus, les pluies annuelles moyennes sont influencées par le relief (où les zones d'altitude seraient plus pluvieuses) et l'orientation des pentes vis à vis des vents dominants. Enfin, la proximité de la mer joue un rôle également. Les prédictions concernant le régime des précipitations sont loin d'être claires (Brouwers et al., 2015). A côté de ça, selon Vaes et al. (2002), les précipitations en Belgique sur les 100 dernières années ne suivent pas une tendance significative. Ces dernières augmenteraient significativement uniquement pour l'hiver ainsi que le semestre hivernal (novembre à avril). Cette constatation est en accord avec ce qui est observé au niveau de l'Europe du Nord et de l'Ouest où les précipitations ont augmenté en hiver contrairement au Sud où elles ont diminué en été.

La Belgique a été fort impactée par des épisodes de sécheresse, plus particulièrement pour les étés 2011, 2017, 2018, 2019 ou encore 2022. Ces sécheresses météorologiques caractérisant les périodes de jours consécutifs où il ne pleut pas, sont une menace pour les ressources en eau, les écosystèmes ainsi que pour la biodiversité. Une tendance significative pour la saison du printemps est observée avec +1,5 jour par décennie depuis 1981. En d'autres mots les épisodes de sécheresse s'allongent ces dernières années. Une hausse significative du nombre annuel de jours sans pluie est aussi constatée à l'échelle saisonnière, uniquement pour le printemps. Cette dernière est de l'ordre de +3,1 jours par décennie entre 1981 et 2019. Cependant, aucune tendance n'est observée à l'échelle annuelle. En combinaison avec la croissance des températures, il peut être aussi conclu que l'intensité des sécheresses météorologiques au printemps augmente (IRM, 2020).

Concernant l'autre extrême, c'est-à-dire les jours de fortes pluies pouvant mener à des inondations, les cumuls de précipitations sur dix jours et sur 24h augmenteraient de manière significative sur la période 1898-2019. Cette conclusion est aussi faite pour la saison des orages entre avril et septembre où les précipitations cumulées par heure seraient plus conséquentes de 2,8mm par décennie (1981-2019) (IRM, 2020).

Aussi pour la période de 1951 à 2013, le nombre de jours avec de fortes précipitations a connu

une hausse significative et de même pour la quantité maximale de pluie en 5, 10 et 15 jours (1880-2013) (Brouwers et al., 2015).

Dans les années à venir, l'intensité des précipitations va augmenter mais il est difficile de connaître la quantité totale de pluie qui va tomber chaque année (Brouwers et al., 2015). Selon les résultats des projections climatiques repris par CORDEX, ceux-ci prédisent une augmentation des précipitations moyennes mensuelles en hiver et une diminution en été. De plus, le nombre de jours humides tend à augmenter en hiver et à diminuer en été. Ceci traduit le fait que les périodes de pluie et de sécheresse seraient plus importantes. Cette affirmation est la même pour l'ensemble des simulations (Termonia et al., 2018).

Le tableau 2.2 permet de visualiser les différents pourcentages suivant les différents scénarios pour les simulations du modèle CMIP5. Il peut être constaté comme pour la température qu'au plus le scénario de forçage radiatif est important, au plus les valeurs de pourcentage sont grandes (Termonia et al., 2018).

TABLE 2.2 – Prédiction des moyennes de précipitations mensuelles et nombre de jours humides sur 100 ans en Belgique selon les simulations de CMIP5 suivant les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 dans le cadre du projet CORDEX (Termonia et al., 2018)

Scénario	Moyenne des précipitations mensuelles [%]		Nombre de jours humides ($P > 0,1\text{mm}$) [%]	
	Hiver	Eté	Hiver	Eté
RCP 2.6	+ 9	- 6	+ 3	-5
RCP 4.5	+ 11	-12	+3	-14
RCP 8.5	+ 22	-30	+ 4	- 29

Un jour est considéré comme humide si la quantité d'eau précipitée est supérieure à un 0,1 mm.

En ce qui concerne les extrêmes, davantage de sécheresses sont attendues en Belgique d'ici la fin du 21ème siècle selon le scénario RCP 8.5. De plus, une sécheresse excessive, telle que celle connue en 1976, serait cinq fois plus fréquente en comparaison avec une période de référence historique (1951-2005). Ce risque d'augmentation serait lié aux précipitations plus faibles prévues en été.

Plusieurs indices existent pour évaluer le changement des fortes précipitations. D'une part le nombre de jours où la lame d'eau dépasse 10mm et d'autre part le 99ème centile peuvent être calculés. En utilisant le RCP 8.5, ces deux éléments s'accroîtraient et ce jusqu'à la fin du siècle (IRM, 2020).

2.2.3 Lien entre changement climatique et hydrologie

Les changements climatiques, en perturbant le comportement des précipitations et de l'évapotranspiration, peuvent influencer l'hydrologie des BV notamment des rivières ainsi que la disponibilité de l'eau (King et al., 2015). Par exemple, un changement dans les débits extrêmes peut avoir un impact sur la qualité de l'eau.

Un changement dans le régime hydrologique pourrait donc avoir des impacts non négligeables sur la gestion de l'eau ainsi que son utilisation.

La réponse hydrologique des bassins hydrographiques repose sur plusieurs éléments. Au niveau des effets naturels, si la température s'élève, la capacité de l'atmosphère à retenir l'eau augmente. Ceci accentuerait par exemple les pénuries en eau. Ces dernières pourraient aussi être influencées par l'augmentation des pluies extrêmes ayant pour conséquence d'intensifier le ruissellement. Bien que le sol ne soit pas saturé, ce ruissellement pourrait quand même se produire du fait que l'eau n'aurait pas le temps de pénétrer dans le sol. Ceci limiterait ainsi la capacité de recharge des nappes phréatiques et donc la disponibilité en eau. Par contre, si les températures augmentent en hiver, il y aurait par conséquent moins d'accumulation de neige ce qui atténuerait les épisodes de crues lors du dégel (De Ridder et al., 2020).

Pour ce qui est des effets anthropogéniques, l'usage des sols notamment au niveau de l'imperméabilisation, de l'agriculture ou encore la gestion des espaces naturels, peut fortement influencer le régime hydrologique des BV en terme d'infiltration de l'eau dans le sol (Degré and Grandry, 2021).

En outre, l'accroissement des températures en période d'été risque d'inciter davantage à la consommation d'eau de l'industrie énergétique ou encore des ménages. Ceci aurait pour conséquence de d'augmenter la vulnérabilité aux sécheresses (De Ridder et al., 2020).

Tabari et al. (2015) ont réalisé la différence entre les précipitations et l'ET0 au niveau de la Belgique centrale. Aussi appelée la disponibilité en eau, elle correspond à la quantité d'eau totale utilisable pour l'écoulement de surface, le remplissage des nappes souterraines ainsi que la recharge d'eau dans le sol. La disponibilité en eau dans le futur serait plus faible en été mais par contre plus importante en hiver au niveau de la Belgique centrale. En conséquence, les niveaux de sécheresse et d'inondation ne feraient que croître, avec des saisons humides et sèches qui seraient amplifiées (Tabari et al., 2015).

Si cette différence entre précipitations et ET0 s'avère négative, cela signifie que la "demande atmosphérique" (atmospheric demand) engendre un stress sur les stocks d'eau de surface (Baroni et al., 2019). C'est le déficit hydrique. Celui-ci pourrait s'élever jusqu'à 200mm en période estivale pour le scénario RCP 8.5. Comme la densité de population en Région flamande et à Bruxelles est très importante, ces deux régions sont sensibles à un changement de la disponibilité en eau (Tabari et al., 2015).

Le déficit hydrique est défini aussi dans certains articles comme étant l'ET0 supérieure à l'ETR.

Dans ce mémoire, la définition de Sohier and Degré (2021) de l'eau utile sera utilisée comme

étant la différence entre les précipitations et l'ETR. En Wallonie, le modèle EPICGrid stipule que la moyenne interannuelle de l'eau utile augmenterait respectivement de 7 et 21% entre 2031 et 2051 pour les scénarios CORDEX IRM 4.5 et 8.5 (Sohier and Degré, 2021).

Au niveau des ressources en eaux souterraines annuellement renouvelables, devraient augmenter dans le futur. Selon les scénarios CORDEX IRM 4.5 et 8.5, cette recharge annuelle des nappes influencée par les flux d'eau qui vont vers les eaux souterraines augmenterait de 6 et 22% respectivement pour la période 2031-2051 en comparaison avec la période 2000-2019 en Wallonie. Cependant comme les besoins en eau avec les températures qui augmentent risquent d'être plus importants, il est nécessaire de rester attentif (Sohier and Degré, 2021). Effectivement, un effet combiné de facteurs directs et indirects pourraient avoir des conséquences importantes sur ces ressources davantage exploitées. Par ces facteurs sont entendus, la demande en eau qui pourrait augmenter, la qualité des sols qui risque de se dégrader ou encore les pratiques d'irrigation (Brouyère et al., 2004).

Les changements au niveau des débits des cours d'eau sont aussi à mettre en avant. En Belgique, tout comme en Europe occidentale, il est observé que le nombre d'inondations de grande ampleur serait significativement plus important depuis 1970. Il est à noter que le changement climatique n'est pas le seul facteur responsable de ces événements extrêmes. (Brouwers et al., 2015)

En Wallonie, plus particulièrement en Ardenne, le débordement des cours d'eau se produit notamment en saison hivernale et est principalement dû à une conjonction entre des pluies intenses et une fonte rapide des chutes de neige. L'équipe du Laboratoire de Climatologie de l'ULiège s'est penchée sur l'évolution des conditions hydroclimatiques qui favorisent les crues d'hiver dans le BV de l'Ourthe. Pour ce faire, ils ont reconstitué ces conditions en utilisant le MAR sur la période s'étendant de 1959 à 2010. Leurs observations ont révélé une diminution du nombre de journées propices aux crues, mettant en lumière notamment une réduction significative de l'accumulation neigeuse ainsi que de la durée de la saison d'enneigement (Wynd et al., 2016).

Une autre étude a été menée sur 84 stations limnimétriques dans le cadre du projet Hydro-trend. Ce projet vise à étudier les éventuelles tendances qui peuvent être constatées au niveau de l'amplitude et la fréquence des pics de crue en Région wallonne. Cette analyse se concentrerait notamment sur les débits des cours d'eau d'une série chronologique égale ou supérieure à 30 ans. La figure 2.14 montre les stations pour lesquelles la tendance de l'ampleur des débits maximums annuels a été étudiée ainsi que les résultats de ces analyses. Il se fait que 12% des stations ont une tendance significative dans l'amplitude des débits maximum annuels. Ce pourcentage se partage en 4.8% pour les tendances significatives positives et 7.1% pour les négatives (Degré and Grandry, 2021).

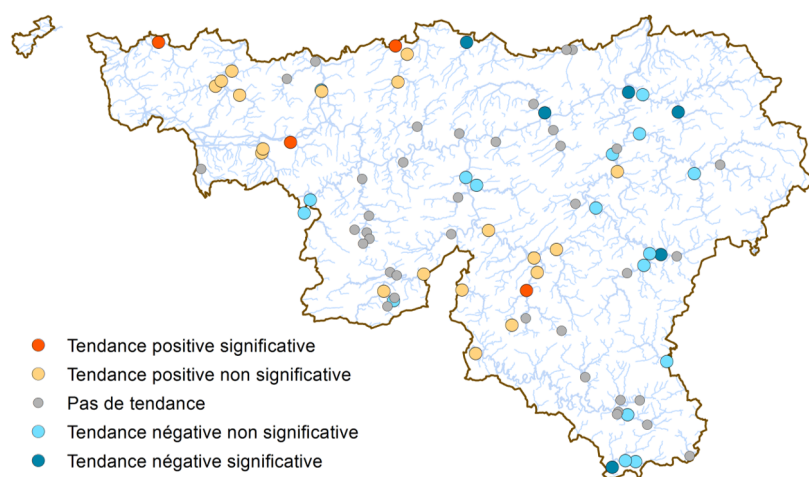


FIGURE 2.14 – Carte de Wallonie reprenant les tendances dans l’amplitude des débits maximum annuels (Degré and Grandry, 2021)

Ces résultats sont dans la lignée de ceux obtenus dans d’autres études menées à l’échelle de l’Europe sur des données de 629 stations entre 1965 et 2005. En effet, l’amplitude des débits maximum annuels augmente pour 9.7% des stations et diminue pour 7.6%, de manière significative (Mangini et al., 2018). Au niveau de la région hydro-climatique continentale de l’Europe comprenant l’est de la Belgique, l’est de la France, l’Allemagne, le nord de l’Italie, la Suisse, l’Autriche ainsi que les autres pays de l’est de l’Europe, les pourcentages sont respectivement 8.6% (tendances positives) et 6.9% (tendances négatives). Ces données sont en concordance avec les résultats obtenus pour la Région wallonne mais pas pour les tendances significatives positives qui ont été moins recensées.

L’évolution des débits de crue est liée à plusieurs facteurs. La baisse de l’humidité des sols avant les épisodes de crue, engendrée par l’augmentation de l’évapotranspiration, jouerait un rôle dans l’évolution des débits de forte intensité qui n’auraient pas toujours tendance à s’intensifier contrairement à ce qui pourrait être pensé. En effet, la hausse des précipitations liée au changement climatique engendre en théorie une augmentation de ces débits, ce qui n’est pas toujours observé. Une modification au niveau de l’occupation et la maintenance des sols est aussi la cause des mécanismes qui engendrent les crues en altérant l’évapotranspiration, la capacité d’infiltration de l’eau dans le sol, ainsi que les réserves d’eau à la surface et dans les nappes souterraines. De ces changements sont entendus : l’urbanisation en raison de l’imperméabilisation des terres, l’agriculture où les sols peuvent être laissés nus, la déforestation, le drainage insuffisant des zones humides en Wallonie et les ouvrages empêchant les inondations comme les bassins d’orage. Par ailleurs un changement dans la rivière, par exemple au niveau de son tracé a aussi un impact sur la propagation des inondations (Hall et al., 2014).

En 2010, une étude a été menée sur la réponse du changement climatique dans le futur à l’échelle mensuelle sur les débits de la Gette (à Halen), un affluent de l’Escaut et l’Ourthe (à Angleur), un affluent de la Meuse. Le premier se situe en basse altitude dans une zone où les ressources en eau sont peu abondantes contrairement au BV de l’Ourthe au niveau des Ardennes où le relief est plus élevé et les précipitations sont notables toute l’année (Baguis, Pierre et al.,

2010).

Les résultats sur le BV de l'Ourthe ont été obtenus sur base du modèle hydrologique SCHEME et les données climatiques du projet PRUDENCE (Christensen et al., 2007). Ce projet prend en compte des modèles de circulation régionaux. Les projections ont été réalisées sur base des scénarios du "Special Report on Emissions Scenarios" (SRES) mis en place par le GIEC en 2000, qui à ce jour, ne sont plus repris dans leur rapport. Ces scénarios reprennent une combinaison de changements démographiques, de développements économiques, sociaux et technologiques. Ceci se traduit par quatre familles : A1, A2, B1, B2. Ceux utilisés dans cette étude sont les scénarios A2 et B2 où le premier prend en compte des rejets de GES plus importants.

Les débits extrêmes sont analysés en calculant le nombre de fois qu'un certain seuil est dépassé et en regardant les changements de ces débits sur une période de retour de 100 ans. Il en ressort pour l'Ourthe que les conséquences des changements climatiques sont plus graves sur les débits plus faibles. De plus, le nombre de jours où le débit est bas semble aussi augmenter. Ceci concerne en particulier l'été et l'automne. Ces résultats pourraient être expliqués par le changement du régime des précipitations qui sont plus faibles en été et inversement en hiver ainsi que la température et l'ET0 qui sont plus importantes sur l'entièreté de l'année (Baguis et al., 2010).

Pour les deux bassins, une diminution des ressources en eau en été est attendue. Aucune conclusion n'a par contre pu être définie concernant les débits de forte intensité. Les effets du changement climatique semblent être plus importants pour le bassin de l'Ourthe que celui de la Gette. Cependant selon de Wit et al. (2007) et Teutschbein and Seibert (2010), des résultats de simulations peuvent fortement diverger pour une même série de scénario SRES mais en utilisant des MCG ou MCR différents. Il faut donc rester critique.

Plus récemment, au niveau du BV de l'Ourthe, Wyard (2018) a montré qu'en faisant usage du MAR, les phénomènes d'inondations sont en baisse sur la période 1959-2010 en raison d'une diminution de la saison d'enneigement ainsi que de l'accumulation de neige. D'ici la fin du 21ème siècle, tenant compte du scénario RCP8,5, une accélération de ces conditions climatiques favorisant les inondations est attendue. Par contre, aucune tendance significative n'est relevée concernant l'impact des futurs événements de fortes précipitations influençant les inondations.

Les BV de la Lesse et de la Vesdre ont été étudiés par Bauwens et al. (2011). Il en est ressorti que d'ici 2070-2100, une augmentation de 27% et 54% des débits journaliers extrêmes pourraient survenir. A l'inverse, une diminution des faibles débits de 20% à 35% pour une période de retour de 50 ans pourrait se produire également. Les débits de base seraient impactés négativement sur une période de retour de 2 ans et encore plus sur une période de retour de 50 ans. Ceci engendrerait des sécheresses rares mais problématiques impactant la qualité de l'eau.

Chapitre 3

Objectifs

Au vu des changements climatiques et hydrologiques déjà présents dans le monde et en Belgique, et de leur tendance à s'intensifier dans le futur, ayant des conséquences considérables d'un point de vue économique, sociale et environnemental, ce mémoire va s'intéresser aux changements hydrologiques en Wallonie pour comprendre plus spécifiquement ce qu'il se passe dans nos régions. Plus particulièrement, l'étude se penche sur deux bassins versants wallons : le BV de l'Amblève à Martinrive et le BV de l'Ourthe à Tabreux.

Ce travail tente de répondre à la question :

Les variables hydrologiques des bassins versants wallons de l'Amblève à Martinrive et de l'Ourthe à Tabreux ont-elles subi des modifications au cours des 30 dernières années (1991-2022) ? Durant la même période, le fonctionnement hydrologique des bassins versants ont-il été altérés ?

Cet objectif sera atteint à l'aide de la construction d'une base de donnée comprenant toutes les données nécessaires à l'évaluation des ressources en eau au sein des deux bassins versants. Par ces variables, sont entendues : les précipitations, l'évapotranspiration réelle, potentielle et de référence, le niveau des nappes phréatiques ainsi que le débit du cours d'eau à l'exutoire du bassin versant étudié.

Chapitre 4

Matériel et méthodes

4.1 Les bassins versants d'étude de l'Ourthe et de l'Amblève

Situé au Sud-Est de la Belgique dans les Ardennes, le bassin versant de l'Ourthe, tel qu'il est défini par la Région wallonne, est d'une superficie de 1846 km^2 et est intégré dans le bassin fluvial de la Meuse. Ce bassin est principalement drainé par l'Ourthe. Il est le résultat de la convergence entre l'Ourthe occidentale et orientale dont les sources se situent en Ardennes, plus précisément dans la commune de Libramont-Chevigny et Gouvy respectivement. Ce cours d'eau s'étend sur 153km pour ensuite se jeter dans la Meuse au niveau de Liège. La confluence se situe à Angleur à 63m d'altitude. A côté de l'Ourthe occidentale et orientale, un des affluents principaux est l'Amblève.(Service public de Wallonie, 2021).

L'Amblève constitue également un bassin versant qui s'étend sur $1075,2 \text{ km}^2$. La source de l'Amblève se situe proche d'Heppenbach à environ 520 m d'altitude. Long de 93km, ce cours d'eau rejoint l'Ourthe au niveau de Comblain-au-Pont, 420 m plus bas. Un des affluents principaux de l'Amblève est La Warche (Service public de Wallonie, 2021).

La figure 4.1, permet de situer les BV de l'Amblève et de l'Ourthe, inscrits au sein de la Région wallonne.

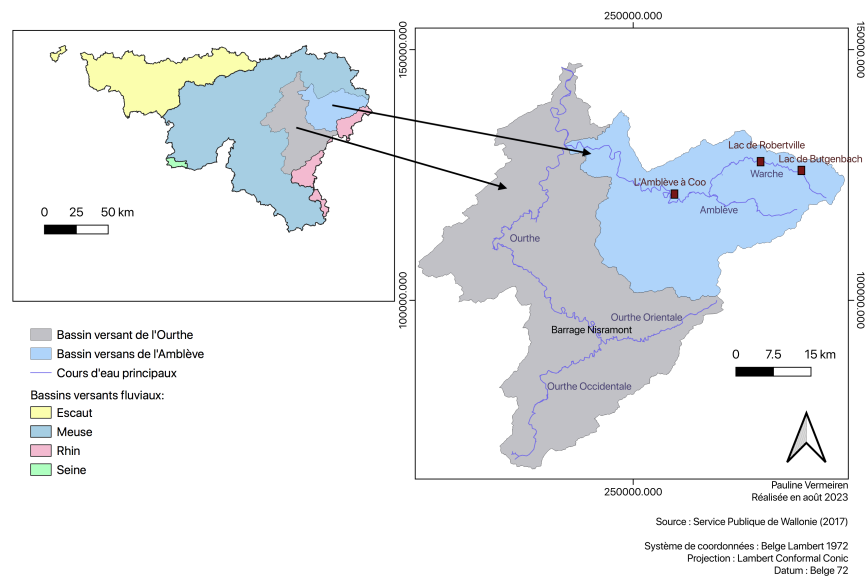


FIGURE 4.1 – Bassin versant de l'Amblève et de l'Ourthe. Les cours d'eau principaux, les plans d'eau principaux en rouge ainsi que le point culminant située à la " Baraque Fraiture" ont été ajoutés.

Le relief du BV de l'Ourthe dont le point culminant se situe à 652m ("La Baraque Fraiture") sur la figure 4.1, est caractérisé par des grandes différences de dénivelés. En effet, une différence de 600m peut être observée entre l'Ardenne et la vallée de la Meuse (Contrat Rivière Ourthe, sd)(figure 4.2).

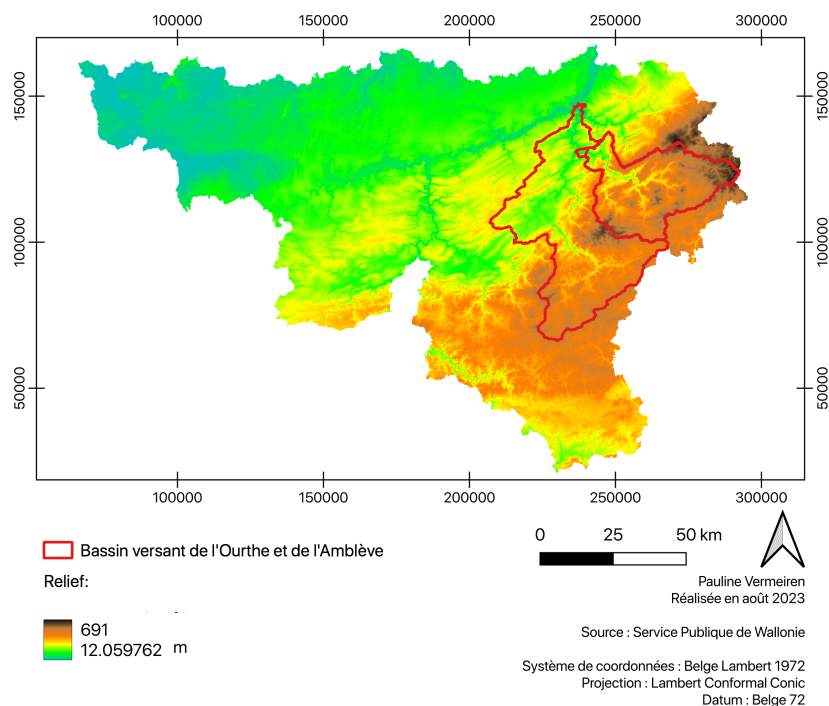


FIGURE 4.2 – Topographie de la Wallonie avec mise en évidence des bassins versant de l'Ourthe et de l'Amblève

Le climat de la Wallonie est de type tempéré océanique. La topographie du territoire joue un rôle où les précipitations annuelles enregistrées sont plus élevées avec l'altitude.

Le régime hydrologique de ces deux bassins est dit : pluvio-évaporal, c'est-à-dire qu'il est constitué de hautes eaux en hiver où les maxima sont enregistrés en janvier et des basses eaux en été avec des minima en août. Les figures E.14 et E.16 présents en annexe E permettent de voir le cycle saisonnier des débits traduisant le régime hydrologique de l'Amblève à Martinrive et de l'Ourthe à Tabreux.

Le barrage de Nisramont datant de 1958, aussi appelé barrage de l'Ourthe est le seul ouvrage hydraulique imposant dans cette région d'étude. Il permet principalement d'approvisionner les vallées de la région en eau potable telles que les communes du plateau de Bastogne et des bassins de l'Ourthe et de l'Aisne, à des quantités de l'ordre de 5 à 6 millions de mètres cubes par an (Service public de Wallonie, 2021).

Du haut de ses 16m de hauteur et 116m de long, il est précédé par un réservoir, le lac de Nisramont en amont de la confluence entre l'Ourthe orientale et occidentale. Ce réservoir contient un volume de retenue de 3 millions de mètre cube. Ce barrage comprend également une centrale hydroélectrique et une station d'épuration traitant les boues et les eaux. Son impact est limité sur le régime hydrologique de l'Ourthe à Tabreux (Service public de Wallonie, 2021).

Au sein du bassin de l'Amblève, les plans d'eaux principaux sont le Lac de Butgenbach (1,20 km² ; 11 hm³) et le Lac de Robertville (0,80 km² ; 7,7 hm³) sur la Warche ainsi que les bassins de Coë (Service public de Wallonie, 2021).

Selon les chiffres de 2018, la population au sein de ce territoire du BV de l'Ourthe s'élevait à plus de 159 000 habitants pour une densité de 86 habitants au kilomètre carré contre 79 621 habitant dont la densité est de 74 habitants au kilomètre carré dans le BV de l'Amblève (Service public de Wallonie, 2021). Ces densités sont faibles comparées à la densité de population au niveau de tout le pays qui s'élève à 377 au kilomètre carré en 2022 (Service Public Fédéral Belge, 2022a). Ces données se traduisent, pour les deux bassins, par une affectation du sol très peu de terres artificialisées c'est-à-dire des terrains résidentiels. En effet, ces bassins est principalement constitué de territoires agricoles englobant des cultures et des prairies, ainsi que des forêts et milieux semi-naturels où la majorité est dédiée à la sylviculture (figure 4.3) (Service public de Wallonie, 2021).

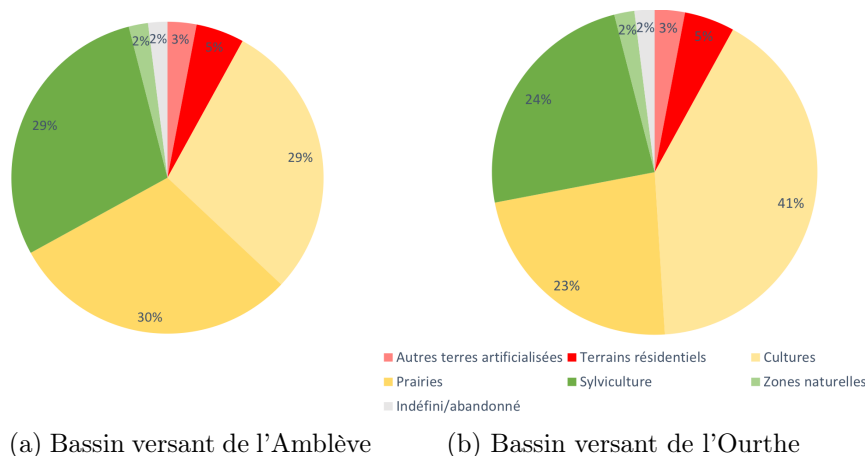


FIGURE 4.3 – Occupation du sol au sein des bassins versants de l'Amblève et de l'Ourthe

Au niveau du souterrain, le BV de l'Ourthe tout comme celui de l'Amblève repose sur deux types principaux de formations aquifères : calcaire du Primaire et massif schisto-gréseux du Dévonien (Primaire). De manière précise, le BV de l'Ourthe englobe en tout cinq masses d'eau souterraines différentes dont trois sont communes au BV de l'Amblève (figure 4.4). Pour information, une masse d'eau souterraine est définie par la DCE comme "un volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères" (SPW - DEE - Direction des Eaux souterraines, 2023).

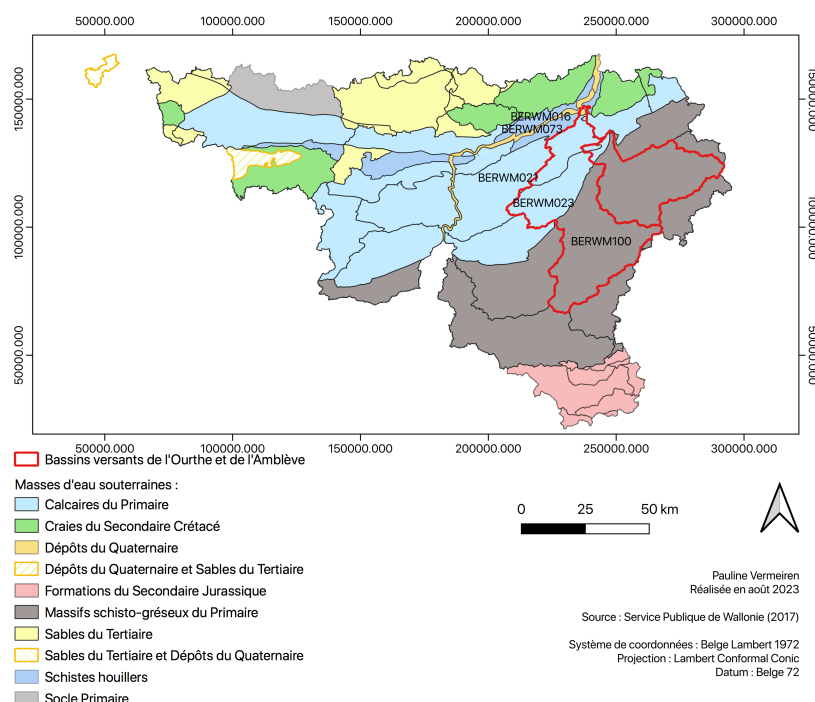


FIGURE 4.4 – Formations aquifères au sein de la Wallonie avec mise en évidence du BV de l'Ourthe et de l'Amblève en rouge. Les code des masses d'eau souterraines présentes dans les deux BV sont indiquées sur la carte.

La formation qui domine les deux bassins est constituée de grès et schistes du massif ardennais. Cette zone contient des dépôts du Dévonien inférieur renfermant des roches dures, plissées

et fracturées, en discordance sur les terrains calédoniens (Service public de Wallonie, 2016).

Le massif schisto-gréseux du Dévonien est fort présent sur le territoire de la Wallonie. Il est principalement constitué de schistes, phyllades, grès, quartzites ainsi que quartzophyllades. Malgré le fait qu'il peut éventuellement s'assécher en été, seulement des faibles volumes d'eau y sont prélevés chaque année. A l'inverse, les Calcaires du Primaire présentent le plus grand volume d'eau prélevé de la région en raison de son importante capacité de production.

A titre d'exemple, en 2019, sur un total de 359,5 millions de mètres cubes pompés en Wallonie, seuls 7,2% provenaient du massif contre 54,6% du Calcaire du Primaire (SPW - DEE - Direction des Eaux souterraines, 2023).

Concernant la réalisation du bilan hydrologique, il est impératif d'avoir une station de mesure limnimétrique, mesurant les débits, à l'exutoire du bassin, soit dans ce cas-ci au point de confluence entre l'Ourthe et la Meuse. N'ayant pas de station limnimétrique à cet endroit-là, le BV a été redélimité à Tabreux dont le code de la station est : 5921. Le BV de l'Amblève a été redéfini à Martinrive (station 6621).

Pour délimiter les BV d'étude, un modèle numérique de terrain (MNT) a été téléchargé à l'aide du site "EarthExplorer-USGS" (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Il a été décidé d'opter pour un MNT provenant de "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM), une mission de la NASA, d'une résolution de 30m. Sur base du MNT ainsi que de la station limnimétrique "5921" et "6621", aux exutoires des bassins, les BV ont pu être redéfinis.

Le logiciel QGIS (Quantum Geographic Information System), en accès libre, a été employé pour réaliser cette tâche sur base du module : "Upslope area".

Les deux BV d'étude obtenus sont illustrés sur la figure 4.5.

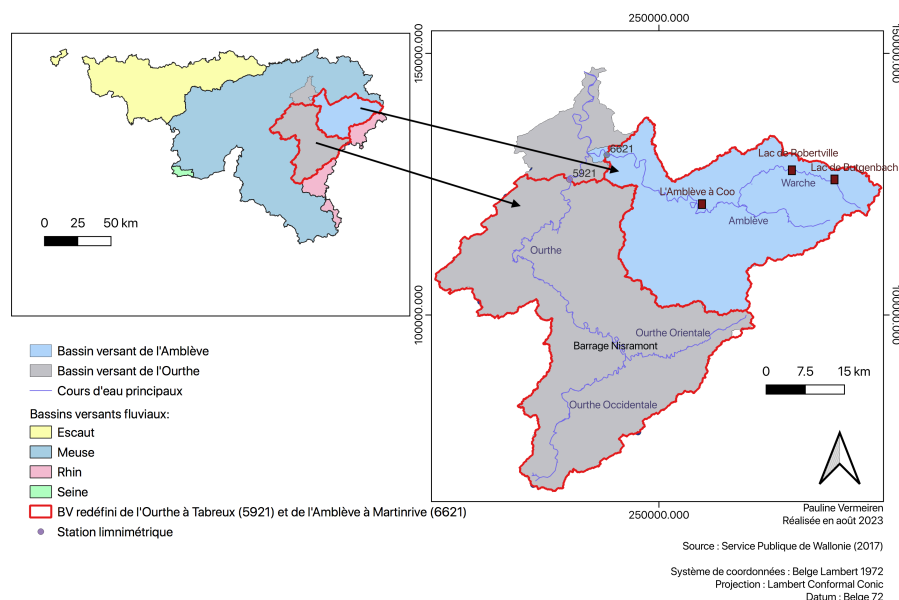


FIGURE 4.5 – Bassin versant de l'Ourthe redéfini à Tabreux représenté par la station limnimétrique 6621 et le Bassin versant de l'Amblève redéfini à Tabreux représenté par la station limnimétrique 5921.

4.2 Bilan hydrologique

L'établissement du bilan hydrologique permet d'évaluer nos capacités à représenter et à estimer les flux principaux du BV sous certaines hypothèses. Il fait office de validation des données. Le bilan étant censé être nul, l'écart par rapport à cette valeur va définir l'erreur sur les variables ou sur nos hypothèses de départ.

Les hypothèses établies sont les suivantes. Tout d'abord, il a été considéré que la surface du BV est alignée au souterrain. Il n'existe pas en Wallonie de bassin qui soit entièrement compris dans une même formation aquifère. Ensuite, il a été établi qu'aucun flux ne rentre dans le bassin ce qui revient à dire que le débit à l'entrée du bassin est nul. Aussi, les prélèvements d'eaux anthropiques étant faibles comparés au reste des flux, cette contribution est négligée dans ce mémoire.

Compte tenu des hypothèses émises, l'équation du bilan hydrologique annuel est reprise ci-dessous (4.1).

$$P - ETR = \int Q_{out} dt \pm \Delta Stock \quad (4.1)$$

Avec :

P = Précipitations annuelles [mm]

ETR = Evapotranspiration réelle annuelle [mm]

$\int Q_{out} = \frac{(\sum Q) * 60 * 60 * 24 * 1000}{S}$ = Débit intégré en mm/an à l'exutoire du bassin versant obtenu en faisant le produit de la somme sur chaque année de Q , le débit journalier en m^3/sec et S , la surface du bassin versant d'étude en m^2

$\Delta Stock = \phi * \Delta Hauteur$ = Variation du stock de la nappe traduit par le produit de la porosité (ϕ) en $[m^3/m^3]$ et de la variation du niveau d'eau dans la nappe ($\Delta Hauteur$) en [mm/an]

Le tableau 4.1 fait la synthèse des différentes sources de données qui ont été employées pour construire des séries temporelles ainsi que l'extension temporelle, les résolutions spatiales et temporelles choisies pour le traitement des données. L'extension spatiale étant le BV d'étude pour l'ensemble des données.

TABLE 4.1 – Tableau de synthèse reprenant les différentes sources de données avec leur résolution spatiale, temporelle ainsi que leur étendue et leur unité.

	Source de données	Extension temporelle	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Unité
Précipitations	Institut Royal Météorologique (IRM)	1991-2022	5km	Journalier	mm
Débit	« Hydrométrie en Wallonie » (https://hydrometrie.wallonie.be/)	1991-2022	Ponctuel (stations sur le BV d'étude)	Journalier	m ³ /sec
ET0	Institut Royal Météorologique (IRM)	1991-2022	5km	Journalier	mm
ETR	MOD16A2 Version 6	2001-2022	500m	Cumulé sur 8 jours	mm/8 jours
ETP	MOD16A2 Version 6	2001-2022	500m	Cumulé sur 8 jours	mm/8jour
Niveau des nappes phréatiques	« Piézométrie en Wallonie » (https://piezometrie.wallonie.be/)	1991-2022 (pas toujours le cas)	Ponctuel (stations sur le BV d'étude)	Journalier / mensuel	m

4.3 Construction de la base de données

Pour mener à bien les objectifs, une base de données est construite. Celle-ci est partagée en deux parties.

Tout d'abord, les données géoréférencées. Celles-ci comprennent les délimitations des BV wallons principaux et fluviaux, les stations limnimétriques et piézométriques. Le réseau hydrographique est également repris ainsi que la carte hydrogéologique. La géolocalisation permet de comprendre où sont relevées toutes une série de données hydrologiques aux stations tels que le débit ou encore le niveau des nappes, mais aussi d'obtenir les surfaces des bassins versants qui serviront à la réalisation du bilan hydrologique annuel. Le logiciel QGIS permet de rendre possible cette visualisation.

Ensuite, un Jupyter Notebook élaboré à l'aide du langage Python est utilisé pour traiter toutes les séries temporelles des données récoltées aux différents points de mesures.

Les données pertinentes pour ce mémoire sont celles donnant la possibilité de calculer le bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant d'étude. Par ailleurs, les données d'évapotranspiration de référence et potentielle seront aussi analysées.

4.3.1 Précipitations

L'**IRM** est en possession d'un réseau météorologique horaire mesurant les variables telles que la température, les précipitations, l'humidité relative, la vitesse du vent ainsi que sa direction. Celui-ci comprend environ 20 stations couvrant l'ensemble du territoire belge. Cet institut s'inscrit également dans un réseau de quatre radars (Jabbeke (2012), Helchteren, Zaventem, Willemsmont (2001)) pour la surveillance de la pluviométrie. Ceux-ci permettent une couverture de toute la Belgique.

Ces radars font partie d'un réseau de 200 radars permettant de suivre les précipitations sur l'entière du continent européen formant des composites toutes les 15 minutes.

Dans le cadre de ce mémoire, les données de précipitations de stations météorologiques ont été utilisées. Les données d'observations sont fournies sous forme d'une maille régulière de 5km sur 5km avec des données en chacun des points couvrant l'intégralité de la Belgique. En effet, à partir des données des stations, plus particulièrement des pluviomètres manuels et automatiques du réseau IRM et SPW/DGO-2, ces dernières sont d'abord pré-traitées par les employés de l'IRM (suppression des outliers ou encore des stations d'observation non fiables). Il est à noter que les données radars ne sont pas employées pour établir la maille fournie. Ensuite, elles sont interpolées spatialement via une méthode de krigeage sur une maille de 1km X 1km sur l'ensemble du territoire. Enfin, la moyenne des pixels de 5km sur 5km est calculée. Ces données sont retraitées par la suite avec des données validées et font donc l'objet d'un contrôle avant d'être ajoutées à la base de données de l'IRM. Les incertitudes liées à cette variable sembleraient donc faibles. Les images radars étant bien trop volumineuses, les données de stations étaient bien plus adéquates à traiter ici.

Comme ces données sont ponctuelles, des manipulations préliminaires ont dû être réalisées. En effet, comme les données reçues sont une interpolation des données de stations météorologiques de l'IRM sur une grille de 5km, il est nécessaire de calculer les précipitations sur les deux BV d'étude uniquement. Toutes ces données n'ont pas la même influence sur la surface de chaque BV. Afin de pondérer chacune d'entre elles, la méthode des polygones de Thiessen a été employée pour associer chaque donnée de précipitation à une certaine surface. Avec l'outil QGIS, les polygones de Thiessen ont été implémentés sur toute la surface de la Belgique. Ensuite, une intersection entre ces polygones et le BV de l'Ourthe à Tabreux a été réalisée, de même pour le BV de l'Amblève à Martinrive (figure 4.6).

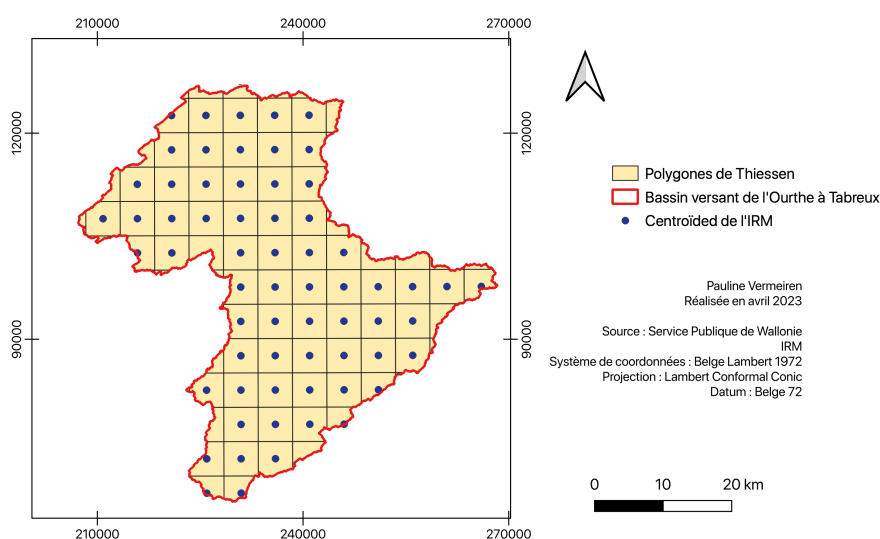


FIGURE 4.6 – Polygones de Thiessen dessinés en beige à l'aide du logiciel QGIS permettant de pondérer les données de chaque centroïde de l'IRM (points bleus) sur la surface du bassin. L'exemple est donné ici pour le BV de l'Ourthe à Tabreux (en rouge).

Ceci a permis ensuite de calculer toutes les surfaces des polygones avec leur donnée de pré-

precipitation respective. Ces données étant des moyennes journalières, elles ont été additionnées et multipliées par la surface de leur polygone correspondant pour ensuite être divisées par la surface totale permettant d'obtenir une moyenne des précipitations sur le BV de l'Amblève à Martinrive ainsi que celui de l'Ourthe à Tabreux (équation 4.2).

$$P_{moy} = \frac{\sum S_i * P_i}{S} \quad (4.2)$$

Avec :

P_{moy} = Précipitation moyenne sur le bassin d'étude [mm]

S_i = Surface du polygone de Thiessen [m^2]

P_i = Précipitation moyenne au niveau de la surface S_i

$S = \sum S_i$ = Surface du BV d'étude [m^2]

4.3.2 Evapotranspiration

Ce mémoire s'intéresse notamment aux données d'évapotranspiration de référence et réelle, déjà définies dans l'état de l'art (section 2.1 et 2.2.3) et potentielle.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente le produit de l'ET0 et d'un coefficient cultural caractérisant le type de culture. Le facteur de correction prend en compte que la paramétrisation de la résistance aérodynamique et de la culture d'une surface végétale diffère de la culture de référence (Gérard Guyot, 1999).

L'évapotranspiration réelle (ETR) peut se traduire notamment par le produit de l'évapotranspiration potentielle et du coefficient de stress (Ks) représentant le stress qu'il soit hydrique, nutritionnel, salin ou encore pathologique (Gérard Guyot, 1999).

En ce qui concerne l'ET0, celle-ci a été fournie par l'IRM. Comme pour les données de précipitations (Section 4.3.1), un pré-traitement a été fait pour obtenir une ET0 moyenne sur chaque BV d'étude à partir de polygones de Thiessen.

Les variables telles que l'ETP et l'ETR sont obtenues à l'aide de satellites. En effet, ces instruments enregistrent en continu et ont pour avantage de ne pas être perturbés par les conditions météorologiques. Des données satellitaires appartenant à MODIS ont été utilisées. Cet instrument fixé aux satellites Terra (EOS AM-1) et Aqua (EOS PM-1) permet d'obtenir des informations de l'ensemble du globe terrestre d'une résolution temporelle de 1 ou 2 jours. Les données de 36 bandes spectrales sont traitées pour tenter de comprendre la dynamique globale ainsi que les processus qui se déroulent sur la terre, dans les océans et dans la basse atmosphère. MODIS est aussi un outil d'aide à la décision quant à la protection de l'environnement (NASA, sd).

C'est important de préciser que les données satellitaires ne sont pas sans incertitudes. La validation de l'algorithme du produit MOD16A4 version 6 utilisé dans ce mémoire, a été réalisée sur base du flux de chaleur latente enregistré pour 46 tours de flux de covariance de Foucault sur 236 bassins versants répartis dans le monde ainsi que des données météorologiques GMAO entre 2000 et 2010. Il en a résulté une erreur moyenne absolue de 24% (W. Running et al., 2019).

L'acquisition des données d'ETP et ETR du produit MOD16A2 version 6 pour la région d'intérêt a été réalisée à l'aide de Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>), une plate-forme d'analyse géospatiale disponible sur le cloud de Google.

Il est à noter que les données de MODIS ne sont disponibles que depuis 2001 ce qui ne permet pas de réaliser une analyse sur une période de 30 ans.

De plus, il est important remarquer que les données d'ET0 sont journalières contrairement à l'ETP et ETR de MODIS qui elles sont cumulées sur 8 jours. Avant d'être traitées, l'hypothèse que l'évapotranspiration est la même durant huit jours est faite. C'est pourquoi, les données cumulées sont divisées par huit et sont associées ensuite à chaque jour couvrant la période de huit jours. En outre, les valeurs -9999 présentes pour les mois de décembre dans les séries d'ETR ont été remplacées par des données sans valeurs.

4.3.3 Débit

La Wallonie possède deux principaux réseaux de mesures continues, « Water COntrol DATA system for Hydrology and water management » (WACONDAH) et AQUALIM, pour analyser les variables telles que le débit des cours d'eau et les précipitations. Toutes leurs données ont récemment été fusionnées sur un seul et unique site : "l'Hydrométrie en Wallonie" (<https://hydrometrie.wallonie.be/>).

Ces deux réseaux sont gérés par deux entités différentes. Premièrement, WACONDAH est sous la gestion de la Direction de la Gestion hydrologique (DGH) du Service public de Wallonie "Mobilité et Infrastructure". Celui-ci opte entre autres pour la prévision des crues, étiages et la gestion des voies hydrauliques et des réservoirs. Ce réseau concerne principalement les cours d'eau navigables. Les outils détaillés que reprend ce réseau sont cités en annexe B de ce rapport.

Les données disponibles ont une résolution temporelle de 5 minutes et parfois même de l'ordre de la minute. Celles-ci sont soumises à un contrôle de qualité indispensable pour s'assurer de la pertinence et de la qualité des données. Divers contrôles tels que des prélèvements aux stations de mesures ou encore de la comparaison entre stations pour en vérifier la cohérence, aide à valider les données d'élévation du niveau des eaux (Service public de Wallonie, sda).

Le réseau AQUALIM, géré par la DCENN, se penche sur les cours d'eau non navigables. Des stations limnimétriques permettent de récolter des informations sur le débit des cours d'eau. Ces stations, au nombre de 220, sont placées le long des cours d'eau et 30 sont situées au niveau de zones d'immersion temporaire. Celles-ci ont pour but de surveiller les éventuelles inondations. La résolution temporelle des relevées est de l'ordre de 20 min. Un contrôle est aussi effectué au niveau de la qualité. En effet, les données sont analysées pour en ressortir les incohérences. Des observations in situ sont également réalisées (Service public de Wallonie, sda).

Dans ce mémoire, les stations à l'exutoire des deux BV redéfinis sont traitées. Il s'agit de la station 6621 à Martinrive et 5921 à Tabreux pour le BV de l'Amblève et de l'Ourthe respective-

ment.

Ce sont des stations limnimétriques classiques. Le débit est calculé en utilisant une courbe de tarage, soit une relation univoque entre la hauteur (mesurée en continu) et le débit. Cette courbe est établie à partir de jaugeages réguliers tels que des mesures ponctuelles de débit.

La mesure du débit est complexe et comprend une succession de sources d'erreur au niveau de la mesure de la hauteur au limnimètre, au niveau des jaugeages effectués, au niveau du calcul de la courbe de tarage, en fonction de l'extrapolation de la courbe de tarage tant vers le bas que vers le haut (en dehors de la plage des jaugeages associés à la courbe) ou encore en fonction des conditions en rivière (herbes, gel, ...). Cette erreur augmente davantage à bas débits.

La courbe de tarage est construite en limitant les écarts entre les jaugeages et cette courbe à 10%. Il est donc considéré que l'erreur absolue est de 10% pour les deux stations.

4.3.4 Niveau des nappes phréatiques

Le niveau des nappes souterraines en Wallonie est suivi par un réseau de surveillance DESo. Celui-ci est constitué de 260 stations piézométriques. Ces données mensuelles ou journalières sont téléchargeables sur le site de « La Piézométrie en Wallonie » (<https://piezometrie.wallonie.be/>). Elles permettent de manière simple de voir l'état hydrologique des nappes souterraines. Ces piézomètres peuvent mesurer le niveau de nappes qu'elles soient libres ou captives (figure 4.7).

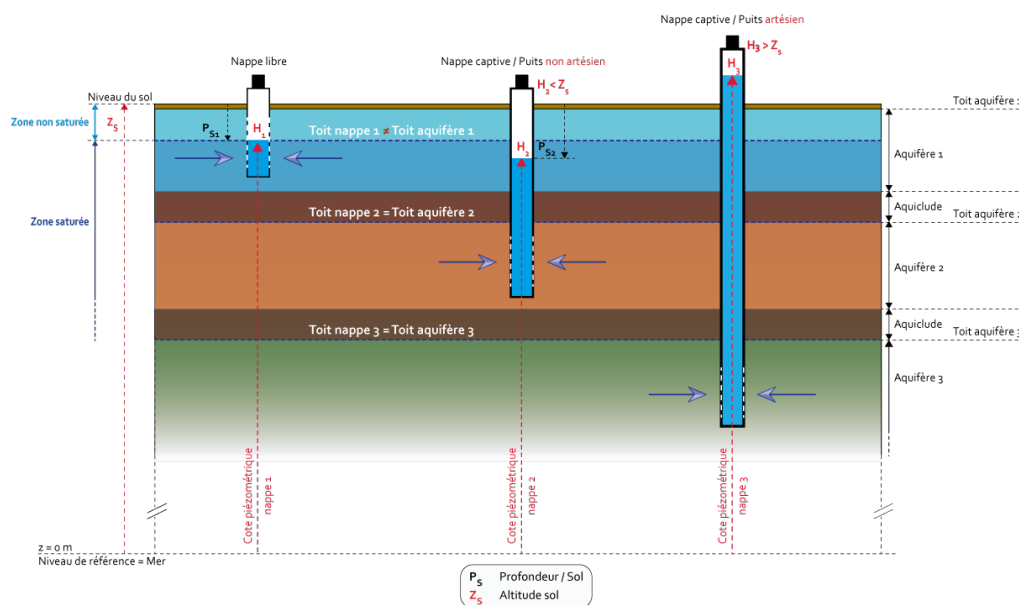


FIGURE 4.7 – Niveau piézométrique au sein d'une nappe libre, captive avec un puits non artésien et captive avec un puits artésien (Service public de Wallonie, sdb)

La côte piézométrique (H) correspond au niveau de l'eau à l'intérieur du piézomètre au sein de l'aquifère. En d'autres mots c'est la différence entre l'altitude (Z) vis-à-vis du niveau de la mer et la profondeur de l'eau souterraine (P). La profondeur étant le niveau auquel l'eau arrive

à la zone saturée de la nappe, autrement dit, son toit.

Au sein du BV de l'Amblève à Martinrive et de l'Ourthe à Tabreux, se trouvent trois et six stations piézométriques respectivement. Elles sont toutes des puits forés sauf la station PZ7067 située dans le BV de l'Amblève qui est un puits traditionnel (figure ??).

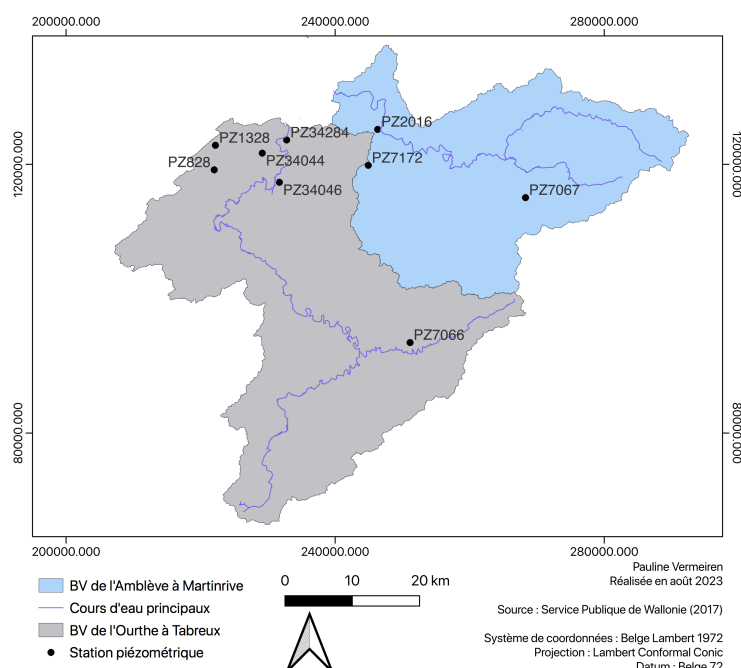


FIGURE 4.8 – Stations piézométriques en noir présentes au sein des BV de l'Ourthe à Tabreux (en gris) et de l'Amblève (en bleu)

Les piézomètres reposent sur différents types de formations géologiques. Ces dernières sont partagées en unités hydrogéologiques suivant leur caractère hydrodynamique. En effet, l'eau ne circule pas de la même manière en fonction de la nature de la roche ou encore de sa cohésion ou de sa structure. Les notions d'aquifères, aquitards ou encore d'aquicludes sont employées pour les caractériser. La différence entre ces trois termes repose sur le caractère perméable qui est important pour les aquifères et très faible pour les aquicludes rendant la prise d'eau plus difficile. Ces appellations sont à prendre avec un certain recul en raison de certaines nuances et exceptions en fonction du contexte et de ceux qui exploitent la nappe (Service public de Wallonie, sdb).

Le site de la "**Carte hydrogéologique de Wallonie**" permet d'obtenir des informations détaillées sur chaque unité, notamment les coupes hydrogéologiques qui sont observables en annexe C. Par ailleurs, sur base de l'hydrogéologie, il est possible de faire des estimations de la porosité de chaque sol dans lequel se situe le piézomètre. Celle-ci caractérise la capacité de la roche à retenir l'eau. Les services publics se basent sur un tableau de référence reprenant différentes porosités totales et effectives pour différentes lithologies (annexe D). Pour information, la porosité totale est le rapport entre le volume des vides et le volume total alors que la porosité effective, je cite, se définit comme le rapport entre "volume d'eau contenue dans un matériau pouvant être libérée sous l'effet de la gravité et volume total du milieu qui la contient" (Service Public de Wallonie, sd). Le tableau 4.2 reprend les différentes stations ainsi que leur unité hydrogéologique

et leur porosité effective estimée sur base des informations hydrogéologiques.

TABLE 4.2 – Stations piézométriques du bassin d'étude avec leur unité hydrogéologique correspondante

Unité hydrogéologique	Identifiant de la station piézométrique	Partie de la Carte hydrogéologique	Porosité effective [%]
Dévonien			
Aquifère des calcaires du Givetien	PZ34284	Hamoir-Ferrière 49/5-6	1
Aquifère des calcaires du Frasnien	PZ4046	Durbuy - Mormont 55/1-2	2
Aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien inférieur	PZ2016	Harze - La Gleize 49/ 7-8	1
Eodévonien			
Aquiclude à niveaux aquifère de Villé	PZ7066	Wibrin - Houffalize 60/3-4	1
Carbonifère			
Aquifère-Aquitard-Aquiclude de l'Hastarien	PZ34044	Hamoir-Ferrière 49/5-6	2
Aquifères des calcaires du Carbonifère	PZ828	Modave -Clavier 48/7-8	5
	PZ1328		5
Cambro-siluriennes			
Aquitard à niveaux aquifères du socle cambro-silurien	PZ7067	Vielsam-Houvegnèz 56/1-2	1
Aquiclude à niveaux aquifères du socle cambro-silurien	PZ7172	Harze - La Gleize 49/ 7-8	1

Les données mises à disposition ne sont pas toujours continues ni journalières. Globalement les données sont journalières à partir de 2010.

Il est à remarquer que sur la période d'intérêt (1991-2022), les données ont été collectées au moyen de mesures manuelles. Progressivement à partir de 2010-2013, des sondes automatiques de pression ont été mises en place. La précision de la mesure est, quelle que soit la méthode, de l'ordre de deux centimètres.

4.4 Traitement des données

4.4.1 Bilan hydrologique

Des traitements de données ont été préalablement faits avant de le calculer selon l'équation 4.1, présentée plus haut.

L'année hydrologique a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. De cette manière, la variation du niveau des nappes a été calculée en prenant la différence entre tous les premiers octobre de chaque année. Par exemple, la variation du stock mesurée en 2012 est la différence entre le premier octobre 2012 et 2011.

Une fois que la variation du niveau des nappes est calculée, il est nécessaire de l'intégrer sur chaque BV d'étude. Pour ce faire celle-ci est multipliée pour chaque nappe par sa porosité propre à la lithologie dont elle est constituée (annexe D). Les différences de stock de chaque station sont associées à une surface en utilisant les polygones de Thiessen comme pour le calcul de l'ET0 et des précipitations. Il est à remarquer que pour obtenir cette intégration, il est nécessaire d'avoir des données pour une même série d'années consécutives. C'est pourquoi, in fine, certaines stations piézométriques ne sont pas employées. En effet, l'objectif est d'obtenir une série temporelle qui

soit la plus longue possible dans le temps.

4.4.2 Analyse des tendances sur les variables hydrologiques

Une fois le bilan hydrologique calculé pour voir si celui-ci est bien nul et que donc les données sont fiables, les variables hydrologiques du bilan sont analysées séparément.

Une régression linéaire est effectuée à l'aide de la méthode des moindres carrés ordinaires (OLS) pour analyser des données annuelles, semestrielles et saisonnières. Étant donné que ce sont les données moyennées qui sont analysées, la saisonnalité n'est plus présente ce qui rend le choix d'une régression linéaire tout à fait opportun. Les pentes sont considérées significatives si la p-valeur est inférieure à 0,05.

Comme la majorité des données remontent sur une série chronologique d'au moins 30 ans, il a été choisi de regarder les changements des variables hydrologiques sur le bassin d'étude pour la période 1991-2022. Seules les variables d'ETR et ETP ne peuvent pas être analysés sur cette période compte tenu que les données du produit MODIS ne remontent que jusque 2001. L'objectif sera alors de voir si un changement a été observé sur la période entre 2001 et 2022.

A côté de ces variables, les tendances sur l'ETP et ET0 annuelles ont aussi été analysées.

Analyse des précipitations, de l'ETR et de la différence entre les précipitations et l'ETR

Les tendances annuelles, semestrielles et saisonnières (4 périodes de 3 mois) sont analysées pour les données de précipitations, ETR et de l'eau utile traduisant la différence entre ces deux variables.

Les semestres comprennent la période hivernale d'octobre à mars et estivale d'avril à septembre de chaque années hydrologique.

Il a été mis comme hypothèse que les saisons représentent les périodes reprises dans le tableau 4.3 ci-dessous.

TABLE 4.3 – Durée des saisons considérées

Saison	Durée prise en compte
Automne	1 octobre - 31 décembre
Hiver	1 janvier - 31 mars
Printemps	1 avril - 30 juin
Été	1 juillet - 30 septembre

Les extrêmes ont aussi fait l'objet d'une attention particulière. Les précipitations abondantes dont la lame d'eau précipitée sur la journée est supérieure à 20mm, son analysées au travers du nombre de jours de fortes pluies calculé chaque année, sur chaque semestre et chaque saison.

Le nombre de jours sans pluie (précipitations journalières inférieure à 1 mm) est aussi traité ainsi que le maximum du nombre de jours consécutifs sans pluie traduisant les périodes de sécheresses.

Ces indices sont aussi calculés pour chaque période de temps.

Par ailleurs, le percentile 95, donnant un aperçu des données les plus élevées, est calculé pour les trois variables uniquement sur la saison de l'été.

Débits

Afin d'approfondir les recherches sur l'état des ressources en eau et plus particulièrement le régime des débits dans les deux bassins d'étude, il a notamment été choisi de faire usage des Indicateurs d'Altération Hydrologique (IAH).

Un programme a été mis en place par les scientifiques de "The Nature Conservancy" pour traiter facilement ces indicateurs d'une façon écologiquement significative. Celui-ci est largement utilisé dans le monde entier. 67 paramètres statistiques écologiques peuvent être traités à partir de séries temporelles à l'échelle journalière. Ces paramètres sont partagés en deux catégories, les paramètres IAH (33) et les "Environmental Flow Component"(EFC)(34).

Les indicateurs IAH peuvent être répartis en cinq groupes distincts cités comme suit :

- Group 1 : **Magnitude** of monthly water conditions
- Group 2 : Magnitude and **duration** of annual extreme water conditions
- Group 3 : **Timing** of annual extreme water conditions
- Group 4 : Frequency and **duration** of high and low pulses
- Group 5 : Rate of frequency of water conditions **changes**

Les IAH permettent d'obtenir des paramètres pour cinq types de EFC, c'est-à-dire :

- Type 1 : Monthly low flows
- Type 2 : Extreme low flows
- Type 3 : High flow pulses
- Type 4 : Small floods
- Type 5 : Large floods

Il est possible de comparer deux périodes entre elles pour, par exemple, voir l'impact de l'installation d'un nouvel ouvrage. Dans le cadre de ce mémoire, une seule période est analysée, du 1 octobre 1991 au 30 septembre 2022 à l'exutoire du bassin d'étude.

Plus particulièrement, ce qui va être intéressant ici c'est par exemple de voir si sur les 30 dernières années, la fréquence des périodes de sécheresse augmente ou diminue significativement. Voir des changements au niveau des inondations est aussi possible.

L'algorithme utilisé est calibré de telle sorte que cinq composantes de flux soient distinguées. Le tableau 4.4 ci-dessous représente toutes les statistiques définissant chacun de ces flux pris en compte dans l'algorithme.

TABLE 4.4 – Définition des cinq composantes de débits utilisés dans l’algorithme du logiciel IAH pour calculer les EFC sur la période du premier octobre 1991 jusqu’au 30 septembre 2022

Composante de flux	Définition statistique
High Flows	Débit supérieur à 75% des débits journaliers pour la période d’étude
Low Flows	Débit inférieur à 75% des débits journaliers pour la période d’étude
Small Flood	"High Flow" initial avec un débit de pointe supérieur à une période de retour de 2 ans
Large Flood	"High Flow" initial avec un débit de pointe supérieur à une période de retour de 10 ans
Extreme Low Flow	"Low Flow" initial inférieur à 10 % des débits journaliers pour la période d’étude

Les analyses ont été faites sur base de statistiques non paramétriques caractérisées par la médiane et le percentile. Il a été choisi d’utiliser ceci plutôt qu’une analyse paramétrique étant donné que la distribution des débits n’est pas normale. Ceci est d’ailleurs le cas pour la plupart des jeux de données hydrologiques.

Tous les indicateurs ont été calculés via le logiciel. Seuls ont été retenus les indicateurs qui ont évolué de manière significative, c’est-à-dire dont la p-valeur est inférieure à 0,05. En effet, le logiciel fournit des résultats d’une régression linéaire établie pour chaque paramètre hydrologique au cours de la période d’enregistrement. Ces statistiques sont calculées à partir des valeurs annuelles de la série temporelle de débit. La p-valeur est calculée par rapport à la pente de la droite de régression ajustée par les moindres carrés.

Par ailleurs, les débits médians représentés par le percentile 50, débits de crue (percentile 97) ainsi que les débits d’étiage (percentile 2,7) sont abordés.

Chapitre 5

Résultats

5.1 Bilan hydrologique annuel

A partir des séries temporelles journalières de l'ETR, des précipitations, du débit ainsi que du niveau des nappes phréatiques, ces variables sont intégrées sur les BV et le bilan hydrologique annuel est construit. Les séries complètes peuvent être visualisées en annexe E.

La figure 5.1 montre les différentes variables hydrologiques agrégées par année pour voir leur contribution dans le bilan hydrologique annuel du BV de l'Amblève à Martinrive.

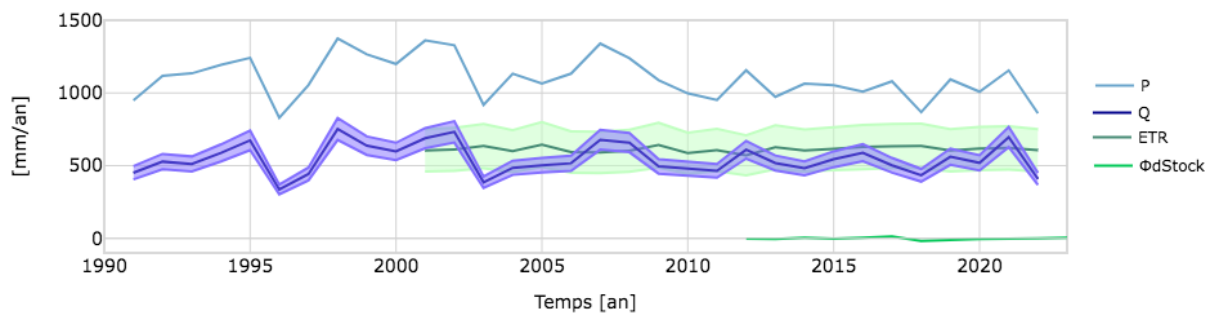


FIGURE 5.1 – Comparaison des différentes composantes du bilan hydrologique du BV d'étude de l'Amblève à Martinrive. La courbe bleue représente les précipitations annuelles (P) au sein du BV, la courbe mauve concerne le débit intégré (Q) avec la bande représentant son erreur absolue qui est de 10%. L'ETR annuelle (ETR) est représentée en vert foncé avec aussi son incertitude qui est de 24%. L'intégration du stock d'eau est représenté par la courbe en vert clair.

Le bilan hydrologique annuel sur la figure 5.2 est respecté lorsque les incertitudes sur les données de débits intégrés et d'ETR sont prises en compte. Autrement dit, les deux membres de l'équation du bilan se superposent. Ceux-ci sont représentés par, d'un côté, la différence entre les précipitations et l'ETR, et d'un autre côté par le débit intégré. De plus, à partir de 2009 le bilan se dégrade jusqu'à présent. Cette figure montre aussi que la contribution du stock de la nappe est négligeable dans le bilan hydrologique.

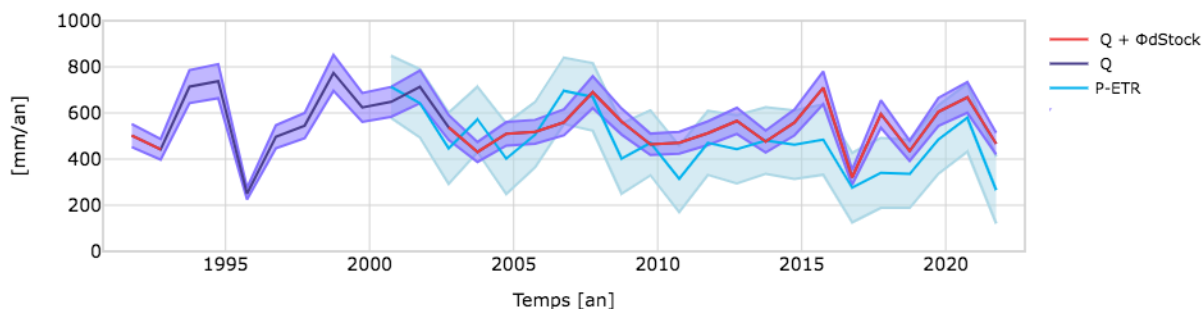


FIGURE 5.2 – Bilan hydrologique pour le bassin d'étude de l'Amblève avec le membre de gauche de l'équation 4.1 qui est représenté par la courbe bleue P-ETR qui ne sont autre que la différence entre les précipitations annuelles (P) et l'évapotranspiration réelle annuelle (ETR). L'erreur absolue sur l'ETR de 24% a été prise en compte dans P-ETR et est représenté par la bande bleue claire. Le débit intégré (Q) chaque année est représentée par la courbe mauve et son erreur absolue de 10% par la bande mauve. Les points rouges représentent le membre de droite de l'équation 4.1 qui reprend la somme du débit intégré sur la zone d'étude et l'intégration du stock d'eau ($Q + \phi d\text{Stock}$). Les données de la variation du stock d'eau n'étant pas disponibles pour toute la période étudiée, il a été choisi de distinguer cette addition du débit intégré seul.

D'autres produits satellites ont été testé pour voir si l'ETR pouvait être mieux estimée que par MODIS. Des données d'ETR provenant du "Global Land Data Assimilation System" (GLDAS) version 2.2 (GLDAS_CLSM025_DA1_D) de résolution spatiale $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ et du produit ERA5 (ERA5_LAND/DAILY_AGGR) de résolution spatiale $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, ont été utilisés. Le produit GLDAS fournit directement l'ETR tandis que le produit d'ERA5 donne le flux de chaleur latente de surface qui est converti en ETR. Au vu de la figure 5.3, il en a été conclu que MODIS est la solution la moins mauvaise pour estimer l'ETR au sein des BV.

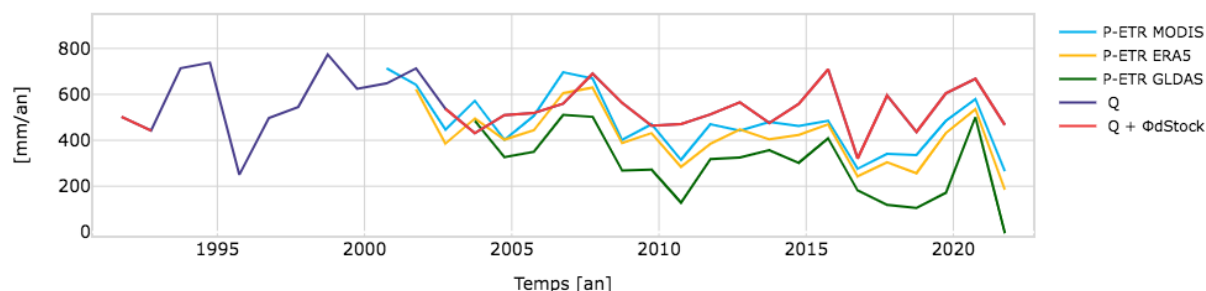


FIGURE 5.3 – Comparaison des différents produit d'ETR issues de MODIS (en bleu), GLDAS (en vert) et ERA5 (en jaune) pour voir lequel estime le plus correctement l'ETR au niveau du BV de l'Amblève à Martinrive. La courbe mauve représente le débit intégré sur le BV et la rouge la somme du débit intégré sur le BV et l'intégration du stock d'eau de la nappe sur le BV.

L'écart annuel entre la courbe de débit intégré et P-ETR a été calculé afin d'évaluer si cette erreur était liée à une des variables en particulier.

Il est observé que l'erreur augmente avec les pertes et diminue avec les entrées. En effet, la figure 5.7 prouve que l'écart augmente avec l'ETR qui augmente (figure 5.4b). Par contre cet écart augmente lorsque les précipitations (figure 5.4c) et le débit intégré (figure 5.4a) diminuent.

La pente de la droite est significative pour les précipitations (p-valeur=0,0119) (figure 5.4c) et pour l'ETR (p-valeur=0,0023) (figure 5.4b). Par conséquent, les pluies sembleraient être sures-

timées contrairement à l'ETR qui serait sous-estimée. Autrement dit, les années sèches posent problèmes.

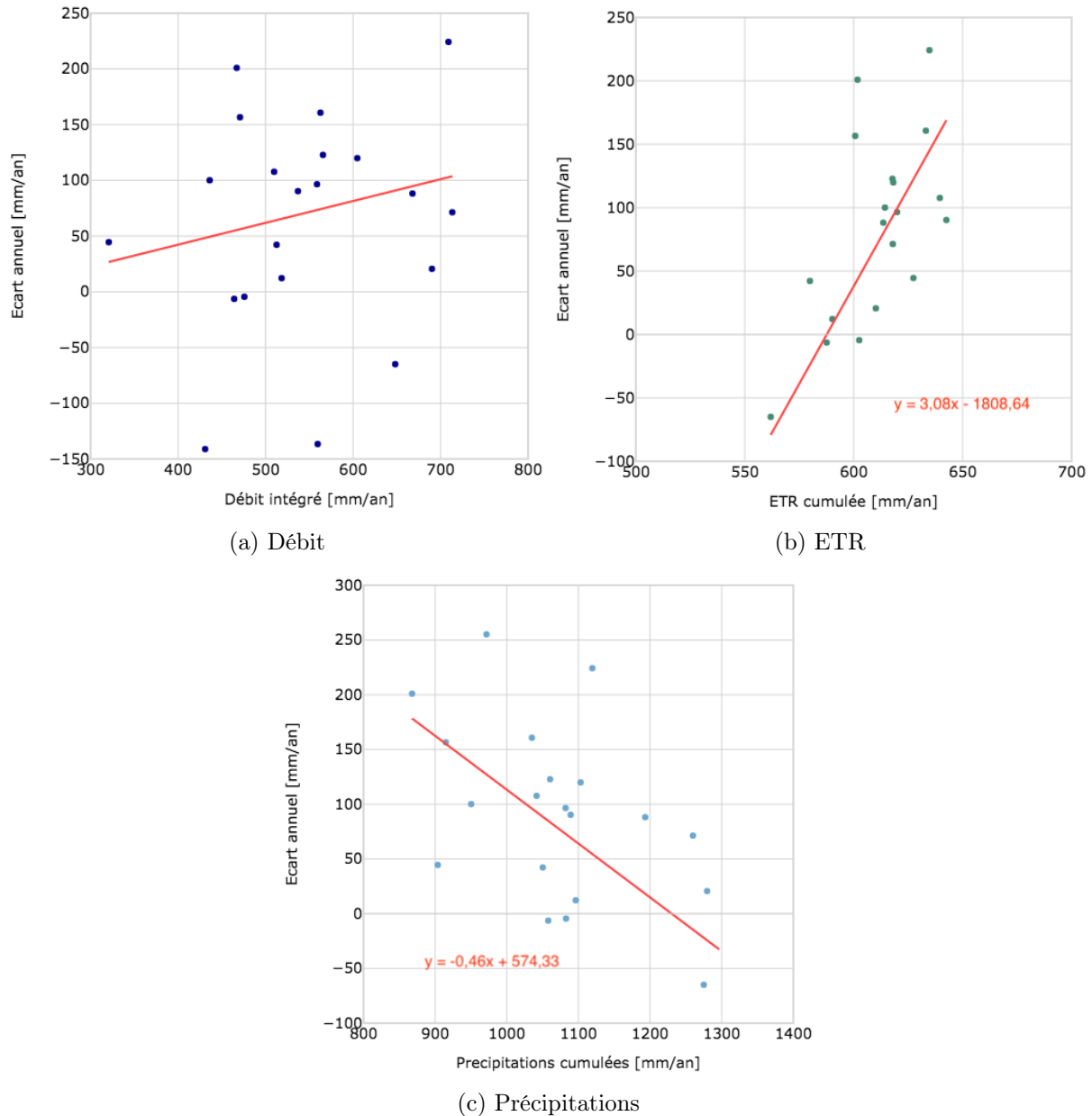


FIGURE 5.4 – Écart calculé en prenant la différence entre P-ETR et le débit intégré mis en fonction des précipitations (en bleu), ETR (en vert) et des débits en mauve. Une droite de régression est associée à chaque jeu de données et permet de tester la significativité (BV étude Amblève à Martinrive)

Les mêmes constatations sont tirées pour le BV de l'Ourthe concernant le bilan hydrologique (figure 5.5). Néanmoins, même si cette contribution reste négligeable, le stock influence plus le bilan que celui de l'Amblève à Martinrive (figure 5.6). Aussi, pour ce qui est de l'écart annuel entre la courbe de débit intégré et P-ETR, seule la relation entre l'écart et les précipitations est significative (p -valeur=0,007). Les précipitations diminuent lorsque l'écart augmente (figure 5.7c). Comme pour l'Amblève, les précipitations au sein du BV d'étude de l'Ourthe à Tabreux seraient surestimées.

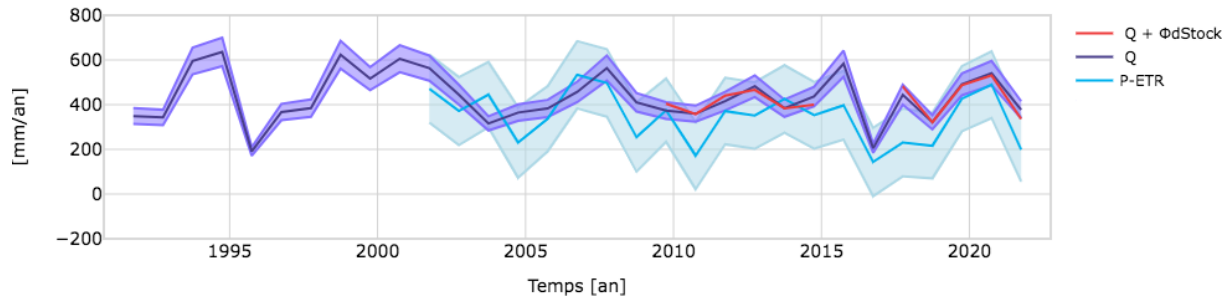


FIGURE 5.5 – Bilan hydrologique pour le bassin d'étude de l'Ourthe avec le membre de gauche de l'équation 4.1 qui est représenté par la différence entre les précipitations annuelles (P) et l'évapotranspiration réelle annuelle (ETR), la courbe bleue. L'erreur absolue sur l'ETR de 24% a été prise en compte dans P-ETR et est représenté par la bande bleue claire. Le débit intégré (Q) chaque année est représenté par la courbe mauve et son erreur absolue de 10% par la bande mauve. Les points rouges représentent le membre de droite de l'équation 4.1 qui reprend la somme du débit intégré sur la zone d'étude et l'intégration du stock d'eau ($Q + \phi d\text{Stock}$). Les données de la variation du stock d'eau n'étant pas disponibles pour toute la période étudiée, il a été choisi de distinguer cette addition du débit intégré seul.

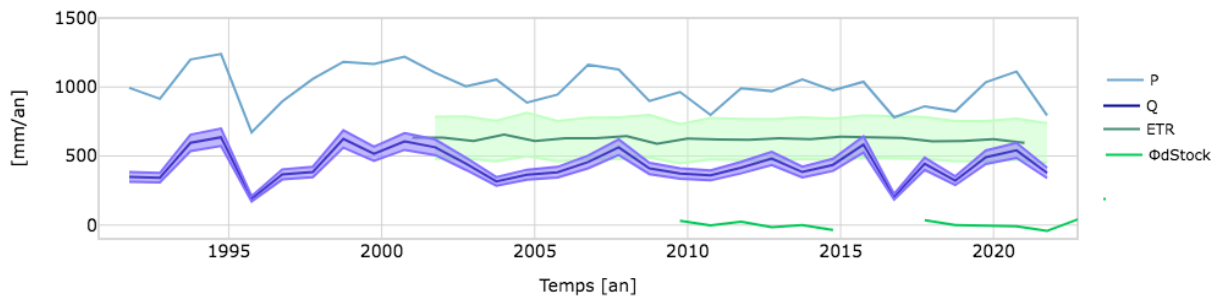


FIGURE 5.6 – Comparaison des différentes composantes du bilan hydrologique du bassin d'étude de l'Ourthe. La courbe bleue représente les précipitations annuelles (P) au sein du BV, la courbe mauve concerne le débit intégré (Q) avec la bande représentant son erreur absolue qui est de 10%. L'ETR annuelle est représentée en vert foncé avec aussi son incertitude qui est de 24%. L'intégration du stock d'eau est représentée par la courbe en vert clair ($Q + \phi d\text{Stock}$).

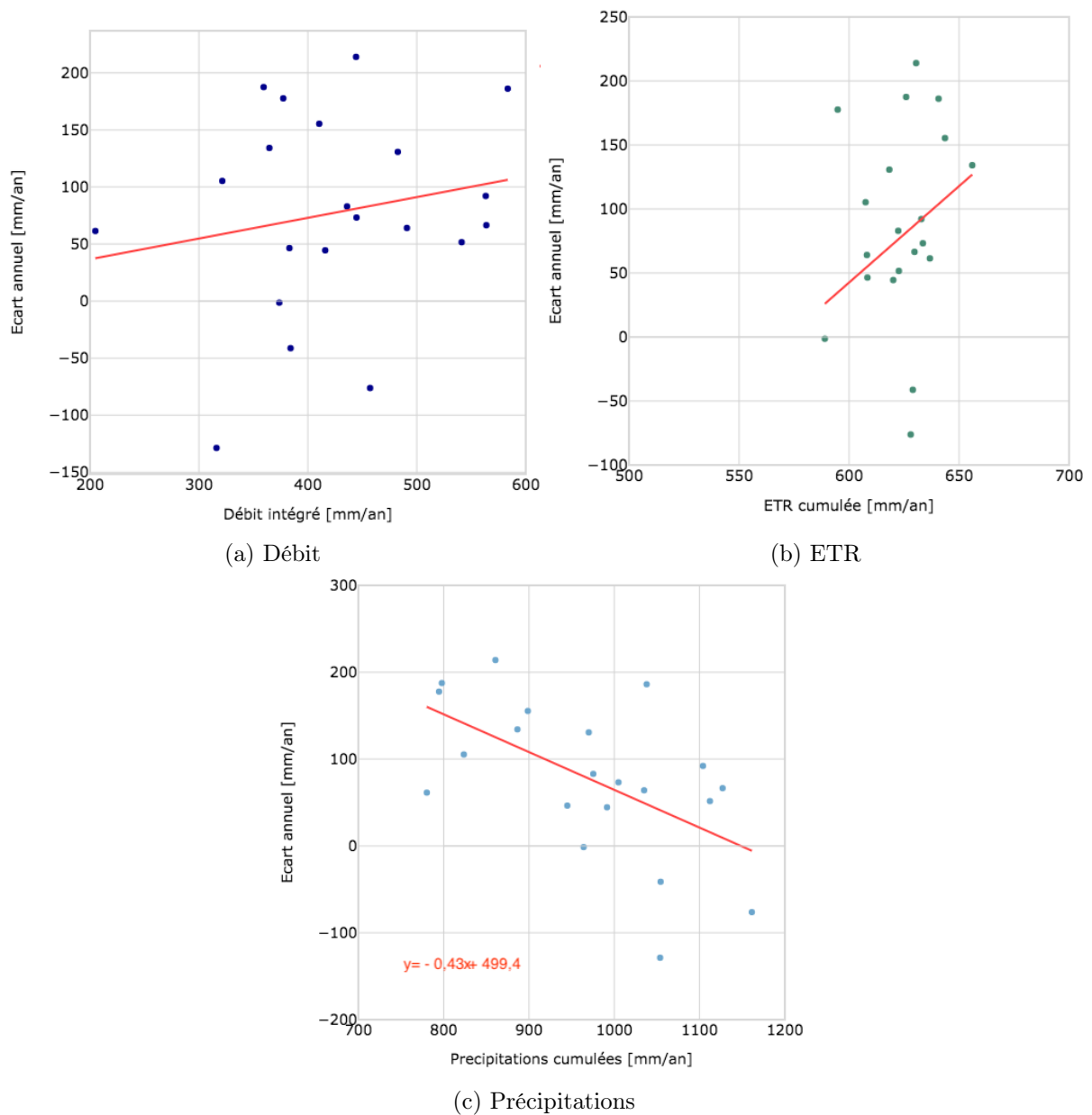


FIGURE 5.7 – Écart calculé en prenant la différence entre P-ETR et le débit intégré mis en fonction des précipitations(en bleu), ETR (en vert) et des débits (en mauve). Une droite de régression est associée à chaque jeu de données et permet de tester la significativité de la pente (BV étude Ourthe à Tabreux).

Le bilan hydrologique annuel est prouvé. Les données utilisées sont donc assez fiables et peuvent faire l'objet d'une analyse de tendances pour voir si les variables hydrologiques ont changé sur les 30 dernières années.

5.2 Analyse des tendances des variables hydrologiques

5.2.1 Précipitations

Le jeu de données des précipitations du bassin de l'Amblève à Martinrive et de l'Ourthe à Tabreux peut être visualisé en annexe E. La figure 5.8 montre que les précipitations annuelles diminuent significativement sur la période 1991-2022 pour le BV d'étude de l'Amblève à Martinrive (p -valeur=0,098) selon l'équation $y = -6,5876x + 1,433.10^4$. Cette variable baisse également pour le BV d'étude de l'Ourthe à Tabreux mais pas de manière significative bien qu'elle s'en rapproche (annexe F - Figure F.1).

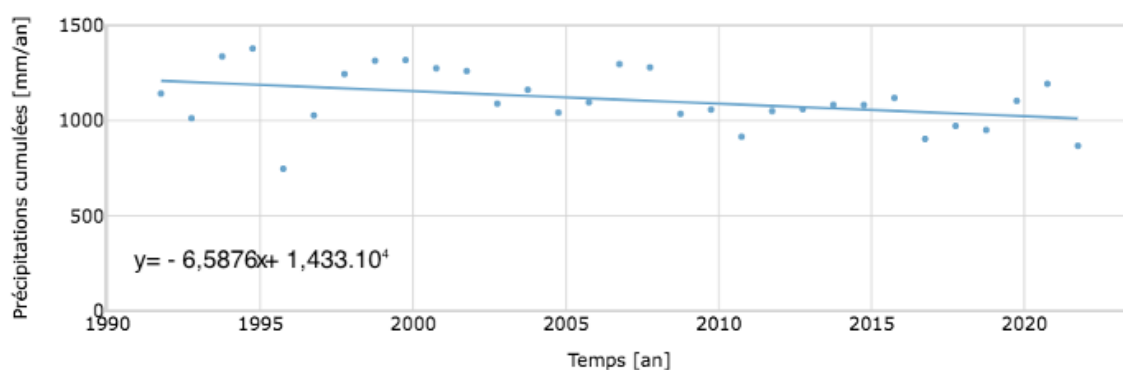


FIGURE 5.8 – Précipitations cumulées chaque année sur la période 1991-2022 au sein du BV d'étude de l'Amblève à Martinrive avec une droite de régression linéaire [mm/an]

Par ailleurs, il est remarqué que depuis 2008, seule une année est arrivée à la normale (égale à 1110,11 mm/an) et une l'a dépassée (figure 5.9).

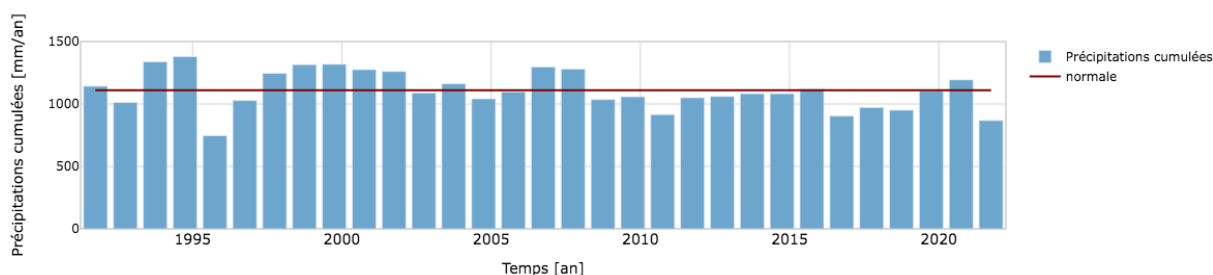


FIGURE 5.9 – Précipitations cumulées chaque année sur la période 1991-2022 sur le BV de l'Amblève à Martinrive avec la moyenne des précipitations cumulées sur la période considérée représentée par la droite rouge [mm/an].

La figure 5.10 appuie sur le fait que les précipitations annuelles sont en baisse. Malgré que la tendance ne soit pas significative pour le BV d'étude de l'Ourthe, la différence à la normale illustre bien que les pluies diminuent depuis 2008 (figure 5.10b).

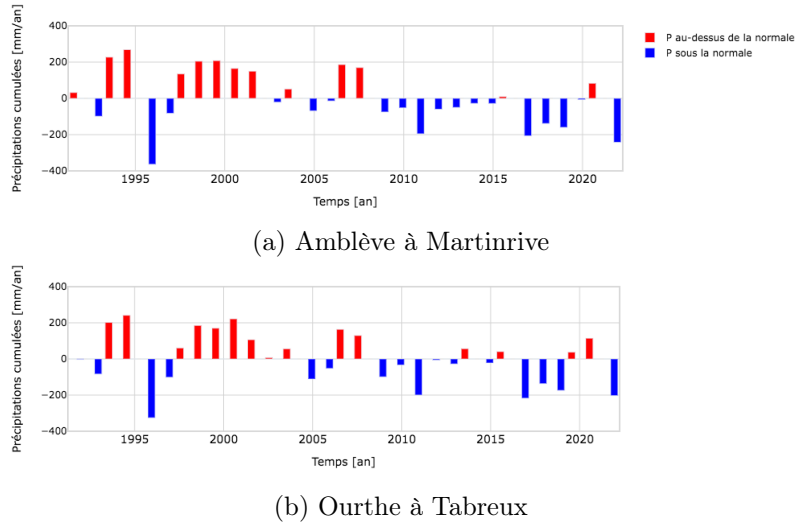


FIGURE 5.10 – Différence entre les précipitations cumulées chaque année et la normale pluviométrique calculée pour la période 1991-2022. Les précipitations sont en rouge lorsque cette différence est positive et en bleu lorsque celle-ci est négative [mm/an]. Les bâtonnets rouges représentent les précipitations qui sont supérieures à la normale pluviométrique et les bâtonnets bleus représentent les précipitations qui sont sous la normale pluviométrique.

Afin d’analyser plus finement l’évolution des précipitations à l’échelle saisonnière, l’année hydrologique a été séparée en deux périodes : une d’octobre à mars inclus et une d’avril à septembre inclus. Les précipitations diminuent significativement sur les 20 dernières années (2001-2022) pour le semestre d’avril à septembre au niveau du BV d’étude de l’Amblève et celui de l’Ourthe selon les équations $y = -6,58x + 1,376.10^4$ et $y = -5,428x + 1,149.10^4$. Cependant, ce n’est pas le cas pour la période du premier octobre 1991 au 30 septembre 2022 (figure 5.11).

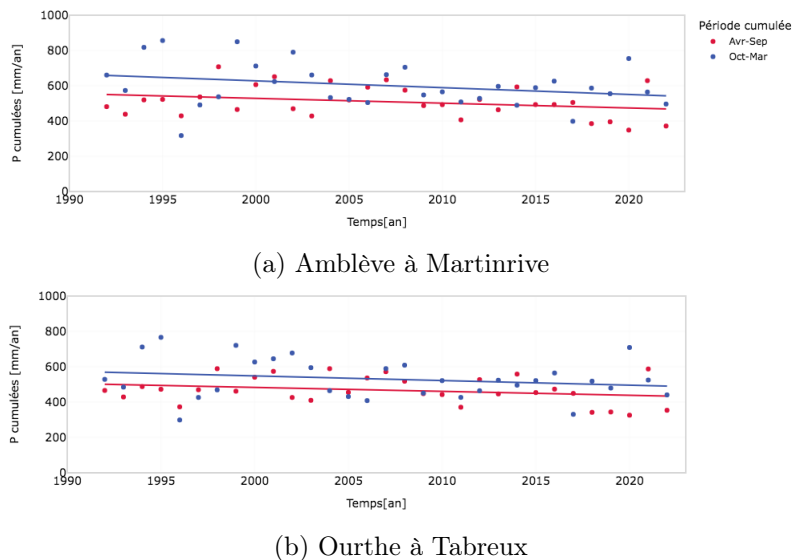


FIGURE 5.11 – Précipitations cumulées sur 6 mois avec en rouge la période du premier avril au 30 septembre et en bleu la période du premier octobre au 31 mars. Le temps représente des années hydrologiques commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L’année 1992 sur le graphique traduit donc l’année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.

Aucune tendance n’est significative à l’échelle saisonnière (annexe F - figure F.2). Néanmoins,

pour la période du premier octobre 2001 au 30 septembre 2022, les précipitations d'été diminuent pour les deux bassins et leurs p-valeurs sont proches de la significativité.

Par cette analyse sur différentes échelles temporelles, il peut être constaté que la diminution des précipitations annuelles serait liée à une diminution des précipitations d'été.

Les pluies annuelles extrêmes sont aussi en diminution. Cette tendance à la baisse n'est pas significative. Par contre elle l'est bien pour la période d'octobre à mars au niveau du BV de l'Amblève avec une p-valeur de 0,0578 (figure 5.12). A l'échelle saisonnière, seul le printemps présente une tendance à la hausse proche de la significativité dans le BV de l'Ourthe à Tabreux (p-valeur= 0,0748).

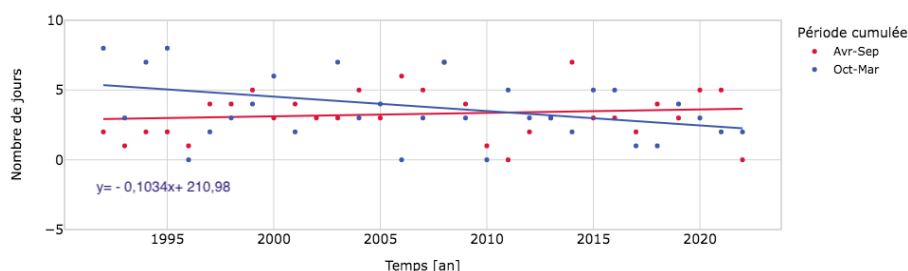
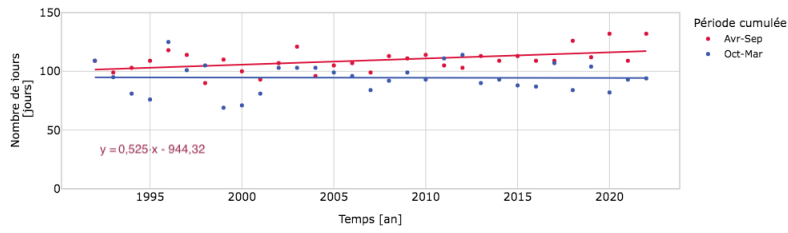
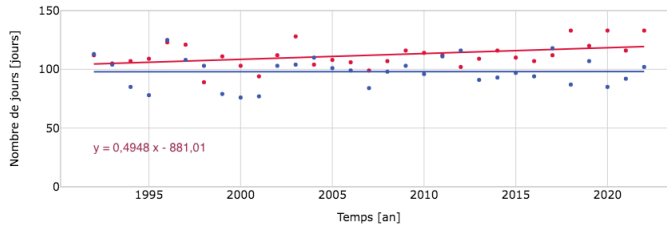


FIGURE 5.12 – Nombre de jours par semestre où la lame d'eau précipitée est supérieure à 20 mm dans le BV de l'Amblève à Martinrive. La série rouge représente le semestre du 1 avril au 30 septembre et la série bleue du 1 octobre au 31 mars. Le temps représente des années hydrologiques commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 1992 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.

Les pluies faibles présentent aussi des tendances. Même si le nombre de jours secs recensé annuellement ne change pas, ce n'est pas le cas pour le semestre d'avril à septembre où les jours sans pluie augmentent de manière significative pour les deux BV avec une p-valeur de 0,00525 pour le BV de l'Amblève et de 0,0172 pour le BV de l'Ourthe. Plus particulièrement, cette tendance à la hausse est liée à la saison printanière (p-valeur=0,0325) pour le BV de l'Amblève à Martinrive (figure 5.14a) et à la saison estivale (p-valeur=0,0561) pour le BV de l'Ourthe à Tabreux (figure 5.14b).

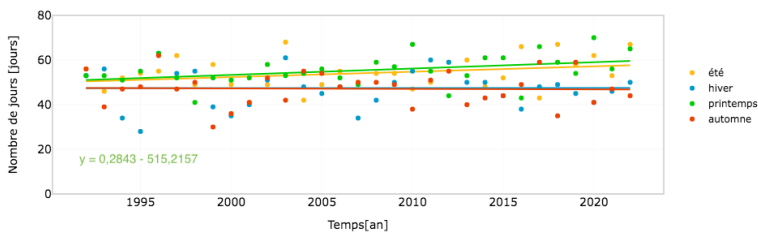


(a) Amblève à Martinrive

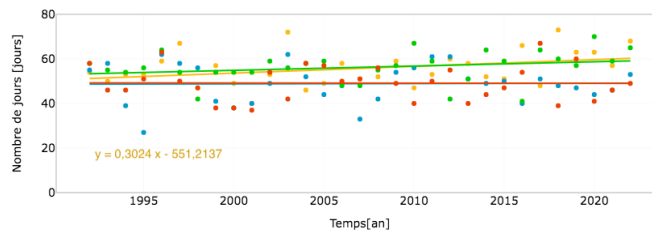


(b) Ourthe à Tabreux

FIGURE 5.13 – Nombre de jours secs par semestre, c’est-à-dire le nombre de jours sans précipitations significatives (lame d’eau précipitée inférieure à 1 mm). La série rouge représente le semestre du 1 avril au 30 septembre et la série bleu du 1 octobre au 31 mars. Le temps représente des années hydrologiques commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L’année 1992 sur le graphique traduit donc l’année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992. Les équations en rouge sont celles des droites de régression linéaire des semestres d’avril à septembre dont les pentes sont significatives.



(a) Amblève à Martinrive



(b) Ourthe à Tabreux

FIGURE 5.14 – Nombre de jours secs par saison, c’est-à-dire le nombre de jours sans précipitations significatives (lame d’eau précipitée inférieure à 1 mm). Une série est en jaune pour la saison de l’été, en vert pour le printemps, en bleu pour l’hiver et en rouge pour l’automne. Une droite de régression linéaire de la même couleur que chaque saison est tracée pour chaque série de données et l’équation de la droite est ajoutée lorsque les pentes sont significatives. Le temps représente des années hydrologiques commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L’année 1992 sur le graphique traduit donc l’année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.

Les périodes de sécheresse, traduites par le nombre maximum de jours sans pluie identifiés chaque année, ont tendance à augmenter mais aucune significativité n’est détectée pour les deux

BV. Pour la période d'avril à septembre, cette croissance est proche de la significativité uniquement pour le BV de l'Ourthe à Tabreux. Au printemps, les périodes sont en hausse pour les deux BV et en été uniquement pour le BV de l'Ourthe. Cependant, ces tendances ne sont pas significatives non plus jusqu'à présent.

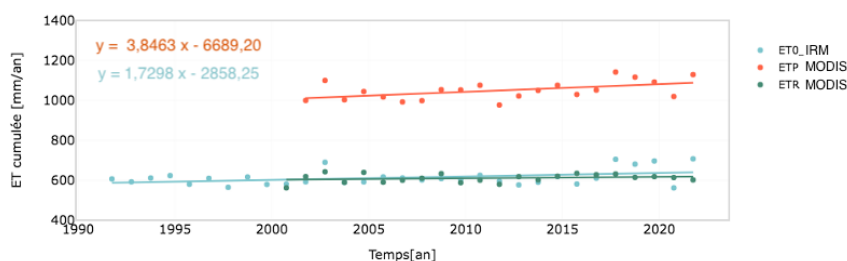
Le tableau 5.1 reprend toutes les p-valeur obtenues pour chaque test réalisé sur les précipitations avec en évidence les variables significatives.

TABLE 5.1 – Résultats statistiques des variables liées à la pluie. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu’il n’y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert. Lorsque la période n’est pas précisée c’est que cela se réfère à la période d’étude : 1991-2022

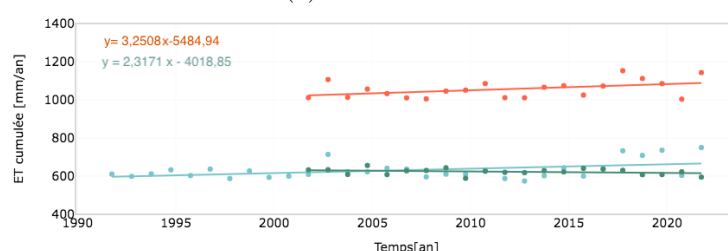
Variable	Définition	p-valeur (Amblève à Martinrive)	p-valeur (Ourthe à Tabreux)
P cumulées	Précipitations annuelles	0,0298 pente : -6,5876	0,0936
P cumulée Avr-Sep (2001-2022)	Précipitations cumulées sur la période du premier avril au 30 septembre	0,0289 pente : -6,588	0,0514 pente : -5,482
P cumulée Avr-Sep (1991-2022)		0,133	0,158
P cumulées Oct-Mar (2001-2022)	Précipitations cumulées sur la période du premier octobre au 31 mars	0,276	0,347
P cumulées Oct-Mar (1991-2022)		0,127	0,258
P cumulées été (2001-2022)	Précipitations cumulées sur la période du premier juillet au 30 septembre	0,0927	0,0801
P cumulées été (1991-2022)		0,195	0,159
P cumulées printemps (2001-2022)	Précipitations cumulée sur la période du premier avril au 30 juin	0,315	0,479
P cumulées printemps (1991-2022)		0,58	0,751
P cumulées automne (2001-2022)	Précipitations cumulées sur la période du premier avril au 30 septembre	0,849	0,921
P cumulées automne (1991-2022)		0,136	0,299
P cumulées hiver (2001-2022)	Précipitations cumulée sur la période du premier janvier au 31 mars	0,163	0,156
P cumulées hiver (1991-2022)		0,332	0,453
Pluies extrêmes annuelles	Nombre de jours où la lame d’eau précipitée est supérieure à 20mm	0,22	0,5
Pluies extrêmes Avr-Sep		0,508	0,601
Pluies extrêmes Oct-Mar		0,0578 pente : -0,1034	0,212
Pluies extrêmes été		0,757	0,533
Pluies extrêmes printemps		0,396	0,0756
Pluies extrêmes hiver		0,141	0,848
Pluies extrêmes automne		0,117	0,120
Jours secs annuels	Nombre de jours sur la période considérée où les précipitations sont inférieures à 1mm	0,115	0,161
Jours secs Avr-Sep		0,00525 pente : 0,525	0,0172 pente : 0,4948
Jours secs Oct-Mar		0,946	0,979
Jours secs été		0,105	0,0561 pente : 0,3024
Jours secs printemps		0,0325 pente : 0,2843	0,172
Jours secs hiver		0,984	0,964
Jours secs automne		0,891	0,937
Période de sécheresse max annuelle	Nombre de jours consécutifs maximum relevé où les précipitations sont inférieures à 1mm sur la période étudiée	0,483	0,443
Période de sécheresse max Avr-Sep		0,398	0,0748
Période de sécheresse max printemps		0,354	0,370
Période de sécheresse max hiver		0,717	0,928
Période de sécheresse max automne		0,355	0,187

5.2.2 Evapotranspiration

L'ETP et l'ET0 annuelles augmentent significativement sur la période 1991-2022 et 2001-2022 respectivement. Cette tendance est la même pour les deux BV d'étude. Par contre, l'ETR reste stable (figure 5.15a).



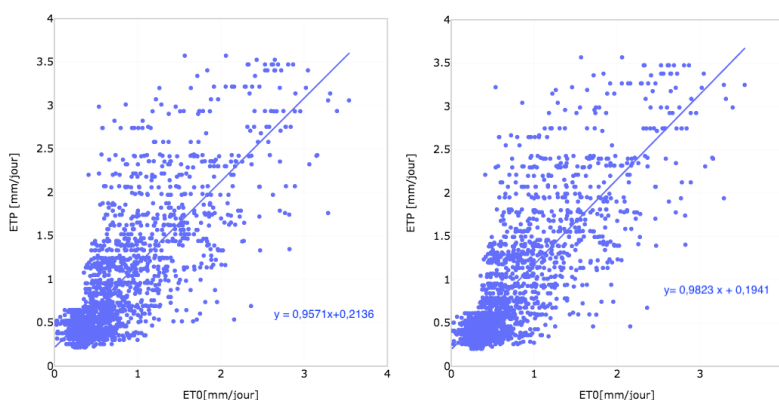
(a) Amblève à Martinrive



(b) Ourthe à Tabreux

FIGURE 5.15 – Evapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR) annuelle, issues du produit MODIS, en orange et vert respectivement. Evapotranspiration de référence (ET0) annuelle, issue de l'IRM, en bleu. Des droites de régression linéaire sont tracées pour chaque variable.

Calculer en hiver le "coefficient cultural" (K_c), représentant le rapport entre l'ETP et l'ET0, permet de voir si les données MODIS semblent logiques. En hiver, ce dernier vaut en moyenne sur la période d'étude, 1,45 dans le BV de l'Amblève à Martinrive et 1,41 dans le BV de l'Ourthe. MODIS semble être une source fiable même s'il faut être toujours critique quant aux produits de télédétection. Le K_c calculé en hiver est représenté par la pente de la droite qui est significative sur la figure 5.16 pour les deux BV ($p\text{-valeur} < 10^{-3}$).



(a) Amblève à Martinrive

(b) Ourthe à Tabreux

FIGURE 5.16 – Relation entre l'ETP et l'ET0 dont la pente de la droite représente le coefficient cultural (K_c)

L'évolution annuelle de l'ETR ne montrant aucune tendance significative sur la période d'étude, une analyse des tendances intra-annuelles a été réalisée. En observant les résultats obtenus de l'ETR cumulée par semestre, aucune tendance n'est relevée pour les deux BV d'étude. Cette variable reste stable pour les deux semestres de l'année (octobre - mars et avril-septembre) sur la période considérée. Il en est de même lorsque les quatre saisons sont analysées séparément à une exception près (annexe F - figure F.4 , F.5 & figure F.6). Effectivement, la figure 5.17 montre que l'ETR en été pour le BV d'étude de l'Ourthe à Tabreux diminue significativement.

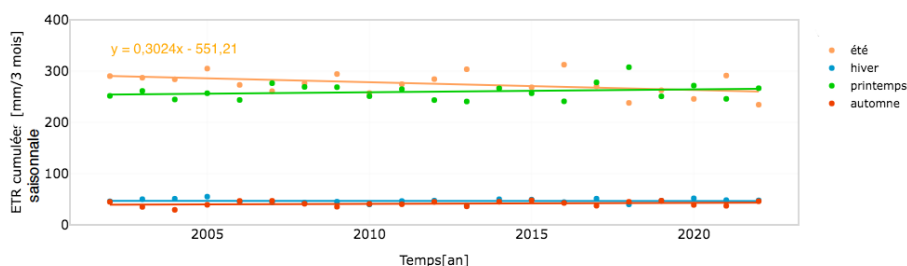


FIGURE 5.17 – ETR cumulée saisonnière en jaune pour la saison de l'été, en vert pour le printemps, en bleu pour l'hiver et en rouge pour l'automne. Une droite de régression linéaire de la même couleur que chaque saison est ajoutée pour chaque série de données. La période de traitement s'étend du premier octobre 2001 au 30 septembre 2022 sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux. L'année a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 2002 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002.

Le percentile 95 donne un aperçu de la variation des données les plus élevées de l'ETR. Ce dernier, calculé en été, diminue sur la période 2001-2022 (figure 5.18). Cette baisse n'est pas significative pour le BV de l'Amblève à Martinrive mais l'est bien pour le BV de l'Ourthe à Tabreux (p -valeur=0,0427). Par conséquent, même si cette approche est simpliste, il semblerait qu'il y ait un changement notamment au niveau du comportement des plantes dans leur manière de réguler leurs stomates sur les 20 dernières années pour le BV de l'Ourthe à Tabreux.

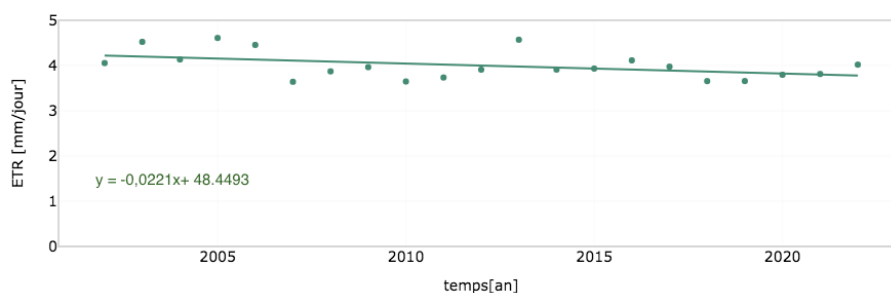


FIGURE 5.18 – Percentile 95 de l'ETR calculé en été. Une droite de régression linéaire est ajoutée pour tester la significativité de la pente. La période de traitement s'étend du premier octobre 2001 au 30 septembre 2022 sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux. L'année hydrologique a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 2002 sur le graphique traduit donc l'année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002.

Le tableau 5.2 reprend les résultats des tests effectués sur les variables d'évapotranspiration.

TABLE 5.2 – Résultats statistiques des variables liées à l'évapotranspiration. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu'il n'y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert. L'ET0 a été testée sur la période 1991-2022 et l'ETP et ETR sur la période 2001-2022 étant donné que les données n'étaient pas disponibles avant.

Variable	Définition	p-valeur (Amblève à Martinrive)	p-valeur (Ourthe à Tabreux)
ET0 IRM	Evapotranspiration de référence annuelle issue de l'IRM	0,0297 pente = 1,7298	0,0112 pente=2,3171
ETP MODIS	Evapotranspiration potentielle annuelle issue du produit MODIS	0,0184 pente = 3,8463	0,0454 pente = 3,2508
ETR MODIS	Evapotranspiration réelle annuelle issue du produit MODIS	0,225	0,298
ETR Avr-Sep	Evapotranspiration réelle cumulée sur la période du premier avril au 30 septembre	0,934	0,12
ETR Oct-Mar	Evapotranspiration réelle cumulée sur la période du premier octobre au 31 mars	0,348	0,408
ETR été	Evapotranspiration réelle cumulée sur la période du premier juillet au 30 septembre	0,192	0,044 pente = 0,3024
ETR printemps	Evapotranspiration réelle cumulée sur la période du premier avril au 30 juin	0,187	0,346
ETR automne	Evapotranspiration réelle cumulée sur la période du premier octobre au 31 décembre	0,284	0,282
ETR hiver	Evapotranspiration réelle cumulée sur la période du premier janvier au 31 mars	0,978	0,910
ETR p95 été	95 ème percentile calculé pour l'ETR sur la période du 1 juillet au 30 septembre représenté par la valeur en dessous de laquelle se situent 95 % des observations.	0,176	0,0427 pente = -0,0221

5.2.3 Différence entre précipitations et ETR réelle (P-ETR)

La différence entre les précipitations et l'ETR, aussi appelée l'eau utile (Voir section 2.2.3) est une estimation de la quantité d'eau qui est disponible pour la recharge des nappes phréatiques. A l'échelle annuelle, cette variable diminue significativement (p-valeur=0,007) sur la période d'octobre 2001 à septembre 2022 pour le BV d'étude de l'Amblève à Martinrive (figure 5.19). Ceci n'est pas le cas pour le BV de l'Ourthe à Tabreux.

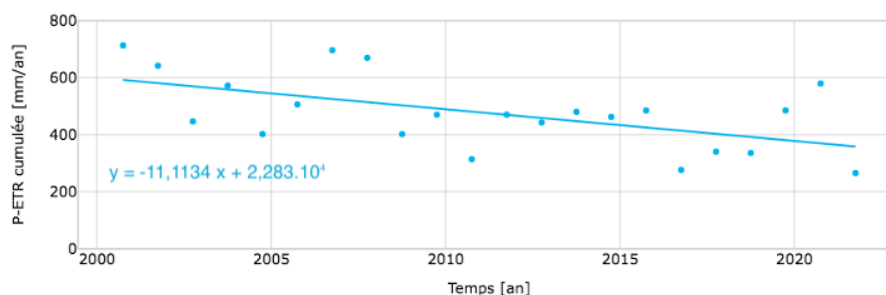


FIGURE 5.19 – Eau utile représentée par la différence entre les précipitations et l'ETR cumulées chaque année (P-ETR) pour la période 2001-2022 sur le BV de l'Amblève [mm/an]. Une droite de régression linéaire en bleu est ajoutée pour tester la significativité de la pente.

Au niveau des semestres, aucune tendance n'est relevée. Cependant la disponibilité en eau sur la période de octobre à mars diminue presque significativement (p-valeur=0,0832) au sein du BV d'étude de l'Amblève à Martinrive. La figure 5.20 montre que la diminution est liée aux précipitations qui sont de plus en plus faibles et non à l'ETR qui reste stable. Il n'y a pas de tendance remarquée lorsque les saisons de 3 mois sont analysées pour les deux BV (annexe F -

figure F.8 et F.9).

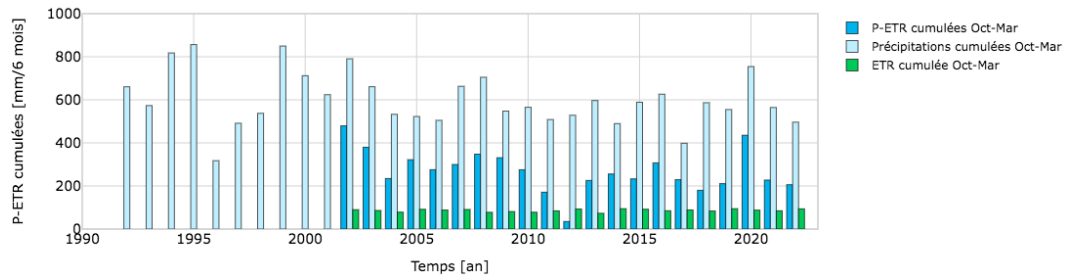


FIGURE 5.20 – Les cumuls de P-ETR entre le premier octobre et le 31 mars sont distingués en termes de précipitations et d’ETR. Les barres en bleu clair représentent les précipitations cumulées sur le semestre. L’ETR cumulée sur le semestre est indiquée en vert, et les barres bleu ciel représentent la différence entre les barres bleu clair et les barres vertes.

Les extrêmes changent au niveau de l’eau utile. Le percentile 95 (p95) calculé sur l’année hydrologique pour la période d’étude diminue significativement pour les deux BV dont la p-valeur est de 0,0075 pour le BV de l’Amblève et 0,0234 pour le BV de l’Ourthe (figure 5.23). Les quantités importantes d’eau disponibles pour les nappes sont de moins en moins importantes et ceci est probablement lié aux précipitations dont le p95 diminue significativement pour le BV de l’Amblève à Martinrive (p-valeur = 0,00993) et presque significativement pour l’autre BV (p-valeur = 0,102) comparé au p95 de l’ETR qui n’est pas significatif.

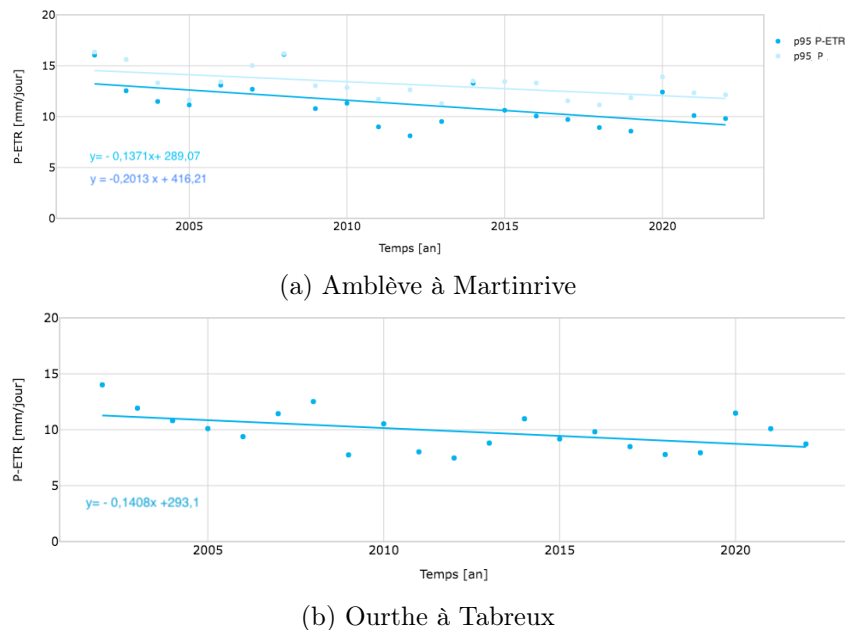


FIGURE 5.21 – Percentile 95 (p95) de P-ETR calculée par année hydrologique. Une droite de régression linéaire est ajoutée pour tester la significativité de la pente. La période de traitement s’étend du premier octobre 2001 au 30 septembre 2022. L’année a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L’année 2002 sur le graphique traduit donc l’année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002.

Cet indice diminue également significativement (p-valeur = 0,0172) sur le semestre d’octobre à mars seulement pour le BV de l’Amblève à Martinrive. Cette baisse est également liée à la

pluie dont le p95 diminue significativement sur cette période (p-valeur= 0,042), ce qui n'est pas le cas pour l'ETR dont le p95 reste stable (figure 5.22). Comme dit précédemment, en été, les p95 sont significatifs pour l'ETR. Cependant, ce n'est pas pour les précipitations et l'eau utile bien que les deux variables diminuent. Il est à noter qu'aucune tendance significative n'est relevée au niveau des percentiles 10 pour les deux bassins, toute période confondue. Le tableau 5.3 reprend tous les résultats statistiques liés à la disponibilité en eau.

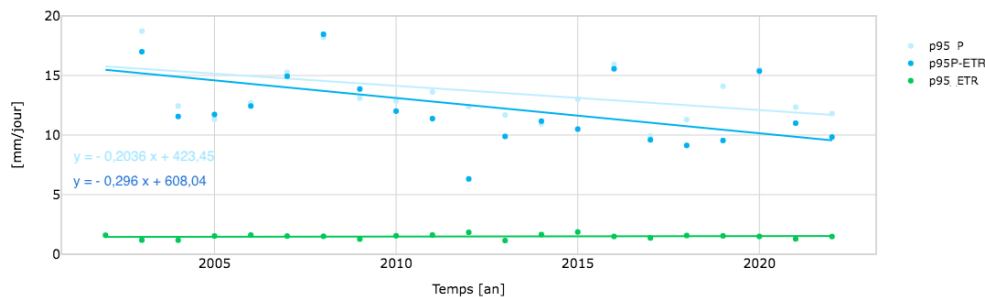


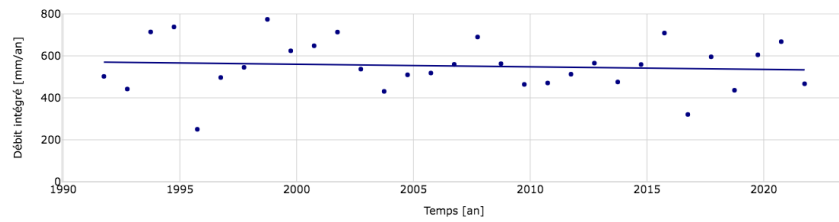
FIGURE 5.22 – P-ETR cumulée entre le premier octobre et 31 mars avec distinction des précipitations et ETR. Les bâtonnets en bleu clair représentent les précipitations cumulées sur le semestre. L'ETR cumulée sur le semestre est représentée en vert et les bâtonnets bleus ciel sont la différence entre les bâtonnets bleus clair et verts.

TABLE 5.3 – Résultats statistiques des variables liées à l'eau utile. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu'il n'y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert. Comme les données d'ETR ne sont disponibles qu'à partir de 2001, la période testée est 2001-2022.

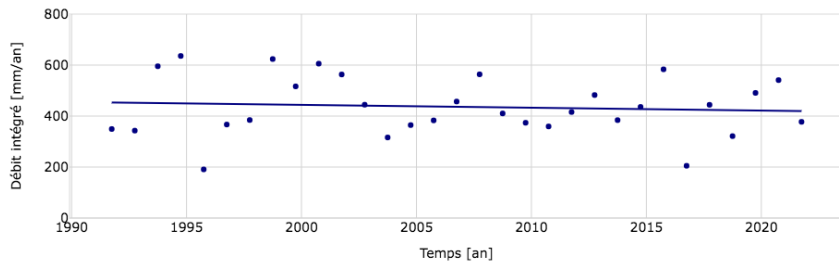
Variable	Définition	p-valeur (Amblève à Martinrive)	p-valeur (Ourthe à Tabreux)
P - ETR cumulées	Eau utile annuelle sur la période 2001-2022	0,007 pente = -11,11	0,185
P - ETR cumulées Avr-Sep	Eau utile sur la période du premier avril au 30 septembre	0,117	0,21
P - ETR cumulées Oct-Mar	Eau utile sur la période du premier octobre au 31 mars	0,0832	0,265
P - ETR cumulées été	Eau utile sur la période du premier juillet au 30 septembre	0,336	0,395
P - ETR cumulées printemps	Eau utile sur la période du premier avril au 31 juin	0,324	0,516
P - ETR cumulées automne	Eau utile sur la période du premier octobre au 31 décembre	0,622	0,893
P - ETR cumulées hiver	Eau utile sur la période du premier janvier au 31 mars	0,286	0,367
p95 P-ETR annuel	95 ème percentile calculé pour P-ETR, représenté par la valeur en-dessous de laquelle se situent 95 % des observations.	0,0075 pente= - 0,2013	0,0234 pente = -0,1408
p95 P-ETR Oct-Mar		0,0172 pente= -0,296	0,128
p95 P-ETR été		0,159	0,218
p95 P annuel	95 ème percentile calculé pour les précipitations, représenté par la valeur en dessous de laquelle se situent 95 % des observations.	0,00993 pente = - 0,1371	0,101
p95 P Oct-Mar		0,042 pente = - 0,2036	0,202
p95 P été		0,0879	0,122

5.2.4 Débits

Les figures 5.23a et 5.23b montrent une diminution du débit intégré sur les BV d'étude qui n'est pas significative sur la période 1991-2022.



(a) Amblève à Martinrive



(b) Ourthe à Tabreux

FIGURE 5.23 – Débit à l'exutoire du BV d'étude de l'Amblève et de l'Ourthe, intégré sur la zone d'étude d'une superficie de $1066,29 \text{ km}^2$ et de $1615,57 \text{ km}^2$ respectivement. Cette intégration est réalisée chaque année sur la période 1991-2022. La droite en mauve est une droite de régression linéaire dont la significativité de la pente a été testée.

Contrairement aux précipitations, la diminution du débit au fil des années est nettement moins visible (figure 5.24). Cette allure est la même pour les débits au niveau du BV de l'Ourthe à Tabreux. Il peut tout de même être noté que lorsque les années sont pluvieuses, les débits sont élevés, l'ET0 et l'ETP sont faibles contrairement à l'ETR qui ne varie pas spécialement. L'eau utile est aussi élevée. L'allure des courbes sont les mêmes mais pas de la même intensité.

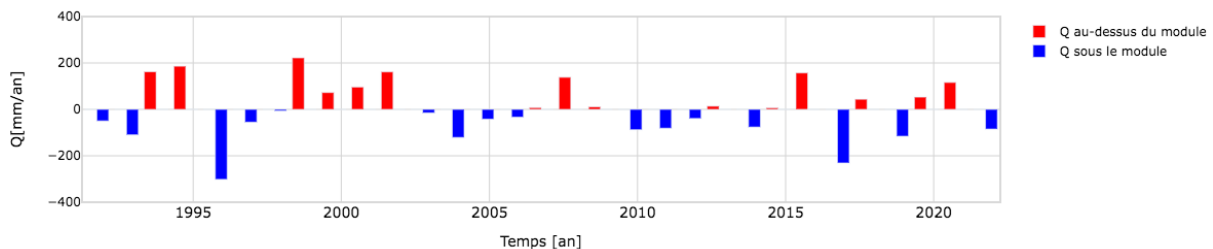
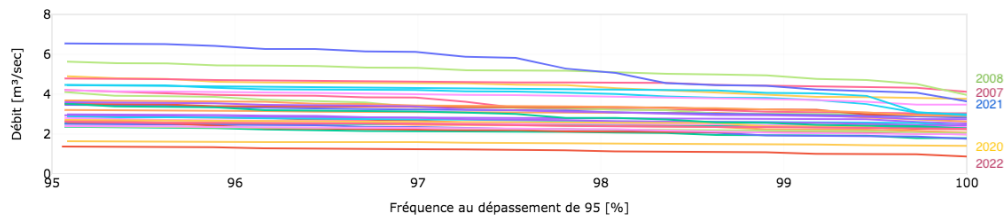


FIGURE 5.24 – Différence entre le débit intégré sur le BV versant d'étude de l'Amblève à Martinrive chaque année et le module avec le bâtonnet de couleur rouge lorsque cette différence est positive et bleu lorsque celle-ci est négative [mm/an].

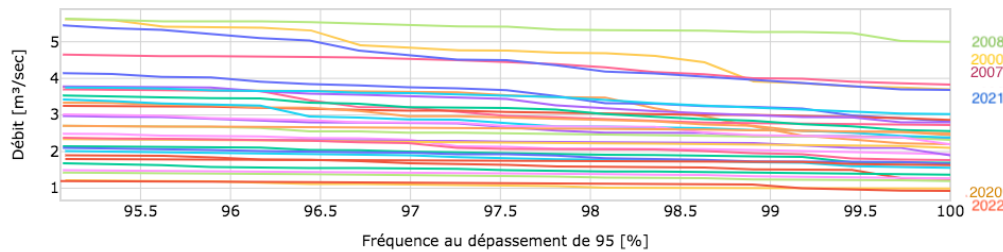
Que ce soit sur les 30 ou 20 dernières années, au niveau annuel, du semestre ou des saisons, aucune tendance n'est observée pour les deux BV d'étude.

Les débits extrêmes font aussi l'objet d'une attention particulière. Le débit d'étiage peut être traduit par le percentile 2,7 représentant les débits très faibles. Le percentile 50 correspond au débit médian et le percentile 97 au débit de crue se produisant lors des périodes d'inondations. Aucune tendance n'est relevée pour ces trois composantes au niveau des deux BV d'étude (annexe F - figure F.15).

La courbe des débits classés peut aussi être construite pour distinguer les années extrêmes et voir si une tendance se dégage en regardant plus précisément à partir d'une fréquence au dépassement de 95%, soit débits qui sont dépassés 95% du temps. Il est observé sur la figure 5.25a que les années extrêmes, qu'elles représentent des années de débits forts ou faibles, sont situées après 2003. En regardant la figure 5.25b représentant les courbes de débits classés du BV de l'Ourthe, les mêmes années extrêmes se dégagent.



(a) Station 6621 (Amblève à Martinrive)



(b) Station 5921 (Ourthe à Tabreux)

FIGURE 5.25 – Courbes des débits classés de chacune des années hydrologiques avec mise en évidence de la fréquence au dépassement à partir de 95%. Le temps est représenté par des années hydrologiques. Par exemple 2020 est l'année qui commence en octobre 2020 et qui se finit le 30 septembre 2021.

Les conclusions sont donc les mêmes, que ce soit au niveau des précipitations, évapotranspiration et eau utile, sur les 30 années, les extrêmes s'accroissent, que ce soient extrêmes forts ou faibles.

Les Indicateurs d'Altération Hydrologiques (IAH) sont aussi un outil permettant d'analyser les changements sur le débit. Seuls les indicateurs significatifs sont retenus dans cette partie.

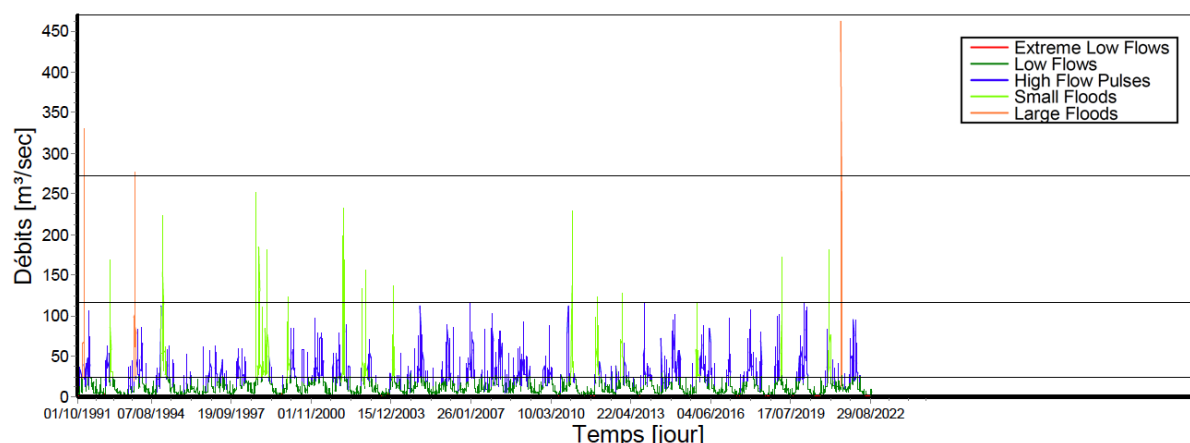


FIGURE 5.26 – "Environmental Flow Component" (EFC) permettant de distinguer les débits extrêmement faibles en rouge, les petits débits en vert foncé, les impulsions de débits élevés en mauve, les petites et larges inondations en vert clair et orange respectivement, de l'Amblève au niveau de la station à l'exutoire du bassin d'étude pour la période 1991-2022 avec droite de régression linéaire.

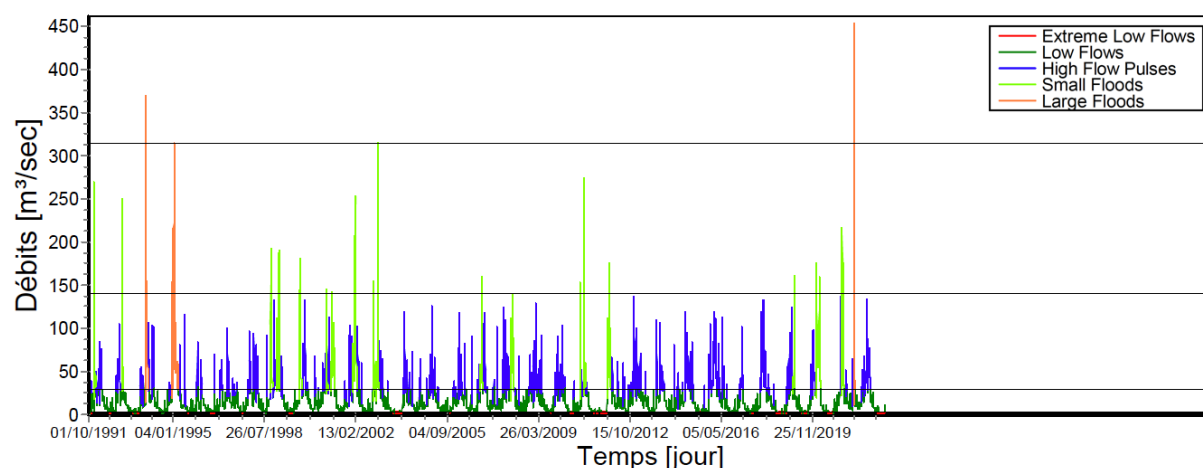


FIGURE 5.27 – "Environmental Flow Component" (EFC) permettant la distinction entre les débits extrêmement faibles en rouge, petits débits en vert foncé, impulsions de débits élevés en mauve, petite et large inondation en vert clair et orange respectivement, de l'Ourthe au niveau de la station à l'exutoire du bassin d'étude pour la période 1991-2022 avec droite de régression linéaire.

Sur base de la figure 5.26 et 5.27, les différents indicateurs présentés ci-dessous sont calculés entre le premier octobre 1991 et le 30 septembre 2022. De ces figures se dégagent des événements extrêmes. En effet, trois épisodes de forte inondation sont relevés. Il n'est possible à l'heure actuelle de savoir si ces événements sont significatifs. En effet, bien que les tendances au niveau des débits maximaux, enregistrés lors des fortes inondations, soient, en théorie, significatives, il n'est pas possible de se fier à ces résultats dont le nombre d'échantillons est trop faible.

Sur la période étudiée, les événements extrêmes se sont intensifiés avec notamment des débits extrêmement faibles qui sont de plus en plus faibles au niveau de la station 6621. La figure 5.28 permet non seulement de visualiser cette tendance significative à la baisse mais aussi de distin-

guer les années hydrologiques pour lesquelles aucun débit extrêmement faible n'a été enregistré. Ceci concerne les années 2000, 2007, 2008, 2009 et 2021. L'année hydrologique 2021 comprend les événements d'inondations extrêmes qui ont eu lieu en juillet 2021. A l'inverse, les années sèches sont distinguables comme l'année 2003 qui a marqué la Belgique mais aussi l'Europe.

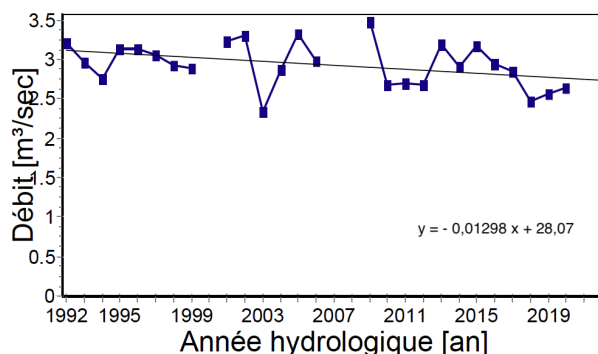


FIGURE 5.28 – “Extreme low peak”, c’est-à-dire les débits minimums considérés dans la catégorie d’extrêmement faibles de l’Amblève au niveau de la station à l’exutoire du BV pour la période 1991-2022. Une droite de régression linéaire est associée à ces données.

Par ailleurs, le nombre d’impulsions de faibles débits a tendance à diminuer significativement au niveau de la station 6621 (figure 5.29).

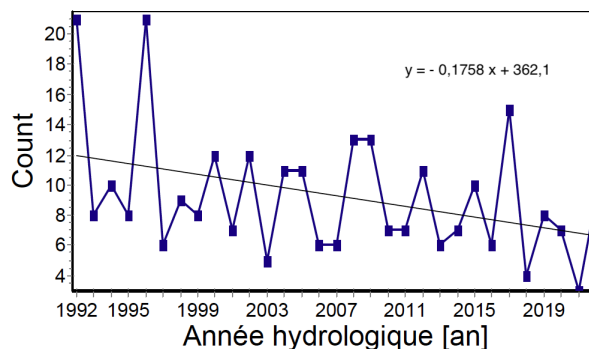


FIGURE 5.29 – « Low pulse count » de l’Amblève au niveau de la station à l’exutoire du bassin d’étude pour la période 1991-2022 avec droite de régression linéaire.

La figure 5.30 montre aussi que les faibles débits relevés à la station 6621 durant le mois d’avril sont également de plus en plus faibles. Il est remarqué qu’aucun faible débit n’a été recensé au mois d’avril de l’année hydrologique 2001.

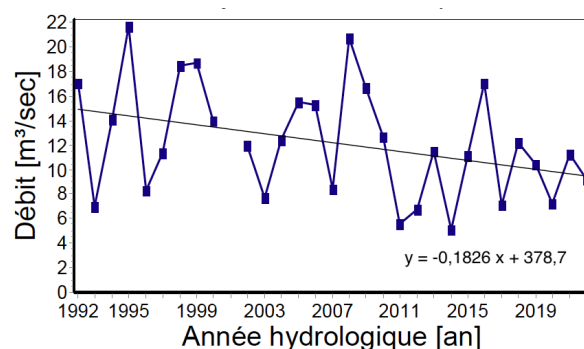


FIGURE 5.30 – Débits faibles du mois d’avril au niveau de la station 6621 en amont de l’exutoire à Martinrive du bassin d’étude de l’Amblève pour la période 1991-2022. L’année hydrologique 1992 par exemple représente la période du premier octobre 1991 au 30 septembre 2022. Une droite de régression linéaire est associée à ces données.

Au niveau du BV d’étude de l’Ourthe à Tabreux, la seule tendance significative retenue concerne les bas débits du mois de février qui sont de plus en plus hauts sur la période étudiée. La figure 5.31 montre d’une part que les bas débits augmentent et d’autre part que les années hydrologiques 1995, 2000, 2002, 2016, 2020 ne présentent pas de faibles débits au mois de février.

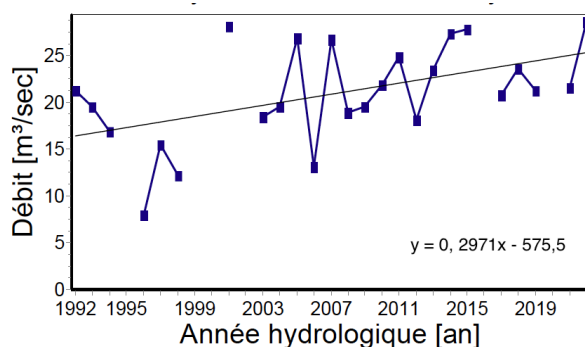


FIGURE 5.31 – Débits faibles du mois de février au niveau de la station 5921 en amont de l’exutoire à Tabreux du bassin d’étude de l’Ourthe pour la période 1991-2022. L’année hydrologique 1992 par exemple représente la période du premier octobre 1991 au 30 septembre 2022. Une droite de régression linéaire est associée à ces données.

Le tableau 5.4 reprend tous les résultats obtenus concernant les débits.

TABLE 5.4 – Résultats statistiques des variables liées aux débits de la station 6621 à Martinrive et 5921 à Tabreux. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu'il n'y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert.

Variable	Définition	p-valeur (Amblève à Martinrive)	p-valeur (Ourthe à Tabreux)
Q	Débit intégré chaque année sur le BV d'étude sur la période 1991-2022	0,662	0,635
Q Oct-Mar (2001-2022)	Débit intégré sur la période du premier octobre au 31 mars sur le BV d'étude	0,901	0,888
Q Oct-Mar (1991-2022)		0,85	0,795
Q Avr-Sep (2001-2022)	Débit intégré sur la période du premier avril au 30 septembre sur le BV d'étude	0,714	0,578
Q Avr-Sep (1991-2022)		0,517	0,564
Q été (2001-2022)	Débit intégré sur la période du premier juillet au 30 septembre sur le BV d'étude	0,979	0,93
Q été (1991-2022)		0,848	0,644
Q printemps (2001-2022)	Débit intégré sur la période du premier avril au 30 juin sur le BV d'étude	0,208	0,124
Q printemps (1991-2022)		0,227	0,246
Q automne (2001-2022)	Débit intégré sur la période du premier octobre au 31 décembre sur le BV d'étude	0,943	0,949
Q automne (1991-2022)		0,454	0,41
Q hiver (2001-2022)	Débit intégré sur la période du premier janvier au 31 mars sur le BV d'étude	0,714	0,693
Q hiver (1991-2022)		0,727	0,814
p27	Percentile 2,7 des débits en m3/sec représentant le débit caractéristique d'étiage (DCE) définit comme un débit d'un cours d'eau qui n'est pas atteint dix jour par an. Ce dernier est calculé sur la période 1991-2022.	0,708	0,556
p50	Percentile 50 des débits en m3/sec représentant le débit médian, c'est-à-dire le débit d'un cours d'eau dépassé la moitié de l'année, calculé annuellement sur la période 1991-2022	0,549	0,52
p97	Percentile 97 des débits en m3/sec représentant le débit caractéristique de crue (DCC) définit comme étant le débit d'une cours d'eau qui est dépassé dix jour par an. Ce dernier est calculé sur la période 1991-2022	0,913	0,953
April low flow	La médiane des faibles débits calculée pour tous les mois d'avril de la période étudiée. Les faibles débits sont définis dans le logiciel par des débits dont la fréquence de dépassement est inférieure à 75% (1991-2022).	0,05 pente=-0.1826	/
February low flow	La médiane des faibles débits calculée pour tous les mois de février de la période étudiée. Les faibles débits sont définis dans le logiciel IHA par des débits dont la fréquence de dépassement est inférieure à 75% (1991-2022).	/	0,01 pente= 0.2971
Extreme low peak	Le minimum des débits extrêmement faibles calculé annuellement. Ce type de débit est définit dans le logiciel IHA comme un débit initialement faible inférieur à une fréquence de dépassement de 10% (1991-2022).	0,05 pente=-0.01298	/
Low pulse count	Le nombre d'impulsions de faible débit calculé chaque année. Cette impulsion de faible débit est représentée comme étant la médiane du débit moins 25 % (1991-2022).	0,05 pente=-0.1758	/

5.2.5 Niveau des nappes phréatiques

De manière générale, la profondeur moyenne annuelle de l'ensemble des nappes mesurée par les stations piézométriques situées au sein des deux BV d'étude, a tendance à diminuer sur la période du 1 octobre 1991 au 30 septembre 2022 (figure 5.32 & 5.33). Pour le BV de l'Amblève, seule la station PZ7067 diminue significativement selon l'équation $y = -0,0275x + 462,95$ (p-valeur= 0,00126). Sur la figure 5.32d il est observé que, plus la station est loin du cours d'eau et en amont du BV, plus il y a d'effets sur la nappe. La station PZ7067 repose sur un aquitard à niveaux aquifères du socle cambro-silurien composé de quartzophyllades, de grès et de phyllades tandis que les deux autres se trouvent sur des aquicludes : un aquiclude à niveaux aquifères du socle cambro-silurien présentant des bancs de quartzites et de phyllades pour la station PZ7172, ainsi qu'un aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien inférieur constituée principalement de roches argileuses contenant des schistes pour la station PZ2016.

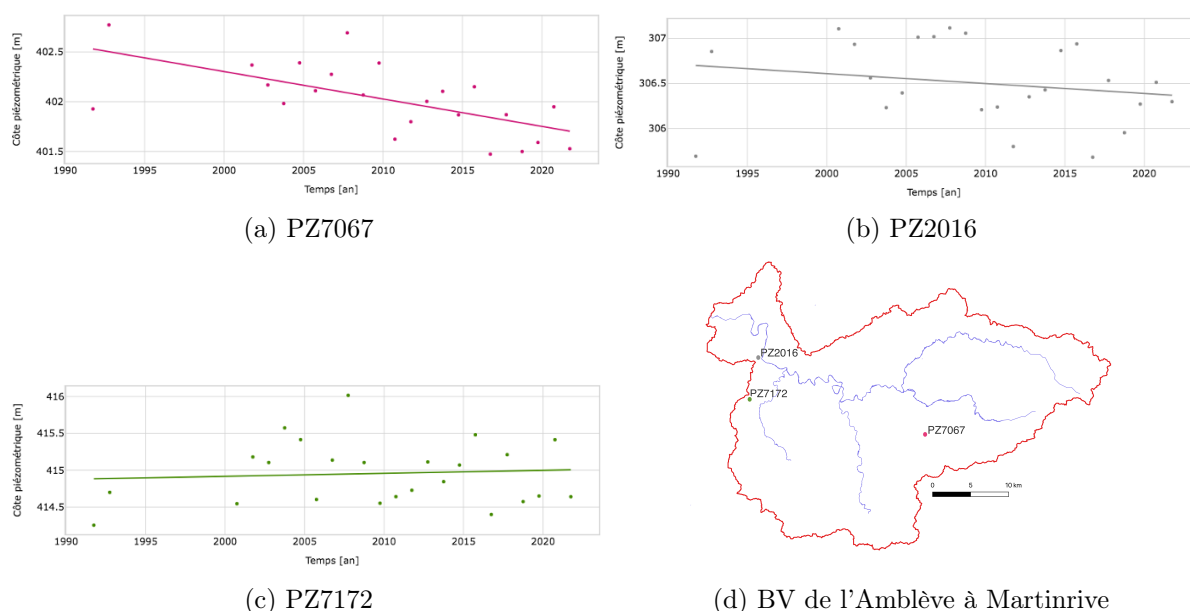


FIGURE 5.32 – Moyenne annuelle (1 octobre -30 septembre) de la côte piézométrique en fonction du temps des différentes stations piézométriques situées au sein du BV d'étude de Amblève dont l'exutoire a été défini à Martinrive. Ce bassin d'étude a été représenté avec les piézomètres qui le constituent à la figure 5.32d (1991-2022). Une droite de régression linéaire est tracée pour chacune des séries où un test sur la pente a été réalisé.

En ce qui concerne le BV de l'Ourthe à Tabreux, aucune tendance significative n'est observée excepté pour la nappe mesurée par la station PZ34044 dont la profondeur moyenne annuelle diminue significativement selon l'équation $y = -0,0721x + 205,23$ (p-valeur= 0,00126) (figure C.7). Il est à noter pour ce bassin que calculer la moyenne sur l'année commençant du premier janvier au 31 décembre ou du 1 octobre au 30 septembre change les résultats. En effet, si le premier cas est traité, la côte piézométrique de la nappe mesurée par la station PZ828 et PZ34046 diminue significativement. Pour ce BV, il est observé l'inverse de ce qui est constaté pour le BV de l'Amblève. En effet, les nappes qui diminuent significativement sont situées en aval du BV. Les stations PZ34284, PZ828, PZ1328 et PZ5321 sont toutes des aquifères calcaires comparé à

la station PZ34044 qui repose sur une unité très hétérogène définie comme : aquifère - aquitard - aquiclude de l'Hastarien. La station PZ7066 repose sur un aquiclude à niveaux aquifères de Villé.

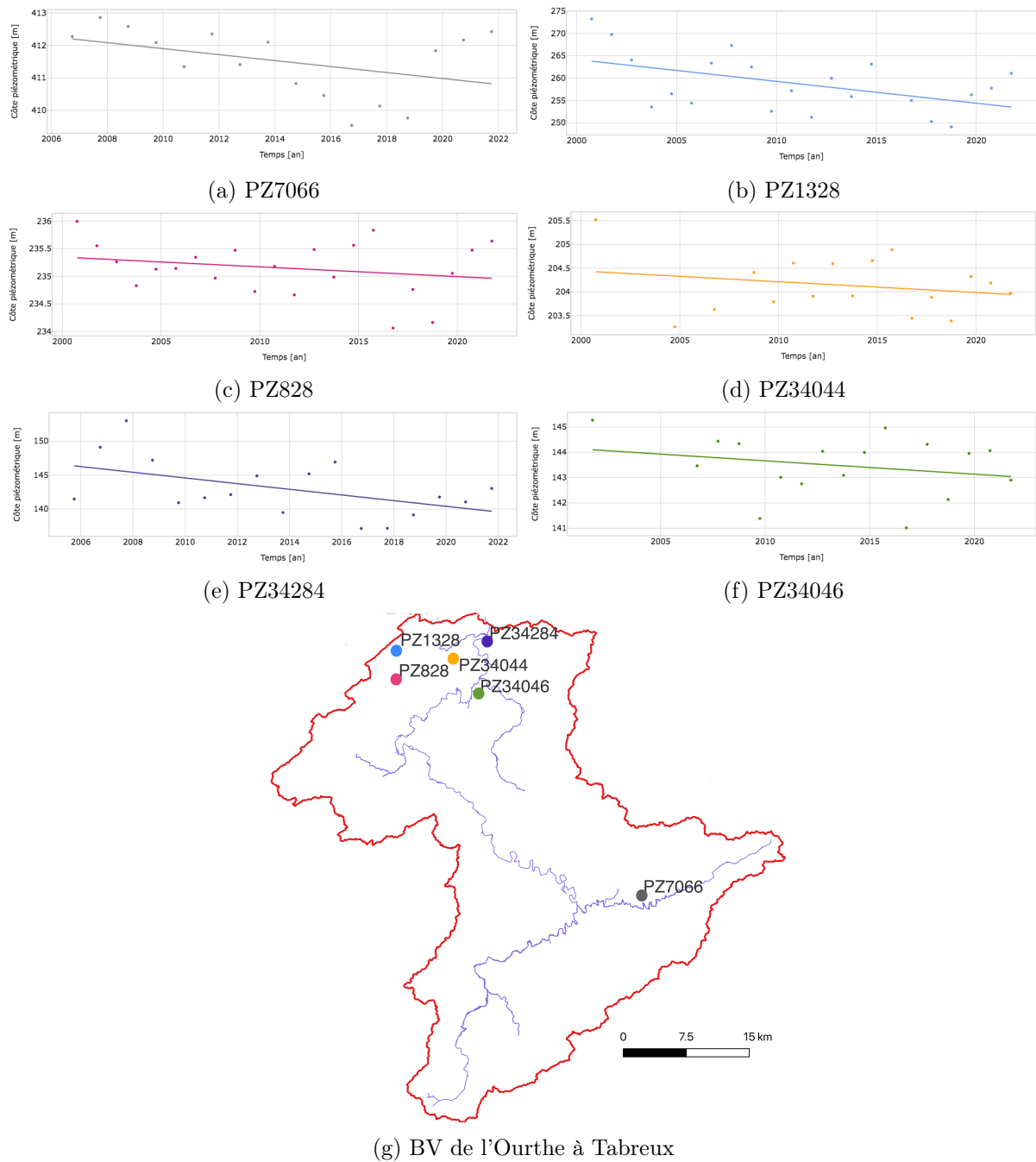


FIGURE 5.33 – Moyenne annuelle (1 octobre -30 septembre) de la côte piézométrique en fonction du temps des différentes stations piézométriques situées au sein du BV d'étude de Ourthe dont l'exutoire a été défini à Tabreux. Ce bassin d'étude a été représenté avec les piézomètres qui le constituent à la figure 5.33g (1991-2022).

TABLE 5.5 – Résultats statistiques des variables liées aux profondeurs des nappes mesurées à l’aide des piézomètres situés au sein des BV de l’Amblève à Martinrive et de l’Ourthe à Tabreux. Les p-valeurs inférieures 0,05 traduisent une tendance significative (en vert). Les p-valeurs entre 0,05 et 0,1 sont celles dont les tendances sont proches de la significativité (en orange). Les p-valeurs en rouge sont supérieures à 0,1 et signifient qu’il n’y a pas de tendance. Si les données sont significatives, la valeur de la pente est ajoutée sous la p-valeur en vert.

Variable	Définition	p-valeur (Amblève à Martinrive)	p-valeur (Ourthe à Tabreux)
PZ7067	Côte piézométrique moyenne annuelle (1 octobre-30 septembre) mesurée à la station PZ7067 au sein du BV de l’Amblève à Martinrive sur la période 1991-2022	0,00126 pente=-0,0275	
PZ2016	Côte piézométrique moyenne annuelle (1 octobre-30 septembre) mesurée à la station PZ2016 au sein du BV de l’Amblève à Martinrive sur la période 1991-2022	0,35	
PZ7172	Côte piézométrique moyenne annuelle (1 octobre-30 septembre) mesurée à la station PZ7172 au sein du BV de l’Amblève à Martinrive sur la période 1991-2022	0,712	
PZ7066	Côte piézométrique moyenne annuelle (1 octobre-30 septembre) mesurée à la station PZ7066 au sein du BV de l’Ourthe à Tabreux sur la période 1991-2022	/	0,186
PZ1328	Côte piézométrique moyenne annuelle (1 octobre-30 septembre) mesurée à la station PZ1328 au sein du BV de l’Ourthe à Tabreux sur la période 1991-2022	/	0,21
PZ828	Côte piézométrique moyenne annuelle (1 octobre-30 septembre) mesurée à la station PZ828 au sein du BV de BV de l’Ourthe à Tabreux sur la période 1991-2022	/	0,287
PZ34044	Côte piézométrique moyenne annuelle (1 octobre-30 septembre) mesurée à la station PZ34044 au sein du BV de l’Ourthe à Tabreux sur la période 1991-2022	/	0,0522 pente=-0,0721
PZ34284	Côte piézométrique moyenne annuelle (1 octobre-30 septembre) mesurée à la station PZ34284 au sein du BV de l’Ourthe à Tabreux sur la période 1991-2022	/	0,76
PZ34046	Côte piézométrique moyenne annuelle (1 octobre-30 septembre) mesurée à la station PZ34046 au sein du BV de l’Ourthe à Tabreux sur la période 1991-2022	/	0,53

Chapitre 6

Discussion

6.1 Évolution des variables hydrologiques sur les 30 dernières années

Il est observé dans les deux bassins une évolution des variables hydrologiques sur les 30 dernières années.

6.1.1 Précipitations et évapotranspiration

Tendances annuelles

L'ET0 augmente de manière significative pour les deux BV en raison de l'augmentation de la température (Grandry et al., 2018). Comme la capacité de l'air à retenir l'humidité est influencée par la température, une augmentation de la température provoquerait une hausse des précipitations. Pourtant, ce n'est pas ce qui est observé au niveau des deux BV étudiés.

Les précipitations diminuent sur les 30 dernières années de manière significative pour le BV de l'Amblève (p-valeur= 0,0298) mais pas pour celui de l'Ourthe bien qu'il s'en rapproche.

Cette décroissance est principalement liée à une baisse des pluies pendant la saison estivale. Ces résultats ne sont pas en phase avec ce qui est observé à l'échelle de la Belgique où une augmentation moyenne des précipitations annuelles est constatée sur la période 1990-2019 comparé à celle de 1880 à 1909 (voir section 2.2.2, figure 2.13). Sur base de la figure 6.1, représentant une carte de la Belgique construite sur une homogénéisation des séries temporelles de 8 stations : Ostende, Jalhay, Saint-Trond, Uccle, Anvers, Leopoldsburg, Gembloux et Stavelot, il est observé au niveau du BV de l'Amblève que les précipitations diminuent mais pas de manière significative sur la période 1951-2019 comparé à la normale de 1961 à 1990. Cette représentation des précipitations moyennes au niveau du pays peut donc masquer des différences au niveau régional.

Cette conclusion est appuyée par le projet Hydrotrend dans lequel une baisse des précipitations est aussi observée au niveau du bassin de l'Amblève, de l'Ourthe, de la Lesse et de la Vesdre (Grandry et al., 2018).

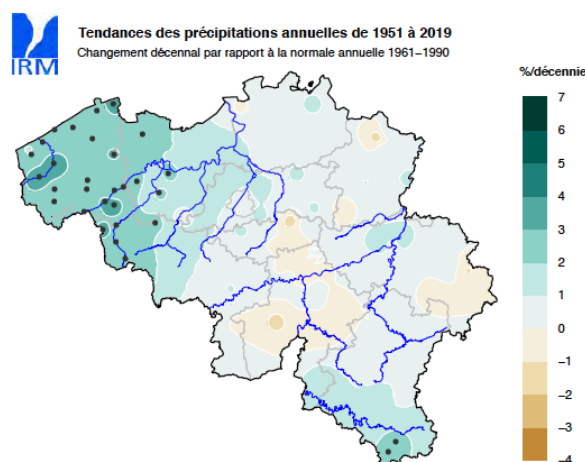


FIGURE 6.1 – Changements enregistrés dans les précipitations annuelles normalisées (% par décennie) au cours de la période allant de 1951 à 2019, en utilisant des analyses de tendances linéaires. Les stations où les tendances sont significatives à un niveau de confiance de 95 % sont repérées par un point noir (IRM, 2020).

Malgré une demande évaporative en eau, traduite par l'ETP, qui augmente de plus de 10 % sur une période de 20 ans, l'ETR n'affiche pas de variation significative (figure 5.15). Cela indique que l'augmentation de 10 % de la demande en eau ne se traduit pas par une augmentation de la transpiration des plantes. L'hypothèse est que le climat engendre une demande plus élevée en eau, mais que le stress hydrique (régulation stomatique) réduit cette demande. Bien que les plantes ne transpirent pas moins, elles maintiennent leurs fonctions, mais réduisent leur transpiration en fermant davantage leurs stomates. Cette situation pourrait avoir plusieurs conséquences potentielles.

D'une part, les écosystèmes pourraient s'être adaptés. Certaines plantes et arbres pourraient mourir naturellement, entraînant des changements dans les écosystèmes.

D'autre part, en ce qui concerne vraisemblablement davantage les cultures, celles-ci ne meurent pas, mais les plantes ferment leurs stomates plus fréquemment, ce qui réduit leur captation de dioxyde de carbone (CO_2). Cela pourrait potentiellement avoir des conséquences sur les rendements, mais il est nécessaire d'aborder cette hypothèse avec une approche critique. En effet, avec l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO_2 , les plantes tendent à augmenter leur captation de CO_2 car leurs stomates fonctionnent de manière plus efficace. En principe, le changement climatique devrait stimuler une augmentation des rendements. Cependant, en parallèle, l'élévation de la température incitera les plantes à fermer leurs stomates pour faire face au stress hydrique. Il est encore difficile à ce jour de donner des explications claires concernant ce phénomène.

Par ailleurs, au cours des 20 dernières années, ce sont exclusivement les précipitations d'avril à septembre qui ont connu un changement traduit par une baisse significative pour les deux bassins, ce qui n'est pas observé sur les 30 dernières années. Cette tendance pourrait s'expliquer par le fait que ces deux dernières décennies ont été marquées par une série d'années sèches, ce qui aurait potentiellement influencé les données à court terme. À partir de l'année hydrologique 2009, dans le BV de l'Amblève, toutes les années jusqu'en 2022 ont enregistré des précipita-

tions inférieures à la normale, à l'exception de l'année 2021 qui l'a dépassée (figure 5.10a). Cette exception s'explique par les inondations qui ont touché la Belgique. Cette tendance est moins prononcée dans le BV de l'Ourthe, où des précipitations légèrement supérieures à la normale ont été observées les années 2014, 2016 et 2020, et l'année 2021 a connu une augmentation encore plus marquée (figure 5.10b).

Tendances saisonnières

À l'échelle saisonnière, ce mémoire révèle des tendances pluviométriques presque significatives pour l'été sur la période 2001-2022 dans les deux BV, avec des précipitations de plus en plus faibles alors que l'IRM rapporte que seule la saison hivernale présente une augmentation significative des précipitations à l'échelle nationale (IRM, 2020). Au niveau local, sur la figure 6.2 il peut être observé qu'en été les précipitations diminuent dans la région du BV de l'Ambève et de l'Ourthe. Même si les tendances ne sont pas significatives, les résultats vont dans le même sens.

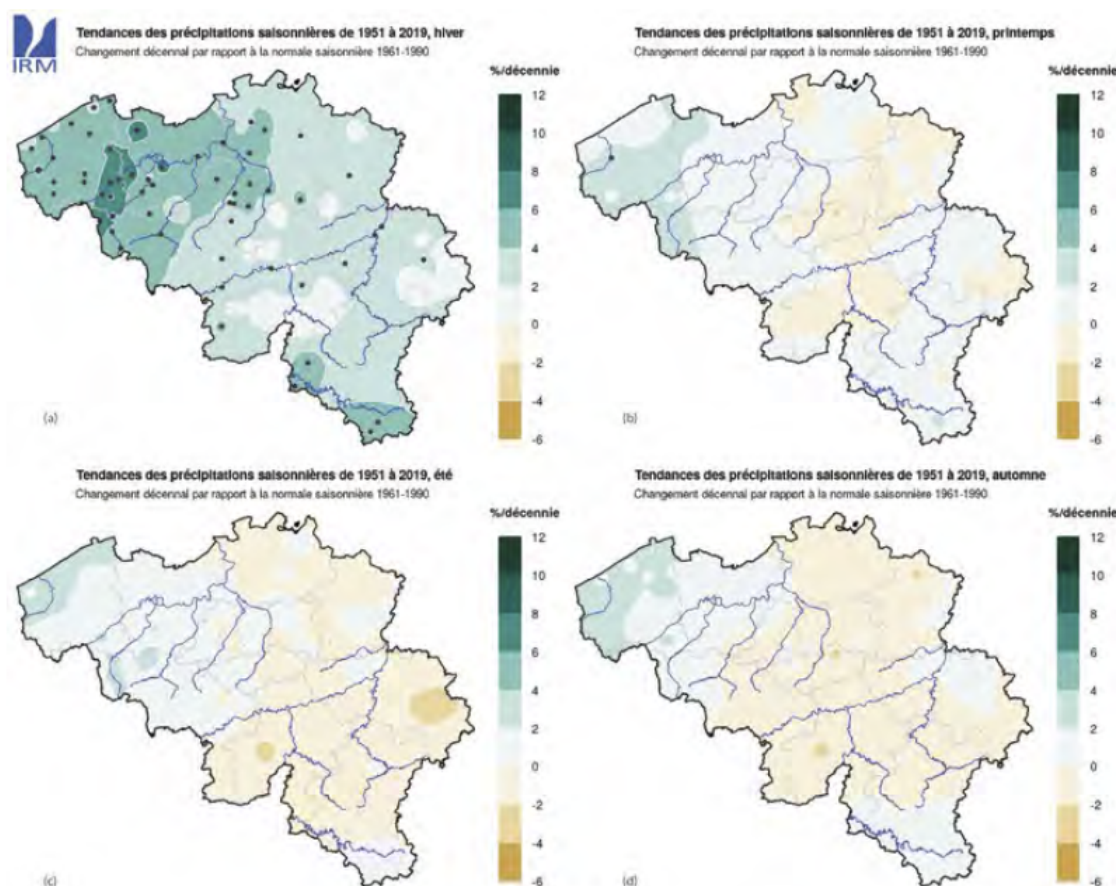


FIGURE 6.2 – Changements enregistrés dans les précipitations saisonnières normalisées (% par décennie) au cours de la période allant de 1951 à 2019, en utilisant des analyses de tendances linéaires. (a) hiver, (b) printemps, (c) été et (d) automne. Les stations où les tendances des données présentent une signification statistique à un niveau de confiance de 95 % sont repérées par un point noir (IRM, 2020).

Cette réduction des précipitations pendant la période estivale s'accompagne d'une baisse significative de l'ETR pendant cette même période pour le BV de l'Ourthe uniquement. Ces ré-

sultats paraissent logiques car la diminution des précipitations entraîne une réduction du contenu en eau du sol. En conséquence, en été, les plantes ferment leurs stomates pour éviter le stress hydrique.

Aucune étude portant sur les observations passées de la diminution de l'ETR en été, n'a été réalisée sur ce sujet. Cependant, Degré et al. (2011) a entrepris une étude en 2011 sur les impacts futurs de ce phénomène dans le BV wallons de la Lesse et de Vesdre.

Évènements extrêmes

Un changement des variables hydrologiques est aussi observé au niveau des événements extrêmes sur les 30 dernières années. En effet, la fréquence des pluies abondantes diminue de manière significative dans le BV de l'Amblève sur la période d'octobre à mars avec une baisse du nombre de jours de fortes précipitations. Cette tendance va de pair avec le résultat du percentile 95 faisant référence à la valeur en dessous de laquelle se situent 95% des observations. Cet indice diminue sur les 20 dernières années de manière significative annuellement et sur le semestre d'octobre à mars. Cela signifie que les quantités de précipitations nécessaires pour atteindre ce seuil sont en baisse, ce qui suggère que les événements de fortes précipitations sont devenus moins fréquents ou moins intenses au fil du temps.

Dans le BV de l'Ourthe, une tendance à la hausse presque significative, des jours de fortes pluies, est observée uniquement au printemps.

Ces résultats vont à l'encontre de ce qui est observé au niveau mondial où une augmentation de l'occurrence de ces événements est relevée depuis les années 1950 dans la plupart des régions du globe (GIEC, 2021). De même au niveau de la Belgique où le nombre de jours de fortes précipitations augmente significativement depuis 1981 à l'échelle annuelle et pour la saison de l'été (IRM, 2020).

Par contre, les résultats obtenus sont en accord avec une étude menée par Wyard et al. (2016). En Ardenne, la plupart des débordements de rivières, telles que l'Ourthe, l'Amblève et la Vesdre, surviennent pendant la saison hivernale. Près de la moitié de ces débordements résultent de la combinaison de fortes pluies et d'une fonte rapide du manteau neigeux. Cette étude a montré que les conditions climatiques propices aux inondations hivernales ont diminué en Ardenne au cours des cinquante dernières années.

Un changement au niveau des sécheresses météorologiques, caractérisées par un niveau très faible de précipitations, est aussi constaté sur les 30 dernières années. En effet, le nombre de jours secs sur la période entre avril et septembre augmente significativement pour les deux bassins. Il augmente également pour la saison printanière au niveau du BV de l'Amblève et pour la saison estivale au niveau du BV de l'Ourthe. Un déficit en eau durant ces périodes pourrait affecter les rendements agricoles.

Les observations faites ici sont en phase avec ce que l'IRM relate au niveau de la station météorologique d'Uccle à Bruxelles qui n'évoque également aucune tendance significative au niveau du nombre de jours secs à l'échelle annuelle. Une tendance à la hausse significative des jours sans précipitations au printemps est aussi mentionnée pour la période 1981-2019 (IRM, 2020).

Les périodes de sécheresse ont aussi fait l'objet d'une recherche. Aucune tendance sur le nombre de jours consécutifs maximum calculé chaque année n'est relevée si ce n'est pour le BV de l'Ourthe. Cet indice augmente presque significativement (p -valeur=0,0756) sur la période d'avril à septembre. L'IRM constate depuis 1981 une augmentation significative de cet indice pendant la saison du printemps et une diminution durant la saison de l'hiver mais rien à l'échelle annuelle (IRM, 2020).

Les périodes de sécheresse ont des répercussions majeures à différents niveaux : environnemental, socio-économique et géopolitique. Sur le plan environnemental, elles affectent la biodiversité. Du point de vue socio-économique, elles impactent les secteurs agricoles, sylvicoles et l'approvisionnement en eau potable. Sur le plan géopolitique, les périodes de sécheresse soulèvent des questions de partage des ressources (Lamarque et al., 2022).

Comme mentionné dans l'état de l'art (section 2.1), il est désormais établi que le réchauffement climatique actuel conduira à une augmentation en Europe de la fréquence et de l'intensité des périodes de sécheresse (GIEC, 2021). La Wallonie doit être prête à faire face à ce défi climatique afin de réduire, à court, moyen et long termes, les répercussions souvent coûteuses et dommageables de ces sécheresses sur beaucoup de secteurs d'activité. Bien que des mesures aient déjà été mises en place en Belgique aux niveaux national et régional pour améliorer la gestion de ce phénomène, Thibaut and Ozer (2021) prouvent qu'elles restent insuffisantes. Ils mentionnent qu'optimiser la prévention et la planification, établir des seuils d'alerte accompagné de mesures concrètes, ainsi que promouvoir les approches d'adaptation et d'anticipation sont autant d'actions qui peuvent renforcer la capacité de l'homme à faire face à ce risque.

Il est aussi important de souligner que les changements au niveau des sécheresses, relevées dans ce mémoire, sont sur deux bassins dont les précipitations sont particulièrement abondantes comparé au reste du pays. Par conséquent, il est primordial de s'attarder davantage sur le sujet.

Il faut tout de même garder à l'esprit que les résultats du bilan annuel montrent que lorsqu'une année est très sèche, l'erreur sur le bilan est grande. Les données de précipitation fournies par l'IRM semblent donc sous-estimer les événements extrêmement secs. Il faut donc rester critique par rapport aux interprétations des résultats sur les précipitations. De même au niveau de l'ETR qui selon le bilan annuel, semble être sur-estimée.

6.1.2 Différence entre les précipitations et l'évapotranspiration

Tendances annuelles

La différence entre les précipitations et l'ETR, définie dans ce mémoire comme étant l'eau utile, a aussi été modifiée sur les 20 dernières années dans le BV de l'Amblève. En effet, cette contribution permettant d'alimenter les eaux souterraines et de surface a diminué significativement en raison des pluies qui ont baissées et non de l'ETR qui est restée stable. Au niveau du BV de l'Ourthe, aucune tendance significative ne peut confirmer un réel changement. Il est à noter que les modifications sur les 30 dernières années ne peuvent pas être observées étant donné que les données d'ETR ne remontent que jusque 2001.

Aucune étude n'a été trouvée concernant les changements passés de l'eau utile mais bien concernant les changements dans un futur proche à l'échelle de la Wallonie. Il existe cependant une étude sur les changements de l'eau utile dans un futur proche, menée par Sohier and Degré (2021) qui prédit une augmentation de cette variable en Wallonie pour la période 2031-2051 comparé à la période 2000-2019.

Tendances saisonnières

A l'échelle saisonnière aucune tendance significative n'a été relevée dans ce mémoire.

Évènements extrêmes

Cette diminution des évènements extrêmes évoquée dans la section 6.1.1 entraîne un changement au niveau de l'eau utile dont le percentile 95 (p95) diminue significativement pour les deux bassins à l'échelle annuelle et à l'échelle du semestre entre octobre et mars seulement pour le BV de l'Amblève.

Ce qui est intéressant de voir c'est que pour le BV de l'Amblève, le p95 de l'eau utile diminue en raison de la diminution du p95 des précipitations annuelles et du semestre entre octobre et mars. Par contre pour le BV de l'Ourthe à Tabeux, cette diminution du p95 de l'eau utile est liée à la diminution du p95 de l'ETR en été. Bien que les deux bassins soient limitrophes les tendances sur les variables hydrologiques sur les 20 dernières années peuvent différer. Une des hypothèses avancées serait liée à l'occupation du sol où le BV de l'Ourthe est constitué davantage de cultures et le BV de l'Amblève de prairies. Ceci expliquerait pourquoi l'ETR diminue significativement dans le BV de l'Ourthe.

6.1.3 Débits

Une augmentation de la température de l'air couplée à une augmentation de l'ET0 et une diminution des précipitations aurait pour conséquences d'accentuer les débits d'étiages et d'abaisser le niveau des nappes phréatiques (Agence Wallonne de l'air et du climat, 2011).

En ce qui concerne les débits, ce phénomène est observé au niveau du BV de l'Amblève où les débits d'étiages augmentent.

En effet, les débits extrêmement faibles changent sur les 30 dernières années pour le BV de l'Amblève où ils diminuent significativement.

A côté de cela, le nombre d'impulsions de faibles débits diminue également pour ce bassin ainsi que les faibles débits relevés en avril.

Les débits altérés ne sont pas sans conséquence pour le secteur du tourisme (kayak), de l'industrie au niveau du refroidissement des centrales et de l'environnement affectant les écosystèmes (Grandry et al., 2018). Rolls et al. (2012) montrent que les faibles débits contrôlent l'étendue de l'habitat des écosystèmes aquatiques. Ils peuvent aussi avoir un impact sur la composition du biote, la chaîne trophique ou encore la capacité de charge. Ces débits influencent les changements

dans les conditions de l'habitat et la qualité de l'eau. Ils affectent les sources et les échanges de matières et d'énergie dans les écosystèmes fluviaux. Enfin, les faibles débits limitent la connectivité et la diversité des habitats.

Quant au nombre d'impulsions de faibles débits, celui-ci impacte la fréquence et la durée du stress dans des conditions anaérobies pour les plantes (Zhang et al., 2015).

La diminution des faibles débits n'est pas observée au niveau du BV de l'Ourthe à Tabreux où seuls les faibles débits au mois de février sur la période 1991-2022 sont en augmentation. Il est difficile de donner des conclusions sur les débits étant donné que peu de tendances significatives ont été relevées sur la période d'étude au travers de l'analyse des indicateurs d'altération hydrologique. Les tendances sont généralement à la baisse mais les pentes ne sont pas significatives. Une hypothèse serait que les débits soient influencés par des ouvrages hydrauliques pour pourraient engendrer des variabilités au niveau de cette variable.

Le peu de tendance observée est aussi une constatation faite par Grandry et al. (2018). Ils évoquent notamment que pour les deux bassins, la tendance, sur une période minimum de 30 ans, des débits maximum annuels n'est pas significative non plus. Le type de tendance enregistré serait lié à la topographie de la Région wallonne où dans les zones de faibles altitudes, les débits maximums annuels semblent augmenter positivement et à l'inverse dans les zones de hautes altitudes.

Toutefois, les tendances opposées entre ce qui est observé au niveau des Ardennes de l'Est et de l'Ouest ne sont pas explicables par la topographie étant donné qu'elles sont situées approximativement à la même altitude (figure 6.3). Grandry et al. (2018) émet l'hypothèse que ceci serait lié à la couverture forestière qui est beaucoup plus importante dans l'ouest des Ardennes que dans l'est des Ardennes. Il est intéressant de mentionner aussi que selon Grandry et al. (2018), la modélisation hydrologique réalisée dans leur étude montre que les changements climatiques ne sont pas la seule raison pour laquelle un changement au niveau des débits est observé.

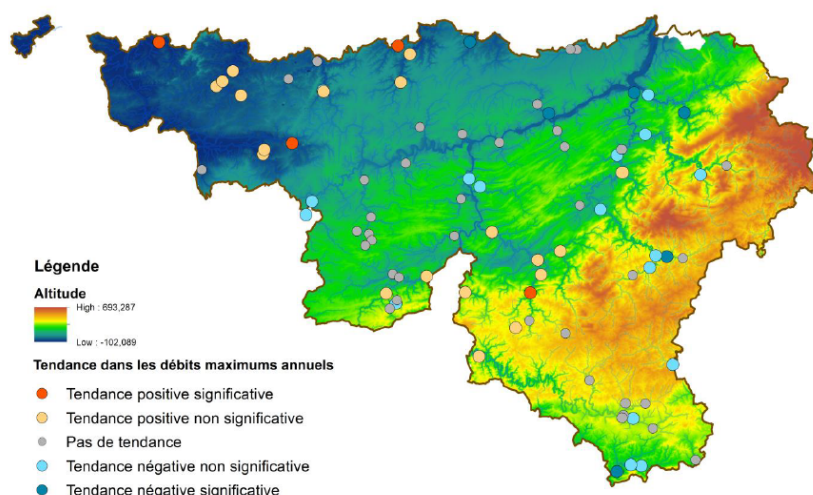


FIGURE 6.3 – Carte représentant la topographie de la Wallonie où sont reprises les stations de l'étude HydroTrend ainsi que les tendances obtenues pour les débits maximum annuels (Grandry et al., 2018).

6.1.4 Niveau des nappes

Un changement au niveau des nappes sur les 30 dernières années a été observé. Celles-ci sont en baisse dans les deux bassins, excepté une seule nappe dans le BV de l'Amblève mais dont la pente n'est pas significative. Ceci rejoint l'hypothèse que ces nappes diminuent avec l'augmentation de la température, de l'ET0 et de la diminution des précipitations, comme expliqué au début de cette section 6.1.3 ci-dessus. Aussi, comme l'eau utile diminue, l'eau disponible pour la recharge des nappes diminue forcément.

Par ailleurs, comme il a été montré précédemment, les sécheresses météorologiques sont en hausse, ce qui limite la recharge des nappes par les précipitations. Durant ces périodes, la demande en eau augmente ce qui pourrait engendrer des prises d'eau plus conséquentes. Sur trois stations piézométriques présentes dans le BV de l'Amblève seule une nappe diminue significativement sur les 30 dernières années. Il semblerait que les nappes qui sont plus proches de la rivière sont moins vulnérables que les autres.

Concernant le BV de l'Ourthe, uniquement une nappe a une tendance à la baisse qui est significative. Plusieurs hypothèses pourraient être avancées. Premièrement, cette nappe mesurée à Tohogne à l'aide de la station PZ34044, est la seule située juste à côté d'un captage d'eau souterraine (figure 6.4). Les prélèvements effectués par ce dernier pourraient être abusifs.

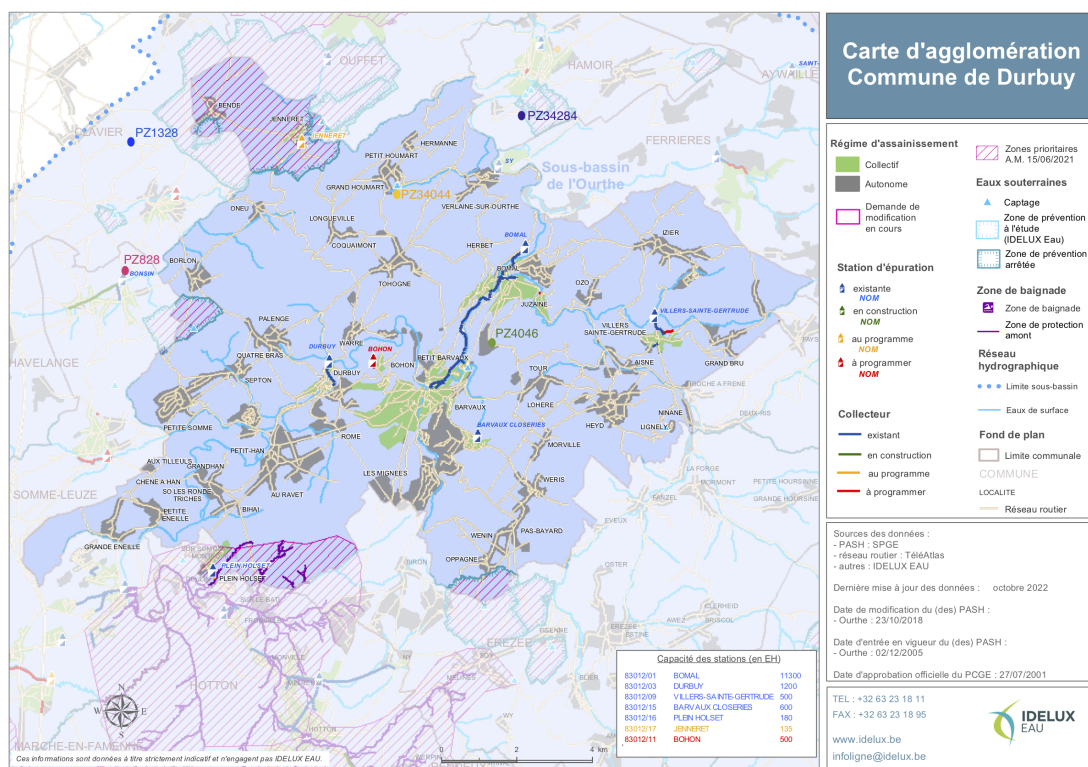


FIGURE 6.4 – Carte représentant l'agglomération de la commune de Durbuy avec les captages et les stations piézométriques présentes sur le territoire (PZ828, PZ1328, PZ4044, PZ34384, PZ4046 (IDELUX, 2022).

Cette diminution pourrait également être liée à l'hydrogéologie de la nappe qui repose sur une formation très hétérogène présentant des aquifères, des aquicludes et des aquitards contrairement aux autres nappes proches de celle-ci qui sont sur des aquifères calcaires. Les connaissances de ce domaine vont au-delà des limites de ce mémoire. Ce point n'est donc pas davantage développé.

Ces résultats présentés ne sont pas en accord avec ce qui est observé à l'échelle de la masse d'eau souterraine en Wallonie (figure 4.4). Ces analyses remontent à 2009 pour la masse d'eau BRWM023 et BRWM021, et 2016 pour la BRWM100 (SPW, 2010a) (SPW, 2010b) (SPW, 2016). Il en ressort qu'aucune tendance à la baisse significative n'est recensée pour l'ensemble des masses d'eau souterraines reprenant les stations étudiées. Ceci montre qu'à une plus grande échelle spatiale, peu de changements sont observés. Cependant il faut rester critique étant donné que ces résultats sont liés à une évaluation qui n'est pas récente et qui pourrait cacher des tendances se dégageant par la suite avec l'enchaînement des années sèches évoqué dans ce mémoire.

A l'échelle du bassin, le stock d'eau des nappes n'a pas changé. Il faut bien rester critique quant à cette affirmation car étant donné les relevés de données très récentes, l'évolution de ce stock n'a pas pu être évalué sur une période plus longue que 10 ans.

Il est compliqué de tirer des conclusions sur les nappes car sachant que les données ne sont journalières que depuis 2010, il n'est pas possible de faire des analyses au niveau des maxima et

minima ou encore des analyses saisonnières pour détecter un changement sur la période d'étude. Néanmoins, la tendance au niveau annuel est clair : les nappes sont en baisse sur les 30 dernières années.

Malgré les disparités entre les résultats et les recherches scientifiques, la conclusion est évidente : le changement climatique est bel et bien présent en Wallonie.

6.2 Discussion de la méthodologie

Pour diverses raisons, la méthodologie mise en place pour élaborer ce mémoire a mis un temps assez conséquent à se construire ce qui n'a malheureusement pas permis d'aller en profondeur dans l'analyse intra-annuelle des variables hydrologiques. Tout d'abord, le choix des données a demandé de la réflexion, est-ce qu'il fallait étudier plutôt les données radars ou ponctuelles de l'IRM ? Quelle source de donnée d'évapotranspiration était la plus adéquate ? ...

Ensuite, un temps important a été investi dans la prise en main des divers logiciels comme QGIS et celui des indicateurs d'altération hydrologique (IHA) ou encore dans la manipulation du langage python pour construire et traiter les données.

De plus, le traitement des données pouvait être compliqué. Par exemple, comment manipuler un fichier gigantesque contenant des données journalières sur une période de 30 ans de précipitations et ET0 pour des pixels espacés de 5km sur toute la Belgique, et finalement, l'appliquer uniquement sur la zone d'intérêt ? C'est pourquoi dans un premier temps, une petite zone d'étude a été sélectionnée pour réduire la quantité de données à traiter.

En outre, le bilan hydrologique annuel pouvant être calculé une fois toutes les données traitées, a permis de mettre en évidence qu'il faut bien se renseigner sur les stations utilisées avant d'en analyser les séries temporelles. En effet, dans ce cas-ci, initialement la station 5901 à Comblain-au-pont était utilisée pour redéfinir l'exutoire du BV de l'Ourthe. Le bilan n'était pas respecté parce qu'en réalité cette station n'est pas un limnimètre, mais bien le résultat d'une modélisation. L'incertitude étant trop grande, le travail a donc dû être recommencé.

Il a été aussi constaté que l'année hydrologique influence la significativité. En effet, si l'année prise en compte commence le premier janvier et se finit le 31 décembre, les tendances sur les précipitations ne sont pas significatives alors que sur une année du premier octobre au 31 septembre, elles le sont. De même concernant le niveau des nappes souterraines, plus de tendances significatives à la baisse sont relevées si l'année hydrologique est définie à partir du premier janvier. Aucun changement n'est par contre observé concernant les débits et l'évapotranspiration (ET0, ETR et ETP).

En prenant du recul, bien que le bilan pourra toujours être amélioré en faisant davantage de recherches sur les prises d'eau anthropiques où en réduisant les hypothèses faites sur le stock d'eau, il est tout à fait possible d'utiliser cette méthodologie construite, à n'importe quelle échelle spatiale, par exemple pour l'ensemble de la Wallonie.

6.3 Perspectives

Dans les études à venir, comme il a été constaté que l'analyse de deux bassins limitrophes relevait des différences, il serait intéressant de se pencher sur l'ensemble des BV wallons pour voir si des tendances communes se dégagent au niveau des observations passées.

Par ailleurs, maintenant que la fiabilité des données est prouvée au travers du bilan hydrologique, une étude sur les changements futurs, en utilisant des modèles, serait conseillée. Si déjà sur 30 ans, des changements significatifs sont relevés au niveau de bassins connus pour leur régime de précipitations abondantes et régulières toute l'année, et sachant, avec l'état de l'art, que le changement climatique est de plus en plus rapide, il est grand temps de s'activer. Vu les conséquences économiques, sociales et environnementales importantes, il est prioritaire d'anticiper en développant ou améliorant des plans de gestion adaptés afin de préserver un maximum les ressources.

A côté de cela, ce mémoire a relevé de la significativité au niveau de l'évapotranspiration. Les recherches pourraient être approfondies d'une part sur son estimation, car c'est une composante majeure du cycle de l'eau qu'il est nécessaire de quantifier le plus justement possible, d'autre part, sur le lien entre cette variable et les rendements des cultures ou des éventuels dépérissements des forêts au sein des BV.

En outre, étant donné que certaines nappes sont en diminution et que des enregistrements automatiques journaliers sont disponibles depuis seulement 2010, il est important de continuer l'analyse de tendance sur le stock d'eau dans les années à venir pour voir si, sur une échelle de temps suffisamment grande, un changement peut être relevé ou pas.

Enfin, étant donné les erreurs sur le bilan hydrologique, une attention particulière pourrait être consacrée au renforcement des outils de mesure des données.

Chapitre 7

Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif d'analyser d'éventuels changements dans les variables hydrologiques, notamment les précipitations, l'évapotranspiration, les débits et le niveau des nappes, sur les trente dernières années suite aux changements climatiques. L'étude s'est focalisée sur deux bassins versants wallons, à savoir le bassin de l'Amblève à Martinrive et le bassin de l'Ourthe à Tabreux.

Initialement, les données de précipitations et d'évapotranspiration de référence (ET0), interpolées sur une maille de 5 km, ont été collectées pour les deux bassins sur base de fichiers fournis par l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM). Les produits dérivés du satellite MODIS ont également été utilisés pour les variables d'évapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR). L'utilisation de la plateforme Google Earth Engine a permis d'obtenir directement un cumul sur 8 jours de ces variables pour chaque bassin. De plus, des données ponctuelles de terrain provenant de stations limnimétriques et piézométriques, mesurant le débit à l'exutoire et le niveau des nappes dans le bassin versant, ont été téléchargées du site de "l'Hydrométrie en Wallonie" et de "la Piézométrie en Wallonie".

La base de données ainsi constituée a été exploitée de deux manières. D'une part, les données géoréférencées ont été visualisées à l'aide du logiciel QGIS. D'autre part, les séries temporelles ont été traitées dans un Jupyter Notebook à l'aide du langage Python.

La première étape de l'analyse consistait à établir le bilan hydrologique annuel pour évaluer la fiabilité des variables en vue d'une analyse plus approfondie de leurs tendances observées sur les trente dernières années. À cette fin, les données de précipitations ont été moyennées pour les deux bassins d'étude à l'aide des polygones de Thiessen construits grâce au logiciel QGIS. De même, le stock annuel des nappes a été calculé en utilisant cette méthode pour les deux bassins. Les données d'ETR, cumulées sur huit jours, ont été converties en données journalières afin de calculer l'ETR annuel. Enfin, les débits journaliers ont été intégrés chaque année sur chacun des bassins étudiés.

Le bilan hydrologique annuel ainsi obtenu était respecté, compte tenu des incertitudes sur les variables. Cependant, il a été constaté que l'erreur sur le bilan annuel augmentait lors des

années sèches, suggérant que les pluies semblaient être sous-estimées et l'ETR sur-estimée lors de ces années.

L'analyse des tendances a mis en lumière des changements dans les variables hydrologiques au cours des 30 dernières années pour les deux bassins d'étude. Il convient de noter que toutes les variables n'ont pas pu être analysées sur l'ensemble de la période en raison notamment de l'indisponibilité des séries temporelles pour l'ETR et l'ETP au-delà de l'année 2001.

Les résultats significatifs sont les suivants : pour le bassin de l'Amblève, les précipitations annuelles ont diminué sur les 30 dernières années, en particulier durant la saison estivale et entre avril et septembre au cours des 20 dernières années. Des modifications ont également été relevées au niveau des extrêmes, notamment une augmentation du nombre de jours secs entre avril et septembre et au printemps, ainsi qu'une augmentation des précipitations extrêmes durant le semestre d'octobre à mars au cours des 30 dernières années. En parallèle, le percentile 95, qui reflète les fortes précipitations, a diminué annuellement et durant le semestre d'octobre à mars au cours des 20 dernières années. L'eau utile, englobant l'eau destinée à l'alimentation des eaux de surface et souterraines, a baissé au cours des 20 dernières années. L'analyse des débits, réalisée au moyen du logiciel des indicateurs d'altération hydrologique, n'a révélé que peu de tendances significatives, à l'exception des faibles débits. En effet, le nombre d'épisodes de faible débit a diminué, de même que les faibles débits observés en avril. Enfin, les débits extrêmement faibles ont également enregistré une baisse. Sur les trois nappes pour lesquelles des données étaient disponibles, une seule a vu son niveau diminuer de manière significative.

Le bassin de l'Ourthe a globalement présenté des résultats similaires, à quelques exceptions près. Premièrement, la tendance à la baisse des précipitations annuelles est proche de la significativité. En ce qui concerne les événements extrêmes, la diminution du nombre de jours secs s'est limitée à la saison estivale, tandis que la période comprenant le nombre maximal de jours consécutifs sans pluie entre avril et septembre a presque atteint la significativité. Parallèlement, les précipitations extrêmes ont connu une augmentation au printemps. L'ETR a diminué pendant la saison estivale, de même que son percentile 95 au cours des 20 dernières années. L'eau utile n'a présenté aucune tendance significative, sauf en ce qui concerne le percentile 95, qui a connu une diminution annuelle au cours des 20 dernières années. En ce qui concerne les débits, aucune tendance significative n'a été observée, à l'exception des faibles débits de février, qui ont augmenté sur les 30 dernières années. Toutes les nappes ont enregistré une baisse de leur niveau, à l'exception d'une seule, pour laquelle une diminution significative a été observée sur les 30 dernières années.

En somme, avec une augmentation des températures, de l'ET0 et une diminution des précipitations, les débits sont impactés et diminuent, de même pour les nappes. Ce phénomène est uniquement observé pour le BV de l'Amblève, les tendances sur les débits du BV de l'Ourthe n'étant pas significatives. L'eau disponible pour les eaux de surface et souterraines diminuent sur les 20 dernières années. Conjointement, l'ETR reste stable ce qui laisse penser que les écosystèmes s'adaptent ou que les rendements des cultures diminuent.

Même si les résultats obtenus ne concordent pas toujours avec les recherches scientifiques, il peut être conclu que le changement climatique a un impact sur les variables hydrologiques des bassins de l'Ourthe et de l'Amblève, qui sont particulièrement connus pour leur régime de précipitations régulières. La Wallonie étant capitale pour l'approvisionnement en eau du pays, multiplier les études au niveau local sur les changements passés et futurs pour obtenir des tendances communes permettrait de mettre en place des plans stratégiques d'atténuation et/ou d'adaptation à ces changements.

De plus, il faudrait : renforcer les systèmes de surveillance qui ne semblent pas toujours estimer correctement les variables, poursuivre les recherches concernant l'évapotranspiration relevant de la significativité et qui s'avère être difficile à quantifier mais essentielle dans le cycle de l'eau, et enfin continuer les suivis des nappes dont les données journalières ne remontent que jusque 2010.

Bibliographie

- Agence Wallonne de l'air et du climat (2011, May). L'adaptation au changement climatique en région wallonne. Technical report, Groupement EcoRes-TEC.
- AQUAWAL, S. La Wallonie, réservoir d'eau de la Belgique (2008) | AQUAWAL, tout savoir sur l'eau.
- Baguis, P., E. Roulin, P. Willems, and V. Ntegeka (2010, January). Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium. Theoretical and Applied Climatology 99(3), 273–286.
- Baguis, Pierre, Ntegeka, Victor, Willems, Patrick, and Roulin, Emmanuel (2010). Climate change and hydrological extremes in Belgian catchments - KU Leuven.
- Baroni, G., B. Schalge, O. Rakovec, R. Kumar, L. Schüller, L. Samaniego, C. Simmer, and S. Attinger (2019). A Comprehensive Distributed Hydrological Modeling Intercomparison to Support Process Representation and Data Collection Strategies. Water Resources Research 55(2), 990–1010.
- Bartok, B., M. Wild, D. Folini, D. Lüthi, S. Kotlarski, C. Schär, R. Vautard, S. Jerez, and Z. Imecs (2017, October). Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. Climate Dynamics 49.
- Bauwens, A., C. Sohier, and A. Degré (2011). Hydrological response to climate change in the Lesse and the Vesdre catchments : contribution of a physically based model (Wallonia, Belgium). Hydrology and Earth System Sciences 15(6), 1745–1756.
- Brouwers, J., B. Peeters, M. Van Steertegem, N. Van Lipzig, H. Wouters, J. Beullens, M. Demuzere, P. Willems, K. De Ridder, R. De Troch, P. Termonia, T. Vansteenkiste, M. Craninx, W. Maetens, W. Defloor, and K. Cauwenberghs (2015). MIRA-Climate Report 2015- about observed and future climate changes in Flanders and Belgium. Technical report.
- Brouyère, S., G. Carabin, and A. Dassargues (2004, April). Climate change impacts on groundwater resources : modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. Hydrogeology Journal 12(2), 123–134.
- Christensen, J., T. Carter, M. Rummukainen, and G. Amanatidis (2007, May). Evaluating the Performance and Utility of Regional Climate Models : the PRUDENCE Project. Climatic Change 81, 1–6.

- Contrat Rivière Ourthe (s.d.). Atlas de l'Ourthe – Contrat Rivière Ourthe. <https://www.cr-ourthe.be/info-ourthe/atlas-de-lourthe/>.
- De Ridder, K., K. Couderé, M. Depoorter, I. Liekens, X. Pourria, D. Steinmetz, E. Vanuytrecht, K. Verhaegen, and H. Wouters (2020, July). Evolution of the socio-economic impact of climate change in Belgium. Technical report.
- de Wit, M. J. M., B. van den Hurk, P. M. M. Warmerdam, P. J. J. F. Torfs, E. Roulin, and W. P. A. van Deursen (2007, June). Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. Climatic Change 82(3), 351–372.
- Degré, A. and M. Grandry (2021, November). Pluies, crues, sécheresses : les extrêmes deviennent-ils la norme ? Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège.
- Degré, A., C. Sohler, F. Colard, N. Kummert, A. Bauwens, J. Rauw, and E. Beckers (2011, January). L'hydrologie, une partenaire de la géomorphopédologie pour une gestion transéchelle des grands enjeux environnementaux. BASE.
- Derycke, F. and J. Fried (1982). Bilan des ressources en eau souterraine de la Belgique. CECA, CEE, CEEA, Bruxelles – Luxembourg, 260p.
- Durand, F. (2018). Réchauffement climatique : des enjeux colossaux pour de nouveaux projets de sociétés.
- European Environment Agency (2021a, November). Heavy precipitation in Europe. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/precipitation-extremes-in-europe-3/assessment-1>.
- European Environment Agency (2021b, November). Mean precipitation. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/european-precipitation-2/assessment>.
- Faranda, D., S. Pascale, and B. Bulut (2023, February). Persistent anticyclonic conditions and climate change exacerbated the exceptional 2022 European-Mediterranean drought. Environmental Research Letters 18(3), 034030. Publisher : IOP Publishing.
- GIEC (2013). Glossaire [planton, s. (coord.)]. in : 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. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique.
- GIEC (2021). Résumé à l'intention des décideurs. in : Changement climatique 2021 : les bases scientifiques physiques. contribution du groupe de travail 1 au sixième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- Grandry, M., A. Degré, and S. Gailliez (2018, November). HydroTrend - Rapport final. Publisher : ULiège - Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgium.
- Grossiord, C., T. N. Buckley, L. A. Cernusak, K. A. Novick, B. Poulter, R. T. W. Siegwolf, J. S. Sperry, and N. G. McDowell (2020, June). Plant responses to rising vapor pressure deficit. New Phytologist 226(6), 1550–1566.

- G rard Guyot (1999). Climatologie de l’environnement. Paris : DUNOD.
- Hall, J., B. Arheimer, M. Borga, R. Br zdl, P. Claps, A. Kiss, T. R. Kjeldsen, J. Kriau i nien , Z. W. Kundzewicz, M. Lang, M. C. Llasat, N. Macdonald, N. McIntyre, L. Mediero, B. Merz, R. Merz, P. Molnar, A. Montanari, C. Neuhold, J. Parajka, R. a. P. Perdig o, L. Plavcov , M. Rogger, J. L. Salinas, E. Sauquet, C. Sch r, J. Szolgay, A. Viglione, and G. Bl schl (2014, July). Understanding flood regime changes in Europe : a state-of-the-art assessment. Hydrology and Earth System Sciences 18(7), 2735–2772. Publisher : Copernicus GmbH.
- Harris, I., P. Jones, T. Osborn, and D. Lister (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology 34(3), 623–642.
- IDELUX (2022). IDELUX, 5 intercommunales. <https://www.idelux.be/servlet/Repository/?IDR=48475>.
- IRM (2020). Rapport climatique 2020 - De l’information aux services climatiques. Technical report.
- King, D. A., D. M. Bachelet, A. J. Symstad, K. Ferschweiler, and M. Hobbins (2015, February). Estimation of potential evapotranspiration from extraterrestrial radiation, air temperature and humidity to assess future climate change effects on the vegetation of the Northern Great Plains, USA. Ecological Modelling 297, 86–97.
- Lamarque, P., A. Tondeur, P. Marbaix, B. Gaino, and J.-P. van Ypersele (2022, April). L’adaptation aux changements climatiques en Wallonie : synth se et points d’attention pour l’actualisation des connaissances. Technical report, Plateforme wallonne pour le GIEC.
- Mangini, W., A. Viglione, J. Hall, Y. Hundecha, S. Ceola, A. Montanari, M. Rogger, J. L. Salinas, I. Borz , and J. Parajka (2018, March). Detection of trends in magnitude and frequency of flood peaks across Europe. Hydrological Sciences Journal 63(4), 493–512.
- Marbaix, P. and J.-P. van Ypersele (2004, January). Impacts des changements climatiques en Belgique.
- Moss, R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O’Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P. Runci, R. Stouffer, D. van Vuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J. P. van Ypersele, and M. Zurek (Eds.) (2008). Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Geneva, Switzerland : Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Nagavciuc, V., S. L. L. Michel, D. F. Balting, G. Helle, M. Freund, G. H. Schleser, D. N. Steger, G. Lohmann, and M. Ionita (2023, June). A past and present perspective on the European summer vapour pressure deficit. Climate of the Past Discussions, 1–29. Publisher : Copernicus GmbH.
- NASA (s.d.). MODIS Web. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>.

- Rolls, R. J., C. Leigh, and F. Sheldon (2012, December). Mechanistic effects of low-flow hydrology on riverine ecosystems : ecological principles and consequences of alteration. Freshwater Science 31(4), 1163–1186. Publisher : The University of Chicago Press.
- Service public de Wallonie (2016). Fiche de caractérisation de la masse d’eau RWM100 «Grès et schistes du massif ardennais : Lesse, Ourthe, Amblève». Technical report.
- Service public de Wallonie (2021). PGRI 2022-2027 - Inondations en Wallonie. <http://inondations.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/inondations/home/directive-inondation/plans-de-gestion-des-risques-dinondation/pgri-2022-2027.html>.
- Service public de Wallonie (2023, March). Identifier le gestionnaire d’un cours d’eau en Wallonie. <https://www.wallonie.be/fr/demarches/identifier-le-gestionnaire-dun-cours-deau-en-wallonie>.
- Service Public de Wallonie (s.d.). Carte hydrogéologique de wallonie. <http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo/concepts.htm#V.3>.
- Service public de Wallonie (s.d.a). Réseaux de mesure. <https://hydrometrie.wallonie.be/home/en-savoir-plus/reseaux-de-mesure.html>.
- Service public de Wallonie (s.d.b). Surveillance quantitative des nappes en Wallonie. <https://piezometrie.wallonie.be/home/en-savoir-plus/surveillance-quantitative-des-nappes-en-wallonie.html>.
- Service Public Fédéral Belge (2022a, November). Densité de la population. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/population/densite-de-la-population>.
- Service Public Fédéral Belge (2022b, June). Structure de la population. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/population/structure-de-la-population>.
- Service Public Fédéral Belge (2023). Description géographique de la Belgique. https://www.belgium.be/fr/la_belgique/connaitre_le_pays/geographie.
- Sohier, C. and A. Degre (2011). Modélisation pré-normative de pratiques agricoles et agro-environnementales en vue des plans de gestion des eaux de surface et souterraines en Région wallonne à l’aide du modèle EPICgrid-Qualvados. Technical report.
- Sohier, C. and A. Degré (2021, April). Modélisation prospective des impacts des pratiques agricoles sur la qualité du cycle de l’eau en Wallonie « Programme de recherche AQUAMOD ». Publisher : ULiège - Gembloux Agro-Bio Tech.
- SPF (2023). Réchauffement planétaire. <https://climat.be/>.
- SPW (2010a). District hydrographique international de la meuse : Etat des lieux de la masse d’eau souterraine rwm021 «calcaires et grès du condroz». <http://eau.wallonie.be/fme/RWM021.pdf>.

- SPW (2010b). District hydrographique international de la meuse : Etat des lieux de la masse d'eau souterraine rwm023 «calcaires et grès de la calestienne et de la famenne». <http://eau.wallonie.be/fme/RWM023.pdf>.
- SPW (2016). District hydrographique international de la meuse : Fiche de caractérisation de la masse d'eau rwm100 «grès et schistes du massif ardennais : Lesse, ourthe, amblève». <http://eau.wallonie.be/fme/RWM100.pdf>.
- SPW (2021, October). Prélèvements en eau - etat de l'environnement wallon. http://etat.environnement.wallonie.be/cms/render/live/fr_BE/sites/eew/contents/indicatorsheets/RESS2.html.
- SPW (s.d.). Coordination internationale - Inondations en Wallonie. <http://inondations.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/inondations/home/cours-deau/coordination-internationale.html>.
- SPW - DEE - Direction des Eaux souterraines (2023, February). Etat des nappes d'eau souterraine de la Wallonie. <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/>.
- SPWARNE (s.d.). Qu'est ce que la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE)? <http://eau.wallonie.be/spip.php?article1>.
- Tabari, H., M. T. Taye, and P. Willems (2015, August). Water availability change in central Belgium for the late 21st century. *Global and Planetary Change* 131, 115–123.
- Termonia, P., B. Van Schaeybroeck, L. De Cruz, R. De Troch, S. Caluwaerts, O. Giot, R. Hamdi, S. Vannitsem, F. Duchêne, P. Willems, H. Tabari, E. Van Uytven, P. Hosseinzadehtalaei, N. Van Lipzig, H. Wouters, S. Vanden Broucke, J.-P. van Ypersele, P. Marbaix, C. Villanueva-Birriel, X. Fettweis, C. Wyard, C. Scholzen, S. Doutreloup, K. De Ridder, A. Gobin, D. Lauwaet, T. Stavrakou, M. Bauwens, J.-F. Müller, P. Luyten, S. Ponsar, D. Van den Eynde, and E. Pottiaux (2018, August). The CORDEX.be initiative as a foundation for climate services in Belgium. *Climate Services* 11, 49–61.
- Teutschbein, C. and J. Seibert (2010). Regional Climate Models for Hydrological Impact Studies at the Catchment Scale : A Review of Recent Modeling Strategies. *Geography Compass* 4(7), 834–860.
- Thibaut, K. and P. Ozer (2021). Les sécheresses en Wallonie, un nouveau défi du changement climatique ? Quelques pistes pour améliorer la gestion de ce phénomène. *Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales* 45(3). Publisher : Université de Liege, Belgium.
- Vaes, G., P. Willems, and J. Berlamont (2002, February). 100 years of Belgian rainfall : are there trends? *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 45, 55–61.
- Van deVyver, H. (2012, June). Evolution of extreme temperatures in Belgium since the 1950s. *Theoretical and Applied Climatology* 107, 113–129.

- van Ypersele Jean-Pascal (2021). Ressources en eau et climat (2/2) : État actuel, risques et pistes d'adaptation. <https://plateforme-wallonne-giec.be/lettre-20>.
- W. Running, S., Q. Mu, M. Zhao, and A. Moreno (2019, January). User,Ãs Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). Technical Report version 2.0.
- Williams, J. R., C. A. Jones, and P. T. Dyke (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [EPIC, Erosion-Productivity Impact Calculator, mathematical models]. Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers] (USA).
- World Climate Research Programme (2022, October). CMIP. <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>.
- Wyard, C. (2018, December). Climate change in Belgium : recent and future evolution of global radiation and hydroclimatic conditions favouring floods using the regional climate model MAR. Publisher : ULiège - Université de Liège.
- Wyard, C., C. Scholzen, X. Fettweis, J. Van Campenhout, and L. François (2016, September). Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR. International Journal of Climatology *37*, 2782–2796.
- Zhang, Q., X. Gu, V. P. Singh, and X. Chen (2015, October). Evaluation of ecological instream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations. Journal of Hydrology *529*, 711–722.

Annexe A

Caractéristiques des RCP

TABLE A.1 – Caractéristiques principales des différents scénarios RCP

Scénario	Forçage radiatif [W/m ²]	Concentration [ppm CO ₂ -eq]	Trajectoire
RCP 2.6	Pic à 3 avant 2100 (après déclin)	Pic à 490 avant 2100 (après déclin)	Pic et déclin après 2100
RCP 4.5	Stabilisation à 4.5 après 2100	650	Stabilisation sans dépassement
RCP 6.0	Stabilisation à 6.0 après 2100	850	Stabilisation sans dépassement
RCP 8.5	>8.5 d'ici 2100	>1370 en 2100	Continue d'augmenter

Annexe B

Les outils du réseau WACONDAH

Je cite du site de "l'Hydrométrie en Wallonie" (Service public de Wallonie, sda) :

- Une centaine de pluviomètres à pesée (1 pour 150km^2 environ)
- 150 stations de mesure de niveaux d'eau dont une centaine avec courbe de tarage pour établir les débits
- 12 stations de mesures de débits par cordes croisées (ADM) sur les voies navigables dont les niveaux sont régulés par des barrages au fil de l'eau
- Trois stations de mesures de fonte de neige (pesée dynamique et mesure de hauteur)
- Plusieurs centaines de capteurs de positions relatifs aux ouvrages hydrauliques (réservoirs, écluses, vannes, pompes, évacuateurs...).

Annexe C

Coupe hydrogéologique des différentes unités hydrogéologiques où se trouvent les piézomètres du bassin d'étude

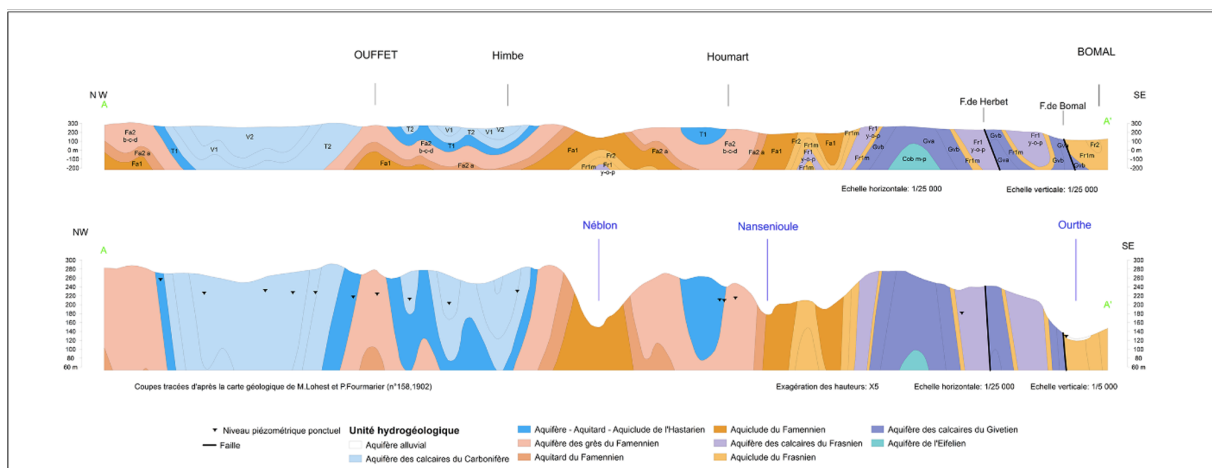


FIGURE C.1 – Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 49 5-6

Coupes hydrogéologiques de la carte Durbuy - Mormont 55/1-2

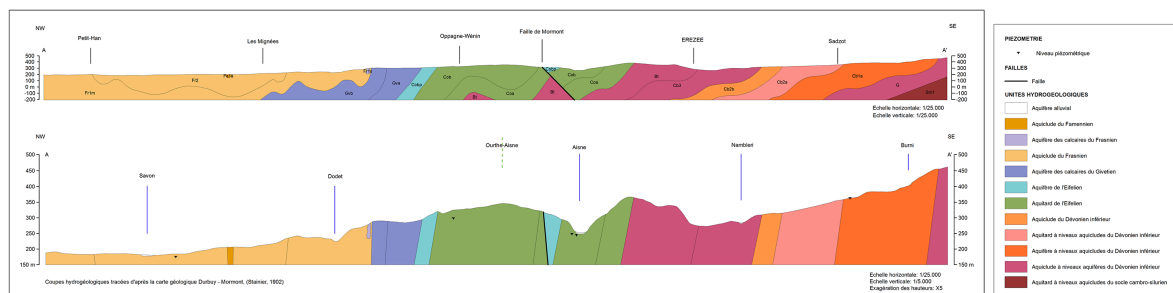
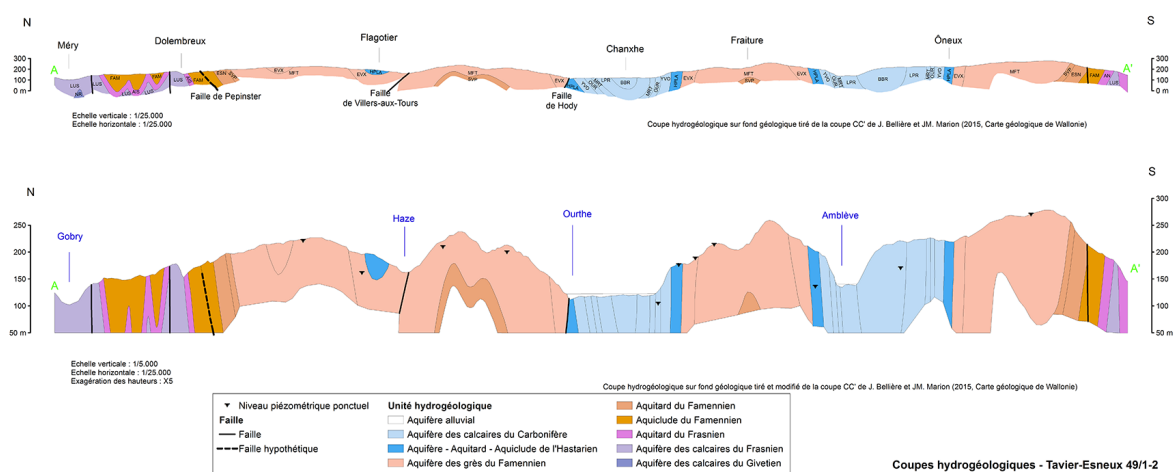
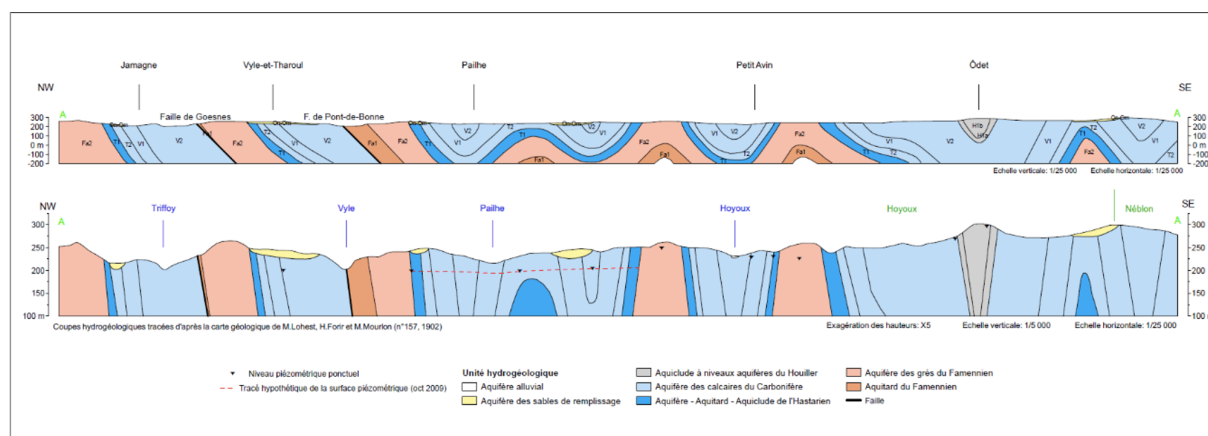
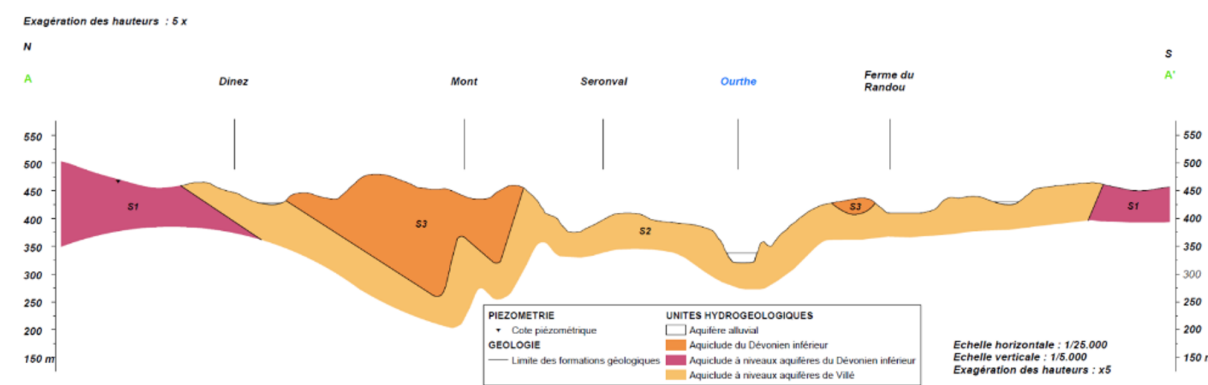


FIGURE C.2 – Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 55 1-2



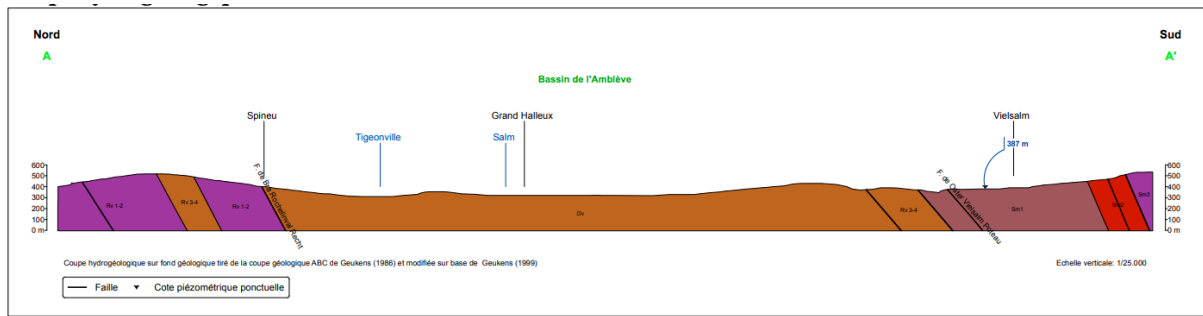


FIGURE C.6 – Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 56 1-2

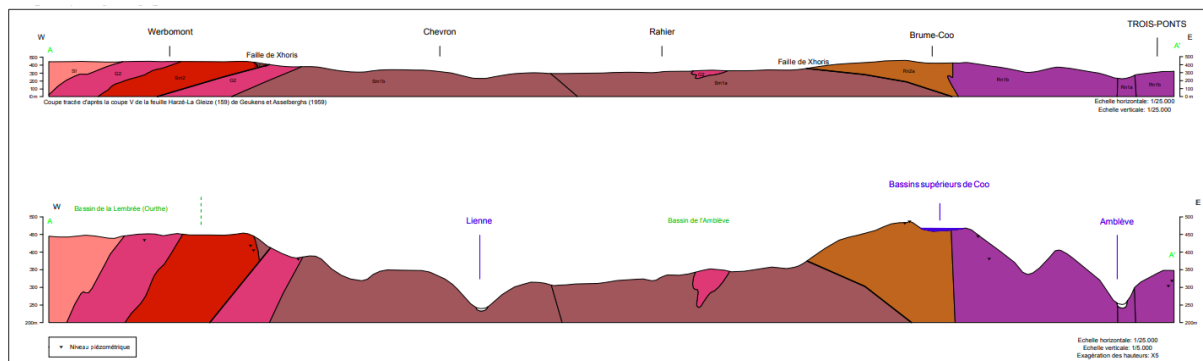


FIGURE C.7 – Coupe hydrogéologique de l'unité hydrogéologique 49 7-8

Annexe D

Lithologie et porosité effective et totale correspondantes

TABLE D.1 – Lithologie (SPW, 2010b)

Lithologie	Porosité totale (n) [%]	Porosité effective (n_e)[%]
Granites et Gneiss	0.02 - 2	0.1 - 2*
Quartzites	0.5 - 2	0 - 2*
Shales (argilites)	0.1 - 7.5	0.1 - 1*
Schistes (argilites schistosées)	0.1 - 7.5	0.1 - 2*
Calcaires et Dolomies primaires	0.5 - 15	0.1 - 14*
Dolomies secondaires	10 - 30	5 - 15*
Craies	0.5 - 45	0.5 - 15*
Grès, Psammites	3 - 38	3 - 25
Tufs volcaniques	30 - 40	5 - 15
Graviers	15 - 25	5 - 25
Sables	15 - 35	5 - 25
Silts	30 - 45	5 - 15
Argiles et limons	40 - 70	0.1 - 3

* dépend de la fissuration

Annexe E

Analyse exploratoire des données

Cette section reprend les séries temporelles des variables hydrologiques qui ont été traitées dans ce mémoire. Un histogramme permet de voir la distribution des données. Le cycle saisonnier est aussi présent.

Précipitations

Bassin versant de l'Amblève à Martinrive

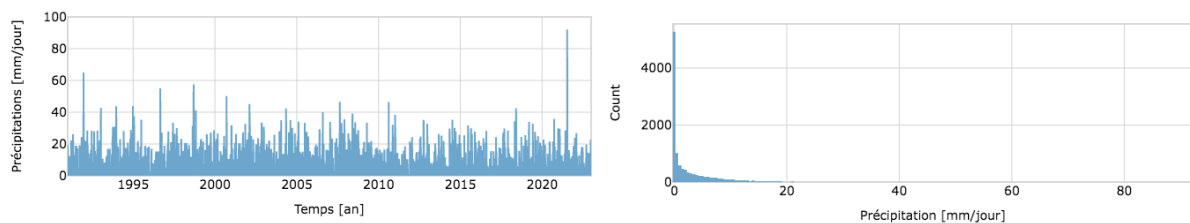


FIGURE E.1 – Série temporelle et histogramme des précipitations journalières sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive [mm/jour]

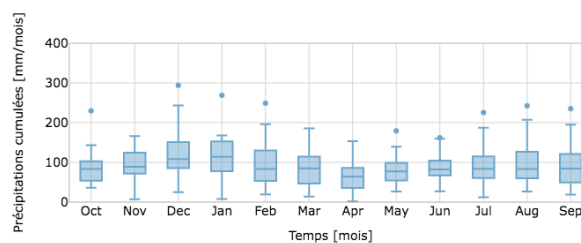


FIGURE E.2 – Cycle saisonnier des précipitations cumulées par mois sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive pour la période 1991-2022.

Bassin versant de l'Ourthe à Tabreux

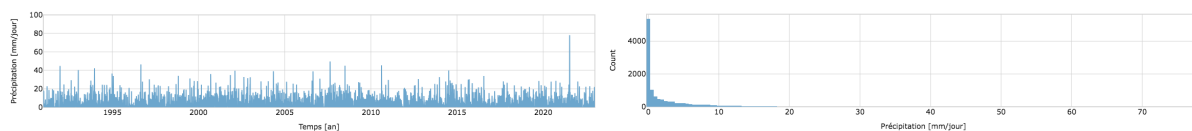


FIGURE E.3 – Série temporelle et histogramme des précipitations journalières sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux [mm/jour]

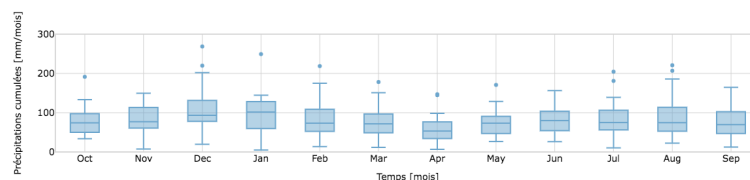


FIGURE E.4 – Cycle saisonnier des précipitations cumulées par mois sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux pour la période 1991-2022.

Evapotranspirations

Bassin versant de l'Amblève à Martinrive

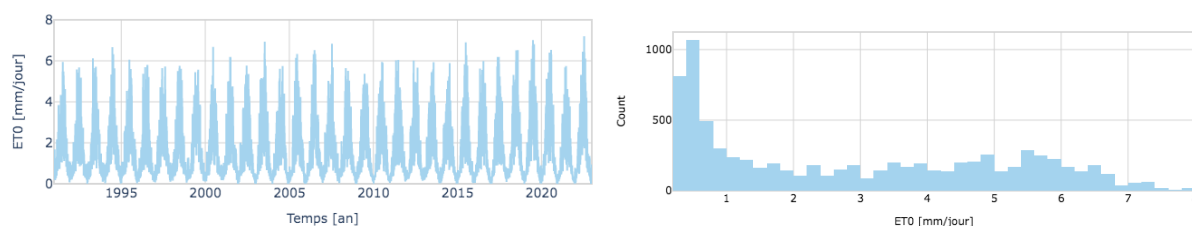


FIGURE E.5 – Série temporelle et histogramme de l'ET0 journalières sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive [mm/jour]

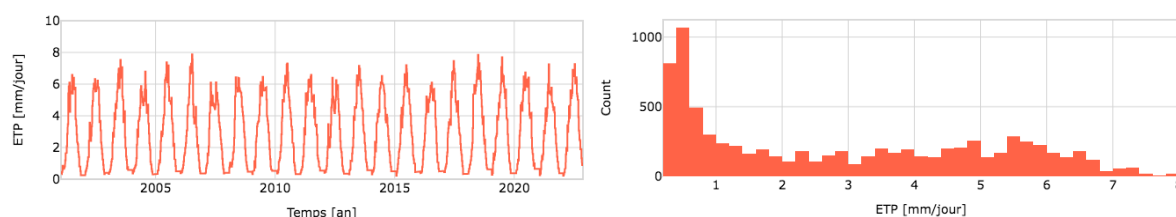


FIGURE E.6 – Série temporelle et histogramme de l'ETP journalières sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive [mm/jour]. Les données cumulées sur 8 jours ont été divisées par 8 obtenir des données journalières.

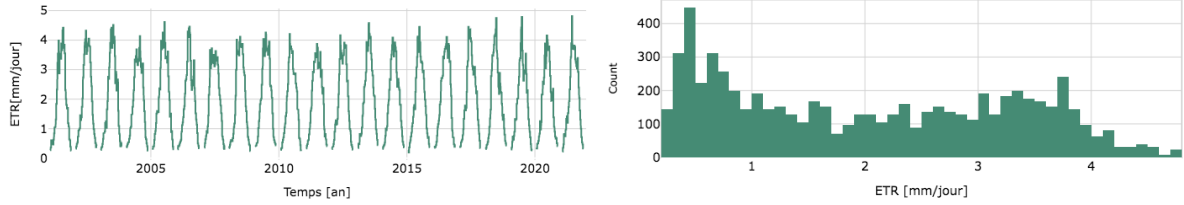


FIGURE E.7 – Série temporelle et histogramme de l'ETR journalières sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive [mm/jour]. Les données cumulées sur 8 jours ont été divisées par 8 obtenir des données journalières.

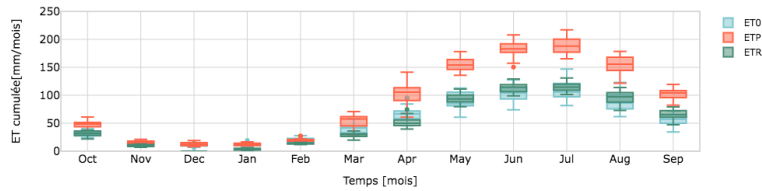


FIGURE E.8 – Cycle saisonnier de l'ET0, l'ETP et l'ETR cumulées par mois sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive pour la période 2001-2022.

Bassin versant de l'Ourthe à Tabreux

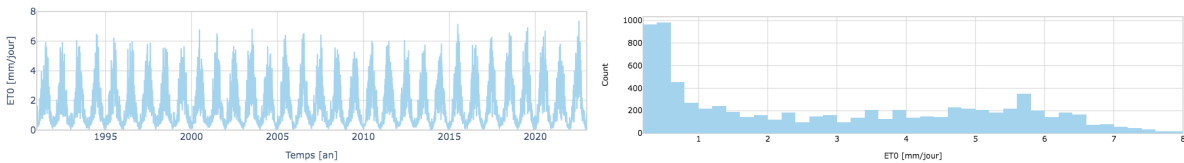


FIGURE E.9 – Série temporelle et histogramme de l'ET0 journalières sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux [mm/jour]

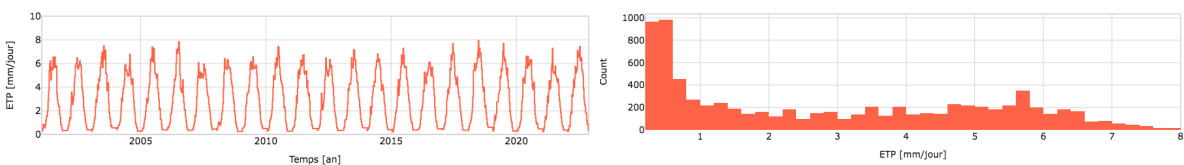


FIGURE E.10 – Série temporelle et histogramme de l'ETP journalières sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux [mm/jour]. Les données cumulées sur 8 jours ont été divisées par 8 obtenir des données journalières.

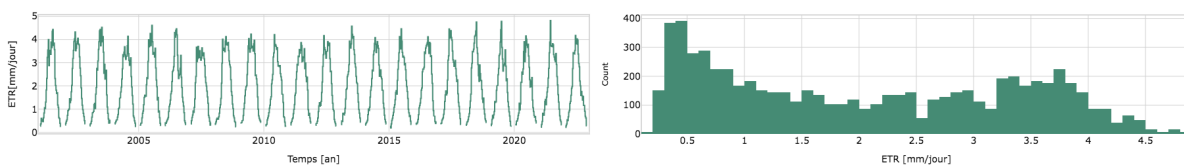


FIGURE E.11 – Série temporelle et histogramme de l'ETR journalières sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux [mm/jour]. Les données cumulées sur 8 jours ont été divisées par 8 obtenir des données journalières.

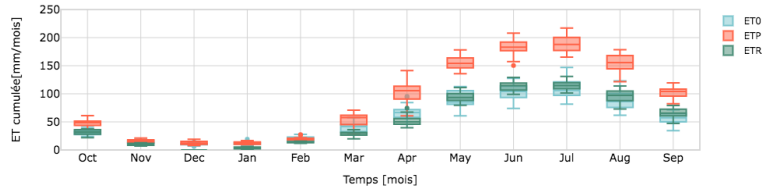


FIGURE E.12 – Cycle saisonnier de l'ET0, l'ETP et l'ETR cumulées par mois sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux pour la période 2001-2022.

Débit avant l'exutoire du Bassin versant

Bassin Versant de l'Amblève à Martinrive

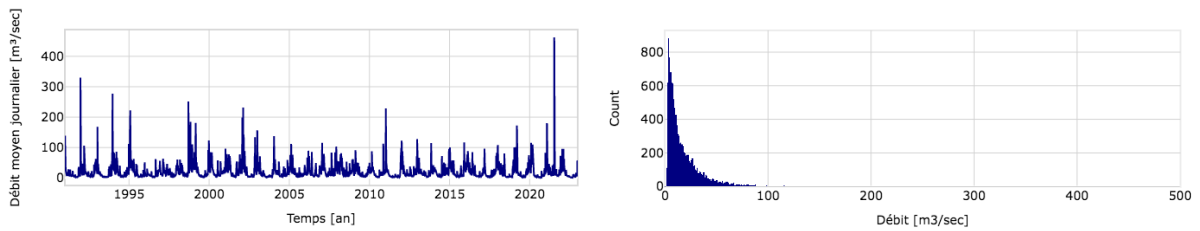


FIGURE E.13 – Série temporelle et histogramme du débit mesuré à la station 6621 à Martinrive [mm/jour]

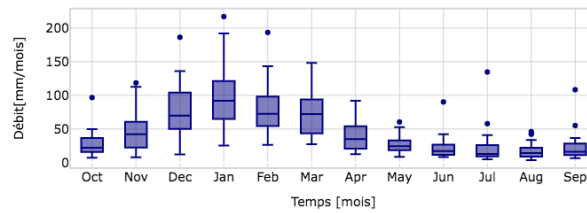


FIGURE E.14 – Cycle saisonnier des débits par mois mesuré à la station 6621 à Martinrive pour la période 1991-2022.

Bassin Versant de l'Ourthe à Tabreux

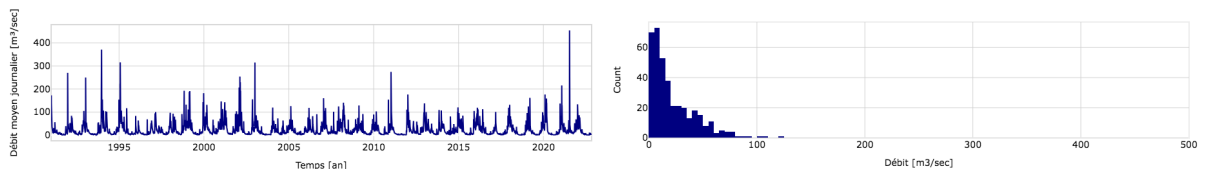


FIGURE E.15 – Série temporelle et histogramme du débit mesuré à la station 5921 à Tabreux [mm/jour]

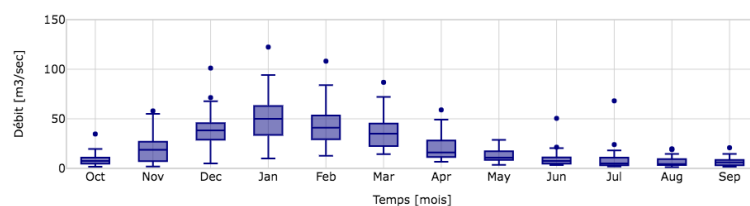


FIGURE E.16 – Cycle saisonnier des débits par mois mesuré à la station 5921 à Tabreux pour la période 1991-2022.

Nappes phréatiques

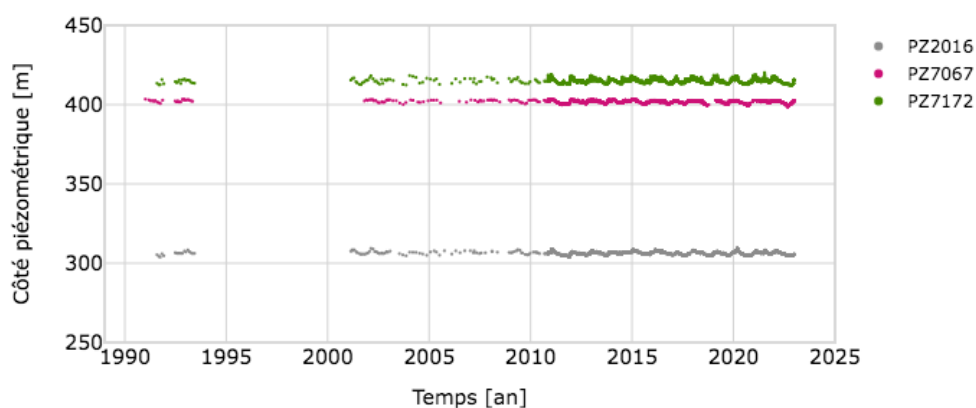


FIGURE E.17 – Côte piézométrique des nappes mesurées à l'aide des stations piézométriques PZ2016, PZ7067 et PZ7172 présentes au sein du bassin d'étude de l'Amblève.

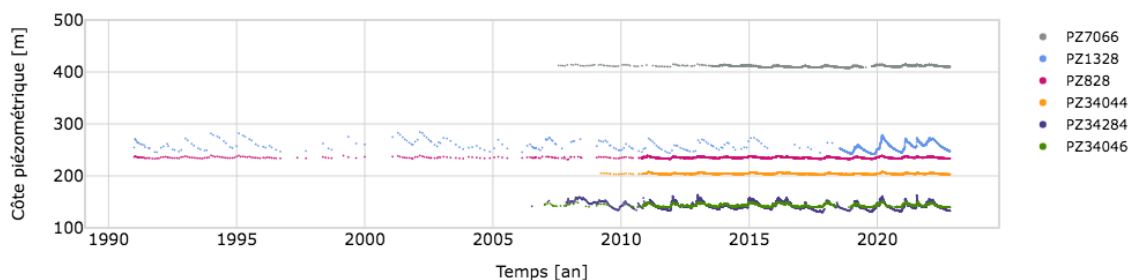


FIGURE E.18 – Côte piézométrique des nappes mesurées à l'aide des stations piézométriques PZ7066, PZ1328 et PZ828, PZ34044, PZ34284 et PZ34046 présentes au sein du BV d'étude de l'Ourthe à Tabreux.

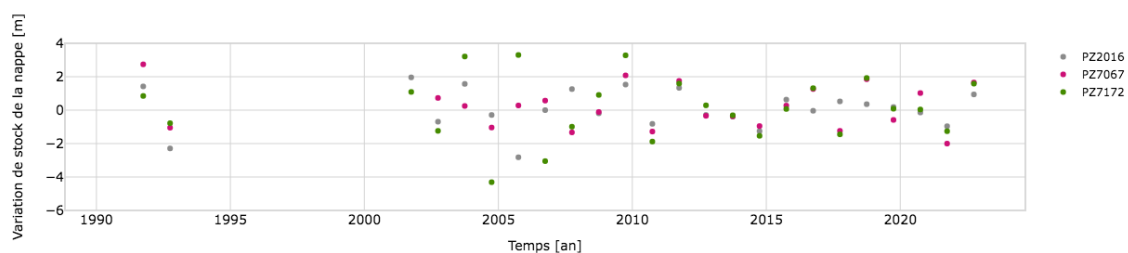


FIGURE E.19 – Variation du stock de la nappe en prenant la différence entre tous les premiers octobre de chaque année pour les stations piézométriques au sein du bassin versant d'étude de l'Amblève à Martinrive.

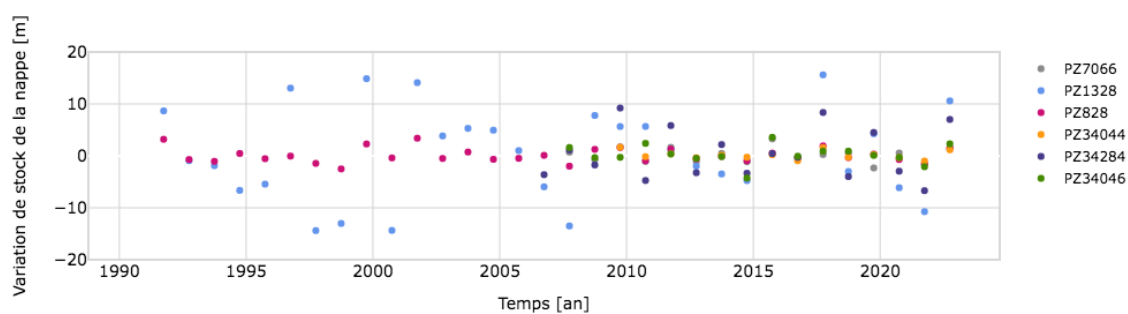


FIGURE E.20 – Variation du stock de la nappe en prenant la différence entre tous les premiers octobre de chaque année pour les stations piézométriques au sein du bassin versant d'étude de l'Ourthe à Tabreux.

Annexe F

Tendances non significatives

Cette section reprend tous les graphiques pour lesquels aucune tendance significative n'a pu être relevée. Ceci concerne l'ensemble des variables hydrologiques traitées dans ce mémoire.

Précipitations

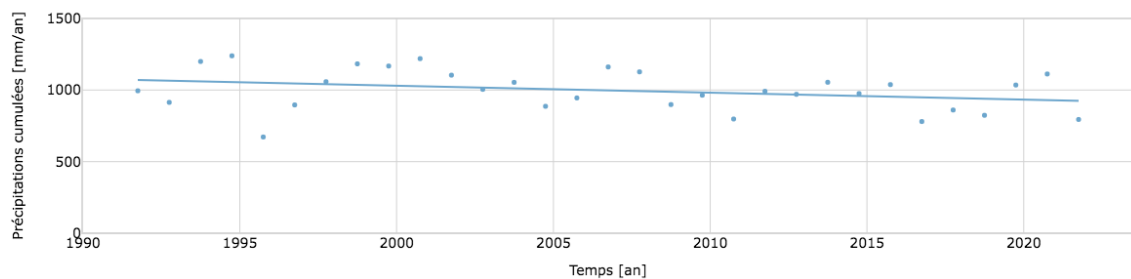


FIGURE F.1 – Précipitations cumulées chaque année sur la période 1991-2022 sur le bassin d'étude de l'Ourhte à Tabreux avec une droite de régression linéaire [mm/an]

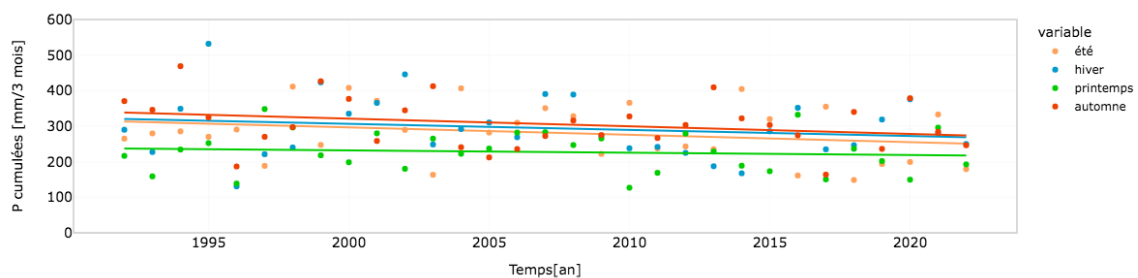


FIGURE F.2 – Précipitations cumulées pour chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive. L'année a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L'année 1992 sur le graphique traduit l'année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.

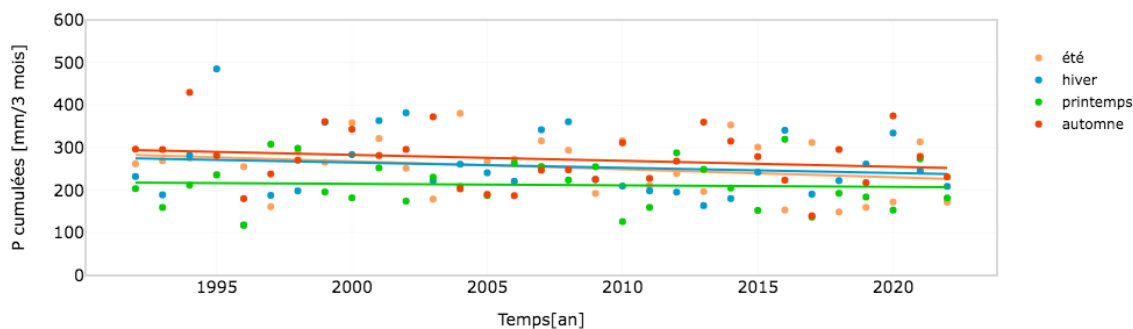


FIGURE F.3 – Précipitations cumulées pour chaque saison de l’année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d’étude de l’Ourthe à Tabreux. L’année a été redéfinie comme commençant le premier octobre et se finissant le 30 septembre. L’année 1992 sur le graphique traduit l’année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.

Evapotranspiration

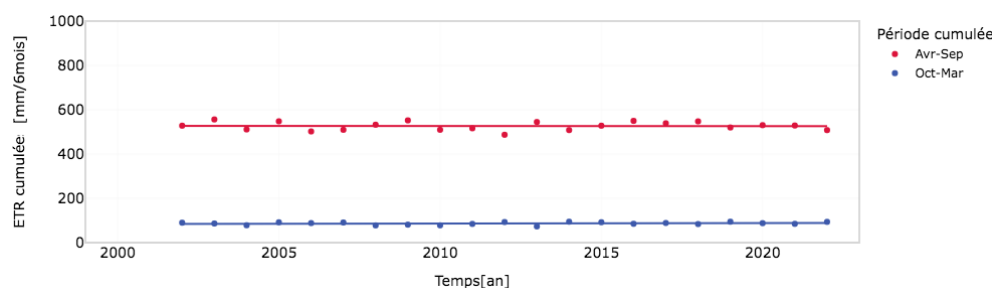


FIGURE F.4 – ETR cumulée pour sur deux semestres (octobre-mars et avril-septembre) avec leur droite de régression linéaire respective pour la période octobre 2001-septembre 2022 sur le bassin d’étude de l’Amblève à Martinrive. L’année 1992 sur le graphique traduit l’année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.

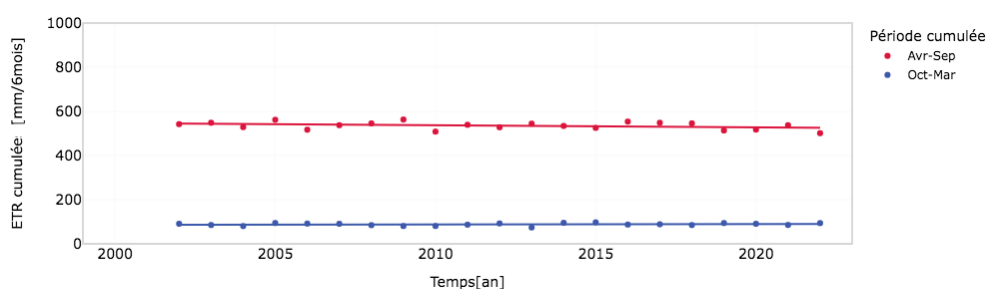


FIGURE F.5 – ETR cumulée pour sur deux semestres (octobre-mars et avril-septembre) avec leur droite de régression linéaire respective pour la période octobre 2001-septembre 2022 sur le bassin d’étude de l’Ourthe à Tabreux. L’année 1992 sur le graphique traduit l’année du premier octobre 1991 au 30 septembre 1992.

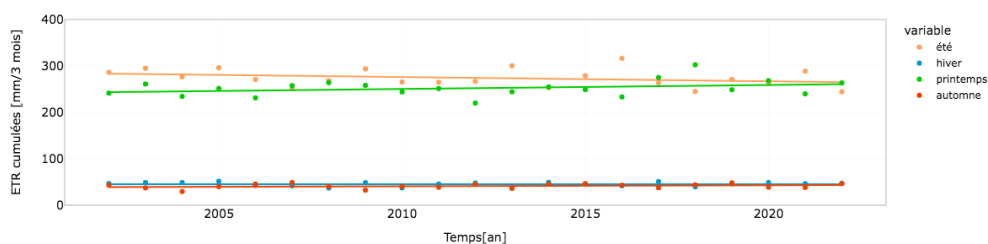


FIGURE F.6 – ETR cumulées pour les quatre saisons avec leur droite de régression linéaire respective pour la période octobre 2001-septembre 2022 sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.

Disponibilité en eau (P-ETR)

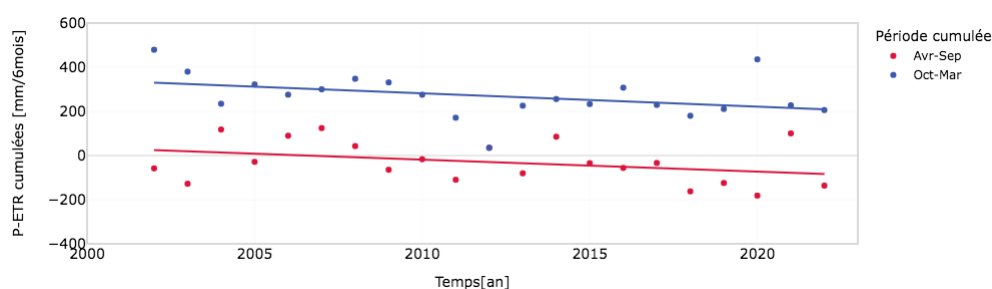


FIGURE F.7 – P-ETR cumulée sur la période du premier octobre au 31 mars et du premier avril au 30 septembre sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive (2001-2022)

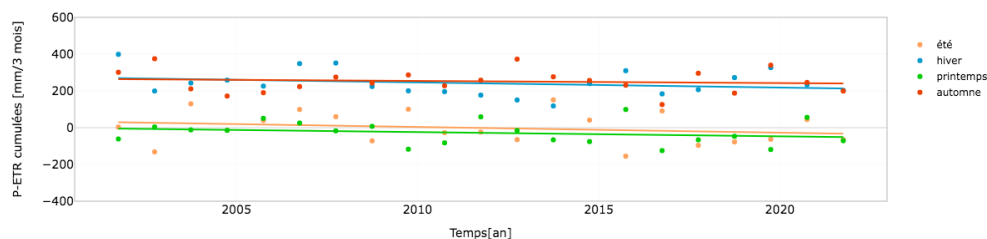


FIGURE F.8 – P-ETR cumulées pour chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive. L'année 2002 sur le graphique traduit l'année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002.

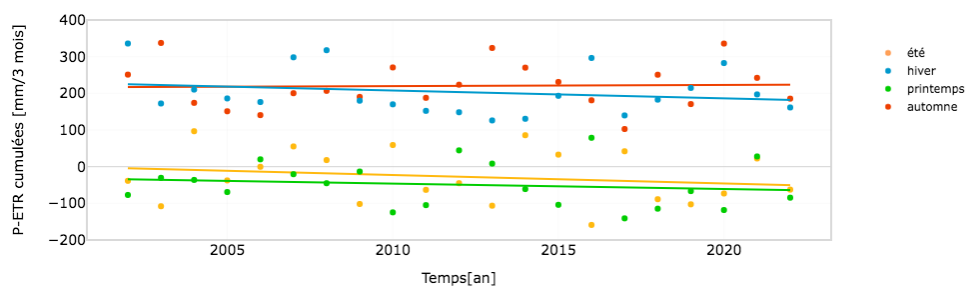


FIGURE F.9 – P-ETR cumulées pour chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux. L'année 2002 sur le graphique traduit l'année du premier octobre 2001 au 30 septembre 2002.

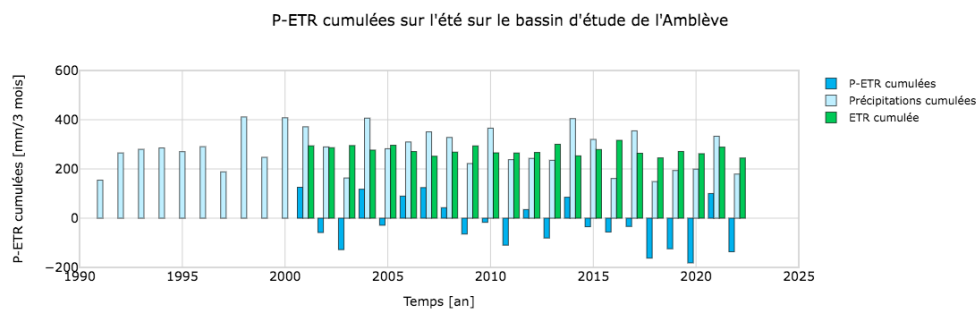


FIGURE F.10 – P-ETR cumulée pour la saison de l'été avec la distinction entre les précipitations et l'ETR cumulées sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.

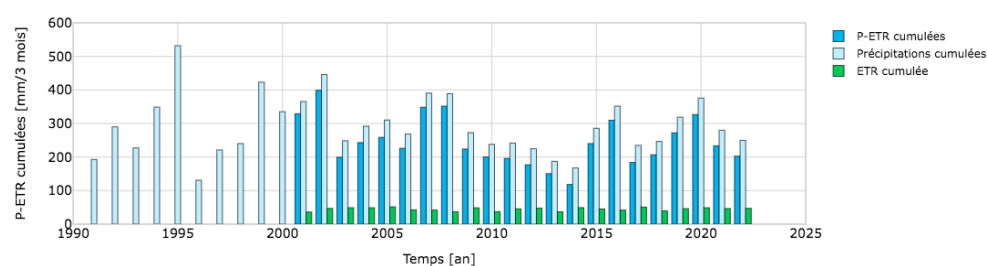


FIGURE F.11 – P-ETR cumulée pour la saison de l'hiver avec la distinction entre les précipitations et l'ETR cumulées sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.

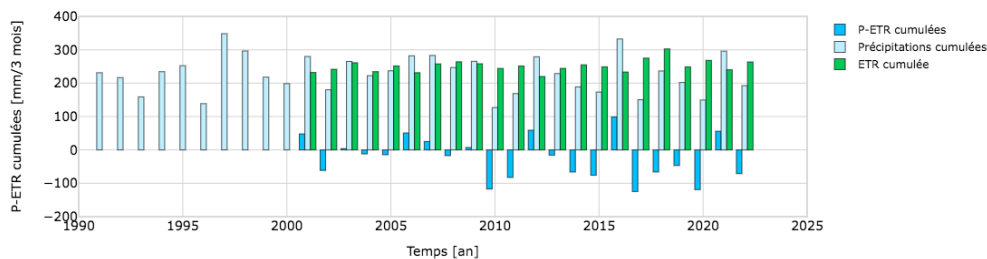


FIGURE F.12 – P-ETR cumulée pour la saison de le printemps avec la distinction entre les précipitations et l'ETR cumulées sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.

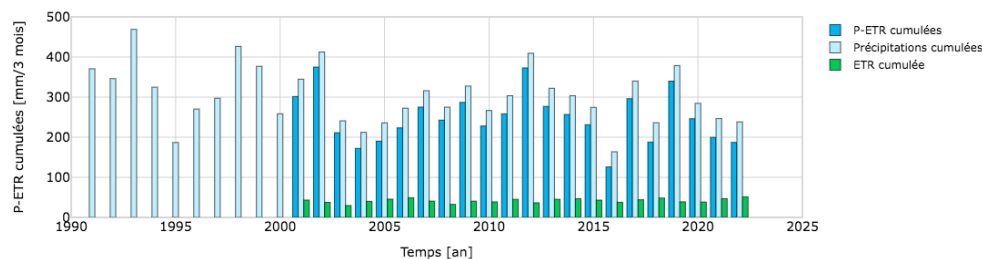


FIGURE F.13 – P-ETR cumulée pour la saison de l'automne avec la distinction entre les précipitations et l'ETR cumulées sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.

Débits

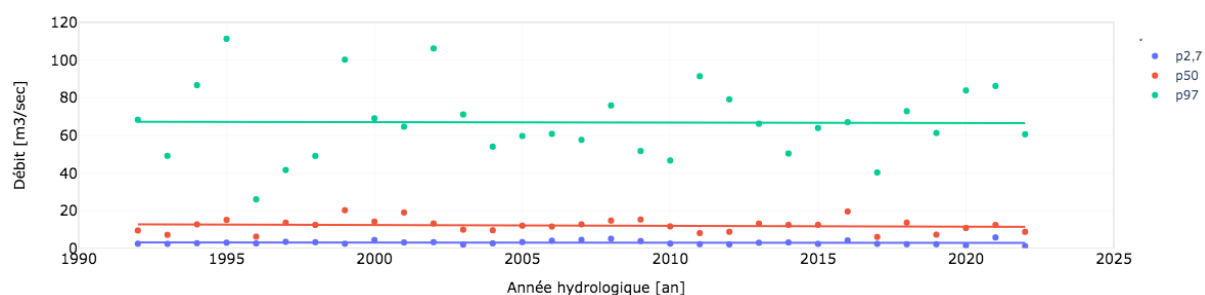


FIGURE F.14 – Percentiles 2,7 / 50 et 97 annuels du débit à l'exutoire du bassin versant d'étude de l'Amblève sur une période de 30 ans

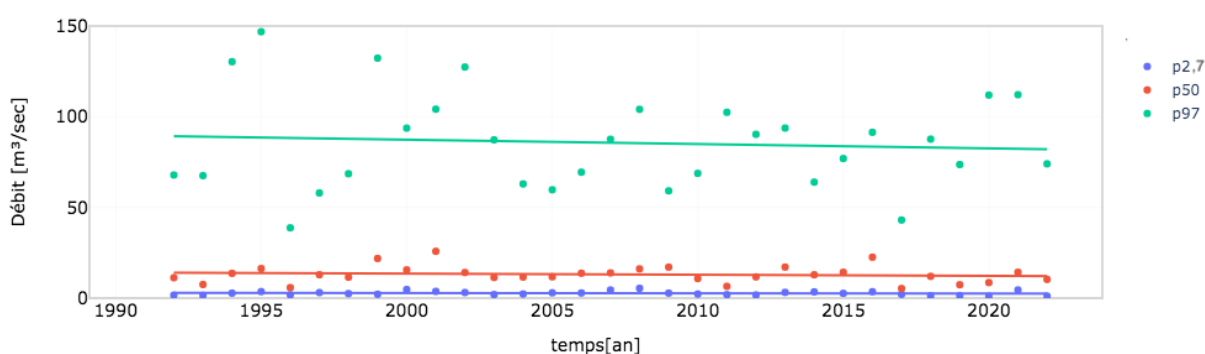


FIGURE F.15 – Percentiles 2,7 / 50 et 97 annuels du débit à l'exutoire du bassin versant d'étude de l'Ourthe sur une période de 30 ans

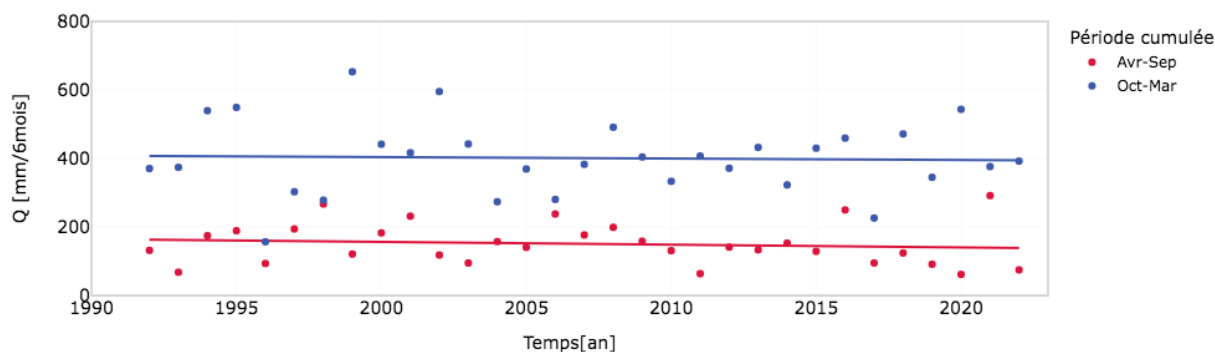


FIGURE F.16 – Débit intégré sur la période du premier octobre au 31 mars et du premier avril au 30 septembre sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive

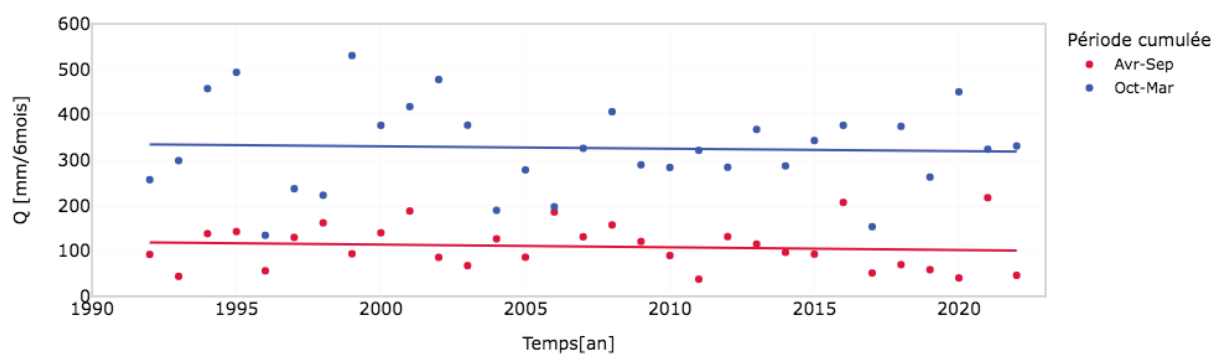


FIGURE F.17 – Débit intégré sur la période du premier octobre au 31 mars et du premier avril au 30 septembre sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux.

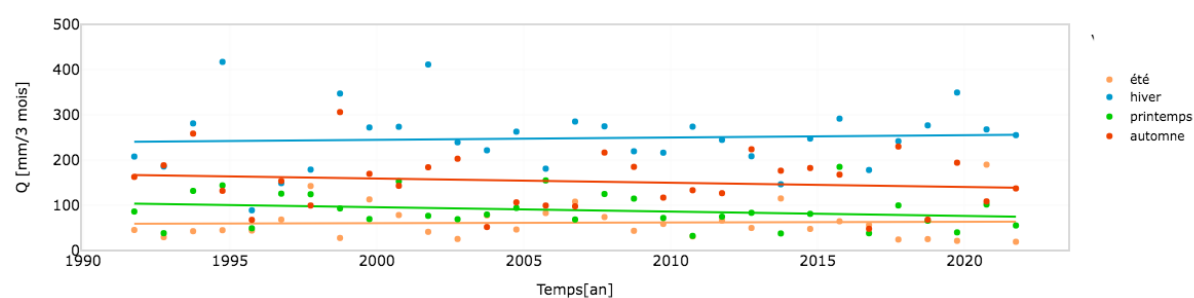


FIGURE F.18 – Débit intégré sur chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Amblève à Martinrive.

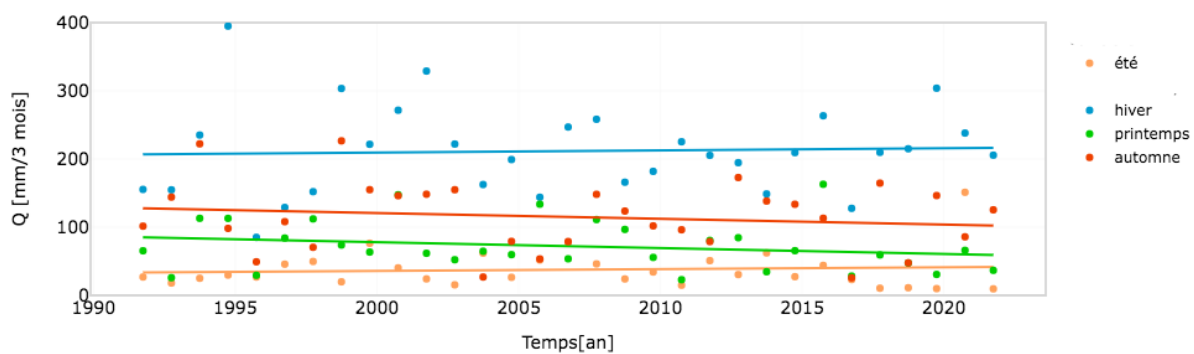


FIGURE F.19 – Débit intégré sur chaque saison de l'année avec leur droite de régression linéaire respective sur le bassin d'étude de l'Ourthe à Tabreux.

Évaluation de la sensibilité des ressources en eau du bassin versant de l'Amblève et de l'Ourthe aux changements climatiques.

Pauline Vermeiren

La Région wallonne est la source d'eau principale pour la Belgique. Elle lui fournit la plupart des besoins en eau potable, c'est-à-dire, l'entièreté des besoins de la Wallonie, un cinquième des besoins de la Flandre et la majorité de ceux de la Région de Bruxelles-Capitale.

Ce mémoire consiste en une évaluation des éventuels changements survenus au cours des 30 dernières années dans les variables hydrologiques des bassins versants de l'Amblève à Martinrive et de l'Ourthe à Tabreux.

La méthodologie mise en place a permis d'établir un bilan hydrologique annuel pour chaque bassin, tenant compte des incertitudes. Ce dernier a mis en évidence que les outils de mesure utilisés semblent avoir des difficultés pour la relevé des données lors des années sèches. Ensuite, une analyse des tendances inter et intra-annuelles a été réalisée pour en dégager d'éventuelles modifications des variables hydrologiques telles que les précipitations, l'évapotranspiration de référence, potentielle et réelle, les débits en amont de l'exutoire des bassins étudiés et le niveau des nappes dans ces bassins.

Les résultats indiquent que les ressources en eau des deux bassins sont sensibles aux changements climatiques. En effet, avec une augmentation de la température, de l'évapotranspiration de référence et une diminution des précipitations dans les deux bassins, l'eau disponible pour les cours d'eau et la recharge des nappes diminue. Le niveau des nappes est en baisse pour les deux bassins. Par contre les tendances sur les débits ne sont pas claires pouvant notamment être liées aux variabilités créent par les pressions anthropiques influençant leur régime. En parallèle, l'évapotranspiration réelle annuelle reste stable laissant penser que les écosystèmes se sont adaptés ou que les rendements des cultures aient diminués.

Les tendances au niveau des évènements extrêmes sont aussi relevées sur les 30 dernières années. Les fortes précipitations hivernales ont diminué dans le bassin de l'Amblève. Les sécheresses estivales augmentent dans les deux bassins et les débits annuels extrêmement faibles diminuent uniquement dans le bassin de l'Amblève.

Si de tels changements sont déjà observés sur une période de 30 ans au niveau de bassins versants connus pour leur régime de précipitations régulières et abondantes toute l'année et compte tenu de la nature exponentielle du changement climatique, il est impératif de multiplier les recherches tant dans le passé que dans les projections pour le futur, à l'échelle de toute la Région wallonne.

La Wallonie étant indispensable pour l'approvisionnement en l'eau, amplifier le nombre de recherches permettrait de mieux comprendre la réaction des bassins face au changement dans le but d'anticiper et de développer des plans stratégiques d'atténuation et/ou d'adaptation à ces modification climatiques.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs

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