

Faculté des bioingénieurs

**Analyse de l'évolution sur 40 ans
(1984-2024) des variables hydrologiques
de sept bassins versants belges**

Auteur : Waroquiers Arthur

Promoteur(s) : Javaux Mathieu

Lecteur(s) : Alonso Alice, Vanclooster Marnik

Année académique : 2024-2025

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : chimie et bio-industries

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, Mathieu Javaux, pour sa guidance et son soutien constant.

Je remercie également Alice Alonso et Marnik Vanclooster d'avoir accepté la tâche exigeante d'être mes lecteurs.

Je tiens à remercier particulièrement mon père, Philippe Waroquiers pour sa relecture attentive et son soutien ainsi que ma mère, Véronique Patigny, pour son soutien indéfectible.

Je remercie aussi mon frère, David Waroquiers, pour son aide précieuse, notamment en matière de code, d'imputation de données et de réflexion scientifique.

Merci également à Pauline Vermeiren pour ses explications concernant la méthodologie adoptée dans son mémoire.

Merci également à Veerle Vanwesenbeeck, pour son aide concernant l'utilisation des données de la DOV, à Alex Dewalque, pour les informations fournies sur les bases de données de l'IRM et l'utilisation de la climate grid 5x5, ainsi qu'à Olivier Tromme, pour ses explications sur le site piézométrie Wallonie.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont pu contribuer à l'élaboration de ce travail.

Table des matières

CHAPITRE 1 :	INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 :	ÉTAT DE L'ART	3
2.1	ANALYSES HYDROLOGIQUES DANS LE MONDE MÉTHODES ET RÉSULTATS.....	3
2.1.1	Évapotranspiration et débits d'étiage.....	3
2.1.2	Déficits hydriques	5
2.1.3	Niveau des nappes	6
2.1.4	Effet de l'agriculture sur le bilan	6
2.2	ANALYSES HYDROLOGIQUES EN BELGIQUE MÉTHODES ET RÉSULTATS.....	7
2.2.1	Affectations des sols.....	7
2.2.2	Débits.....	8
2.2.3	Précipitations.....	8
2.3	ÉVALUATION DES PRODUITS D'ÉVAPOTRANSPIRATION	9
2.4	IMPUTATION DE DONNÉES PIEZOMETRIQUES PAR MACHINE LEARNING	11
CHAPITRE 3 :	OBJECTIFS	14
CHAPITRE 4 :	METHODOLOGIE.....	15
4.1	BILAN HYDROLOGIQUE	15
4.2	CONSTRUCTION ET TRAITEMENT DE LA BASE DE DONNÉES	17
4.2.1	Débits.....	17
4.2.2	Redéfinition des bassins versants sur base des stations limnimétriques.....	18
4.2.3	Description des bassins versants d'étude.....	20
4.2.4	Précipitations.....	26
4.2.5	Évapotranspiration.....	28
4.2.6	Stock	30
4.2.6.1	Variation du stock	30
4.2.6.2	Imputation des données piézométriques	33
4.3	TESTS DE TENDANCES.....	36
CHAPITRE 5 :	RESULTATS ET DISCUSSIONS	38
5.1	PERFORMANCE DE L'IMPUTATION	38
5.2	CHOIX DU PRODUIT D'ÉVAPOTRANSPIRATION	39
5.3	COMPARAISONS INTERBASSINS VARIABLE PAR VARIABLE	42
5.3.1	Évapotranspiration réelle (ETR)	44
5.3.1.1	Moyenne.....	44
5.3.1.2	Variance	45
5.3.2	Évapotranspiration potentielle (ETP)	46
5.3.2.1	Moyenne.....	46

5.3.2.2	Variance	47
5.3.3	<i>ETO</i>	47
5.3.3.1	Moyenne.....	47
5.3.3.2	Variance	48
5.3.4	<i>Stress hydrique</i>	48
5.3.4.1	Moyenne.....	48
5.3.5	<i>Précipitations (P)</i>	50
5.3.5.1	Moyenne.....	50
5.3.5.2	Variance	52
5.3.6	<i>Débit (Q)</i>	53
5.3.6.1	Moyenne.....	53
5.3.6.2	Variance	54
5.3.7	<i>P-ETR</i>	55
5.3.7.1	Moyenne.....	55
5.3.7.2	Variance	56
5.3.8	<i>P-ETR-Q</i>	57
5.3.8.1	Moyenne.....	57
5.3.8.2	Quantiles 10, 95.....	58
5.3.9	<i>Tendances annuelles du niveau moyen des piézomètres</i>	59
5.4	BILAN HYDROLOGIQUE PAR BASSIN	61
5.4.1	<i>District de la Meuse</i>	61
5.4.1.1	Bassin de la Lesse.....	62
5.4.1.2	Bassin de la Vesdre	63
5.4.1.3	Bassin de la Semois.....	65
5.4.1.4	Bassin du Viroin	66
5.4.2	<i>District de l'Escaut</i>	68
5.4.2.1	Bassin de la Demer	69
5.4.2.2	Bassin de la Dendre	71
5.4.2.3	Bassin de la Dyle	73
5.4.3	<i>Performance du modèle</i>	74
5.4.4	<i>Considérations des flux souterrains sortant</i>	76
5.5	CONCLUSION GÉNÉRALE	77
5.6	PERSPECTIVES.....	79
CHAPITRE 6 :	BIBLIOGRAPHIE	81
CHAPITRE 7 :	ANNEXES.....	87
ANNEXE A : EVALUATION DE LA PERFORMANCE DE DIFFÉRENTS PRODUITS D'ETR		87
ANNEXE B : CARTE DES TYPES DE SOLS DE WALLONIE, MISE EN ÉVIDENCE DE LA ZONE DU BV DU VIROIN ET CARTE DES TYPE DE SOLS DEMER, DENDRE ET RÉSUMÉ DES SOLS RENCONTRÉS POUR CHACUN DES BV.....		88
ANNEXE C : MÉTHODOLOGIE DE CALCUL DU STRESS HYDRIQUE		91

ANNEXE D : TABLEAUX RÉCAPITULATIFS DES PIÉZOMÈTRES ET LITHOLOGIE, UNITÉS HYDROLOGIQUES ET POROSITÉS ASSOCIÉES	91
ANNEXE E : CORRÉLATIONS ENTRE PIÉZOMÈTRES (VIROIN ET LESSE)	96
ANNEXE F : JEU DE DONNEES DE CONTROLE POUR L'IMPUTATION	98
ANNEXE G : JEU DE DONNEES DE CONTROLE (GAP_ALL_BUT1) IMPUTES.....	99
ANNEXE H : SERIES CHRONOLOGIQUES DES PIEZOMETRES DE CHAQUE BASSIN AVEC VALEURS IMPUTEES EN GRIS.....	102
ANNEXE I : CHRONIQUES ANNUELLES D'EVAPOTRANSPIRATION POUR CHACUN DES BASSINS NON REPRIS DANS LES RESULTATS ..	107
ANNEXE J : FIGURES DE TENDANCES NON REPRISES DANS LES RESULTATS.....	110
ANNEXE K : TABLEAUX DE VALEURS DE REFERENCES POUR L'ANALYSE DES BILANS	129
ANNEXE L : GRAPHE DES COMPOSANTES ANNUELLES DU BILAN HYDROLOGIQUE	138
ANNEXE M : LIEN ZENODO AVEC LES BILANS ET REGRESSION EFFECTUEES.....	141

Table des figures

FIGURE 2-1 : CLASSES OBTENUES PAR METHODE DE WARD (A GAUCHE) ET TENDANCES DES DEBITS D'ETIAGE EN ALLEMAGNE SUR LA PERIODE 1970-2019 (A DROITE). LES POINTS AVEC UN BORD NOIR ONT UNE P VALEUR < 0.005. SOURCE : ADAPTE DE BRUNO ET AL, 2024.	4
FIGURE 2-2 – COMPARAISON DES MOYENNES LONG TERME DE GLEAM4 ET ERA5-LAND, ADAPTE DE MIRALLES ET AL. (2025)	10
FIGURE 2-3 : ETR ESTIMEE PAR GLEAM4, GLEAMv3.8, ERA5-LAND ET FLUXCOM. EN BAS ET EN HAUT FORET MEDITERRANEENNE ET FORET D'EPICEA RESPECTIVEMENT. AU MILIEU, TERRES AGRICOLE ALTERNANCE MAÏS-SOJA SOURCE : ADAPTE DE MIRALLES ET AL., 2025	11
FIGURE 4-1 : CARTES DES BASSINS VERSANTS OBTENUS, LA LOCALISATION DE LEUR STATION AINSI QUE LA DELIMITATION ENTRE LES DISTRICTS DE LA MEUSE ET DE L'ESCAUT	20
FIGURE 4-2 : CARTE TOPOGRAPHIQUE DE LA BELGIQUE. LES BASSINS VERSANTS D'ETUDE SONT MIS EN EVIDENCE.	21
FIGURE 4-3 : CARTE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES MOYENNES (1991-2020) - IRM	22
FIGURE 4-4 : DIAGRAMMES CAMEMBERTS DE L'OCCUPATION DU SOL DES DIFFERENTS BV D'ETUDE, LES VALEURS DE LA DENDRE SONT UNE MOYENNE PONDÉRÉE EN PROPORTION DE LA SURFACE SUR BASE DES INFORMATIONS DISPONIBLES POUR LA FLANDRE ET LA WALLONIE	24
FIGURE 4-5 : CARTE DES MASSES D'EAUX SOUTERRAINES POUR LA FLANDRE ET LA WALLONIE. POUR LE SOUS-SOL DE FLANDRE, SEULEMENT LES 3 PREMIERES COUCHES (SUR 6) SONT REPRESENTEES. LA LEGENDE HACHUREE DES SECONDES MASSES D'EAU DE WALLONIE, BIEN QUE DE COULEURS DIFFERENTES LORSQU'UNE MASSE D'EAU EST PRESENTE DANS LES DEUX HORIZONS, RESTE CORRECTE. LES ELEMENTS GRAPHIQUES SITUES VISUELLEMENT AU-DESSUS CORRESPONDENT AUX AQUIFERES LES PLUS PROFONDS.....	25
FIGURE 4-6 : POLYGONES DE THIESSEN DES CENTROÏDES DE LA CLIMATE GRID DE L'IRM. CARTE REALISEE EN AOUT 2025 SUR PYTHON A L'AIDE DES MODULES GEOPANDAS ET GEOVORONOI. SYSTEME DE COORDONNEES : BELGE LAMBERT 72 (EPSG :31370), UNITES : M	27
FIGURE 4-7 : LOCALISATION DES PIEZOMETRES DE CHAQUE BASSIN ET POLYGONES DE VORONOI ASSOCIES. CARTE REALISEE EN AOUT 2025 SUR PYTHON A L'AIDE DES MODULES GEOPANDAS ET GEOVORONOI. SYSTEME DE COORDONNEES : BELGE LAMBERT 72 (EPSG :31370), UNITES : M.....	32
FIGURE 5-1 : COMPARAISON DES COEFFICIENTS CULTURAUX POUR LES DIFFERENTS PRODUITS D'ET SUR LES BASSINS DE LA LESSE ET DE LA DENDRE (ETE : JUIN, JUILLET	40
FIGURE 5-2 : COMPARAISON DES CHRONIQUES ANNUELLES D'EVAPOTRANSPIRATION POUR LE BASSIN DE LA DENDRE ISSUES DE QUATRE PRODUITS : ETO DE REFERENCE, GLEAM v4.2A, MODIS16A ET ERA5-LAND. LES DONNEES SONT EXPRIMEES EN LAME D'EAU ANNUELLE (MM/AN) SUR LA PERIODE 2002-2024	41
FIGURE 5-3 : COMPARAISON DES CHRONIQUES ANNUELLES D'EVAPOTRANSPIRATION POUR LE BASSIN DE LA LESSE ISSUES DE QUATRE PRODUITS : ETO DE REFERENCE, GLEAM v4.2A, MODIS16A ET ERA5-LAND. LES DONNEES SONT EXPRIMEES EN LAME D'EAU ANNUELLE (MM/AN) SUR LA PERIODE 2002-2024	41
FIGURE 5-4 : ÉVAPOTRANSPIRATION REELLE ANNUELLE EN 2020 (ANNEE LA PLUS EVAPOTRANSPIRANTE SUR LES 40ANNEES TOUT BASSINS CONFONDUS) ESTIMEE PAR GLEAMv4.2A. L'EXTRACTION DES DONNEES ET LES CALCULS D'AIRE D'INFLUENCE ONT ETE REALISES SUR PYTHON A L'AIDE DU MODULE PYPROJ.GEOD.....	42

FIGURE 5-5 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR_GLEAM_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	44
FIGURE 5-6 — RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP_GLEAM_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	46
FIGURE 5-7 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DU STRESS HYDRIQUE (S_GLEAM_MODEL ET STRESSHYDRIQUE_ERA) POUR CHAQUE BASSIN, L'AGREGATION MENSUELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	48
FIGURE 5-8 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DES PRECIPITATIONS (P_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.	50
FIGURE 5-9 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA VARIANCE DES PRECIPITATIONS (P_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.	52
FIGURE 5-10 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DE P-ETR(P-ETR_GLEAM_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.	55
FIGURE 5-11 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE AUX QUANTILES DES PRECIPITATIONS EFFICACES (P_MM - ETR_GLEAM_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	56
FIGURE 5-12 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE P-ETR-Q (P_MM - ETR_GLEAM_MM – Q_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE...57	57
FIGURE 5-13 : TENDANCES ANNUELLES DU NIVEAU DES PIEZOMETRES (M) DES BASSINS DU DISTRICT DE LA MEUSE POUR LES ANNEES DONT TOUS LES MOIS PRESENTENT UNE COUVERTURE DE DONNEES DE 90% OU PLUS. LES NIVEAUX MOYENS ANNUELS ONT ETE CALCULES EN DETERMINANT D'ABORD LA MOYENNE MENSUELLE DE CHAQUE MOIS, PUIS EN MOYENNANT L'ENSEMBLE DES MOYENNES MENSUELLES. AVEC EN GRIS LES SERIES QUI ONT MOINS DE 3 ANNEES VALIDES. EN DESSOUS DE 15 ANNEES DE DONNEES UNE REGRESSION LINEAIRE EST APPLIQUEE, AU-DELA ON UTILISE LE TEST DE MANN KENDALL ET LA PENTE DE THEIL SEN.....	59
FIGURE 5-14 : TENDANCES ANNUELLES DU NIVEAU DES PIEZOMETRES (M) DES BASSINS DU DISTRICT DE L'ESCAUT POUR LES ANNEES DONT TOUS LES MOIS PRESENTENT UNE COUVERTURE DE DONNEES DE 90% OU PLUS. LES NIVEAUX MOYENS ANNUELS ONT ETE CALCULES EN DETERMINANT D'ABORD LA MOYENNE MENSUELLE DE CHAQUE MOIS, PUIS EN MOYENNANT L'ENSEMBLE DES MOYENNES MENSUELLES. AVEC EN GRIS LES SERIES QUI ONT MOINS DE 3 ANNEES VALIDES. EN DESSOUS DE 15 ANNEES DE DONNEES UNE REGRESSION LINEAIRE EST APPLIQUEE, AU-DELA ON UTILISE LE TEST DE MANN KENDALL ET LA PENTE DE THEIL SEN.....	60

FIGURE 5-15 : COMPARAISON DES COMPOSANTES P - ETR ET DU DEBIT ANNUEL (Q) POUR LE BASSIN DE LA LESSE.	62
FIGURE 5-16 : COMPARAISON ENTRE LE BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL (P - ETR - Q) ET LA VARIATION DE STOCK SOUTERRAIN (ΔS) POUR LE BASSIN DE LA LESSE. LE SOUS-GRAPHE INFÉRIEUR PRÉSENTE LA DENSITÉ D'OBSERVATIONS PIÉZOMÉTRIQUES RÉELLES (FRACTION QUOTIDIENNE LISSÉE, $\Sigma = 10$ JOURS). LES ANNOTATIONS INDIQUENT LE NOMBRE DE PIÉZOMÈTRES VALIDES PAR RAPPORT AU TOTAL.	63
FIGURE 5-17 : COMPARAISON DES COMPOSANTES P - ETR ET DU DEBIT ANNUEL (Q) POUR LE BASSIN DE LA VESDRE	64
FIGURE 5-18 : COMPARAISON ENTRE LE BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL (P - ETR - Q) ET LA VARIATION DE STOCK SOUTERRAIN (ΔS) POUR LE BASSIN DE LA VESDRE. LE SOUS-GRAPHE INFÉRIEUR PRÉSENTE LA DENSITÉ D'OBSERVATIONS PIÉZOMÉTRIQUES RÉELLES (FRACTION QUOTIDIENNE LISSÉE, $\Sigma = 10$ JOURS). LES ANNOTATIONS INDIQUENT LE NOMBRE DE PIÉZOMÈTRES VALIDES PAR RAPPORT AU TOTAL.	64
FIGURE 5-19 : COMPARAISON DES COMPOSANTES P - ETR ET DU DEBIT ANNUEL (Q) POUR LE BASSIN DE LA SEMOIS	65
FIGURE 5-20: COMPARAISON ENTRE LE BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL (P - ETR - Q) ET LA VARIATION DE STOCK SOUTERRAIN (ΔS) POUR LE BASSIN DE LA SEMOIS. LE SOUS-GRAPHE INFÉRIEUR PRÉSENTE LA DENSITÉ D'OBSERVATIONS PIÉZOMÉTRIQUES RÉELLES (FRACTION QUOTIDIENNE LISSÉE, $\Sigma = 10$ JOURS). LES ANNOTATIONS INDIQUENT LE NOMBRE DE PIÉZOMÈTRES VALIDES PAR RAPPORT AU TOTAL.	66
FIGURE 5-21 : COMPARAISON DES COMPOSANTES P - ETR ET DU DEBIT ANNUEL (Q) POUR LE BASSIN DU VIROIN	67
FIGURE 5-22 : COMPARAISON ENTRE LE BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL (P - ETR - Q) ET LA VARIATION DE STOCK SOUTERRAIN (ΔS) POUR LE BASSIN DU VIROIN. LE SOUS-GRAPHE INFÉRIEUR PRÉSENTE LA DENSITÉ D'OBSERVATIONS PIÉZOMÉTRIQUES RÉELLES (FRACTION QUOTIDIENNE LISSÉE, $\Sigma = 10$ JOURS). LES ANNOTATIONS INDIQUENT LE NOMBRE DE PIÉZOMÈTRES VALIDES PAR RAPPORT AU TOTAL.	68
FIGURE 5-23 : COMPARAISON DES COMPOSANTES P - ETR ET DU DEBIT ANNUEL (Q) POUR LE BASSIN DE LA DEMER	70
FIGURE 5-24 : COMPARAISON ENTRE LE BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL (P - ETR - Q) ET LA VARIATION DE STOCK SOUTERRAIN (ΔS) POUR LE BASSIN DE LA DEMER. LE SOUS-GRAPHE INFÉRIEUR PRÉSENTE LA DENSITÉ D'OBSERVATIONS PIÉZOMÉTRIQUES RÉELLES (FRACTION QUOTIDIENNE LISSÉE, $\Sigma = 10$ JOURS). LES ANNOTATIONS INDIQUENT LE NOMBRE DE PIÉZOMÈTRES VALIDES PAR RAPPORT AU TOTAL.	70
FIGURE 5-25: COMPARAISON DES COMPOSANTES P - ETR ET DU DEBIT ANNUEL (Q) POUR LE BASSIN DE LA DENDRE	71
FIGURE 5-26 : COMPARAISON ENTRE LE BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL (P - ETR - Q) ET LA VARIATION DE STOCK SOUTERRAIN (ΔS) POUR LE BASSIN DE LA DENDRE. LE SOUS-GRAPHE INFÉRIEUR PRÉSENTE LA DENSITÉ D'OBSERVATIONS PIÉZOMÉTRIQUES RÉELLES (FRACTION QUOTIDIENNE LISSÉE, $\Sigma = 10$ JOURS). LES ANNOTATIONS INDIQUENT LE NOMBRE DE PIÉZOMÈTRES VALIDES PAR RAPPORT AU TOTAL.	72
FIGURE 5-27 : COMPARAISON DES COMPOSANTES P - ETR ET DU DEBIT ANNUEL (Q) POUR LE BASSIN DE LA DENDRE.....	73
FIGURE 5-28 : COMPARAISON ENTRE LE BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL (P - ETR - Q) ET LA VARIATION DE STOCK SOUTERRAIN (ΔS) POUR LE BASSIN DE LA DENDRE. LE SOUS-GRAPHE INFÉRIEUR PRÉSENTE LA DENSITÉ D'OBSERVATIONS PIÉZOMÉTRIQUES RÉELLES (FRACTION QUOTIDIENNE LISSÉE, $\Sigma = 10$ JOURS). LES ANNOTATIONS INDIQUENT LE NOMBRE DE PIÉZOMÈTRES VALIDES PAR RAPPORT AU TOTAL.	74
FIGURE 7-1 : COMPARAISON DE 5 PRODUITS D'ET SUR DIFFERENTS SOLS ET SAISONS (ZHU ET AL., 2022)	87
FIGURE 7-2 : CARTE DES SOLS DE WALLONIE, ZOOM SUR LE BASSIN DU VIROIN.....	88

FIGURE 7-3 : SOLS RENCONTRES POUR LE BASSIN DE LA DEMER (AU-DESSUS) ET DE LA DENDRE (EN DESSOUS). SOURCE :	
COÖRDINATIECOMMISSIE INTEGRAAL WATERBELEID	89
FIGURE 7-4 : DIAGRAMMES CAMEMBERTS DES TYPES DE SOLS RENCONTRES POUR LES BV. CERTAINS BASSINS (HACHURE) NE	
DISPOSENT PAS DE DONNEES QUANTITATIVES DANS LES SOURCES ALORS DES INFORMATIONS QUALITATIVES SONT DONNEES...	90
FIGURE 7-5 : METHODOLOGIE DE CALCUL DU FACTEUR DE STRESS HYDRIQUE. KC EST LE COEFFICIENT CULTURAL, ETC CORRESPOND A	
L'ETP, ETCADJ CORRESPOND A L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET KS AU FACTEUR DE STRESS HYDRIQUE. SOURCE: FAO	91
FIGURE 7-6 – ANALYSE DE CORRELATION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES (EN M) ENTRE LES PIEZOMETRES DU BASSIN DU VIROIN.	
CHAQUE SOUS-GRAPHIQUE PRESENTE LA RELATION ENTRE UNE PAIRE DE PIEZOMETRES AVEC UN PIEZOMETRE REPRESENTE EN	
ABSCISSE ET L'AUTRE EN ORDONNEE. LA DISTANCE ENTRE LES PIEZOMETRES EST INDIQUEE DANS LE TITRE. CETTE ANALYSE	
PERMET D'ÉVALUER LA CAPACITE D'ESTIMATION DES NIVEAUX D'UN PIEZOMETRE PAR UN AUTRE PIEZOMETRE	96
FIGURE 7-7 – ANALYSE DE CORRELATION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES (EN M) ENTRE LES PIEZOMETRES DU BASSIN DE LA LESSE.	
CHAQUE SOUS-GRAPHIQUE PRESENTE LA RELATION ENTRE UNE PAIRE DE PIEZOMETRES AVEC UN PIEZOMETRE REPRESENTE EN	
ABSCISSE ET L'AUTRE EN ORDONNEE. LA DISTANCE ENTRE LES PIEZOMETRES EST INDIQUEE DANS LE TITRE. CETTE ANALYSE	
PERMET D'ÉVALUER LA CAPACITE D'ESTIMATION DES NIVEAUX D'UN PIEZOMETRE PAR UN AUTRE PIEZOMETRE	97
FIGURE 7-8 : DATASET "FILTERED PERIOD" - CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DE REFERENCE DU BASSIN DE LA LESSE (2006-2024)	
PRESENTATION DES SERIES PIEZOMETRIQUES COMPLETES DU BASSIN DE LA LESSE SUR LA PERIODE D'ETUDE FILTREE. CES	
CHRONIQUES, CARACTERISEES PAR UNE CONTINUITE TEMPORELLE SATISFAISANTE POUR PERMETTRE L'EVALUATION DES	
PERFORMANCES D'IMPUTATION DU MODELE SAITS.	98
FIGURE 7-9 : DATASET "CREAMED FULL" - CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES AVEC ECREMAGE ALEATOIRE (70% DE DONNEES	
SUPPRIMEES) VISUALISATION DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES APRES SUPPRESSION ALEATOIRE DE 70% DES VALEURS SUR	
L'ENSEMBLE DE LA PERIODE 2006-2024.	98
FIGURE 7-10 : DATASET "GAP ALL BUT 1" - CHRONIQUES AVEC SUPPRESSION DE PERIODE COMPLETE (2006-2014)	
REPRESENTATION DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES OU LES DONNEES ANTERIEURES A 2014 ONT ETE SUPPRIMEES POUR	
TOUS LES PIEZOMETRES A L'EXCEPTION D'UN	99
FIGURE 7-11 : IMPUTATION DU DATASET GAP_ALL_BUT_1 UTILISANT UNIQUEMENT LES PIEZOMETRES COMME VARIABLES D'ENTREE.	
LES VALEURS EN VERT CORRESPONDENT AUX OBSERVATIONS REELLES	99
FIGURE 7-12 : IMPUTATION DU DATASET GAP_ALL_BUT_1 UTILISANT LES PIEZOMETRES ET LES PRECIPITATIONS COMME VARIABLES	
D'ENTREE. LES VALEURS EN VERT CORRESPONDENT AUX OBSERVATIONS REELLES	100
FIGURE 7-13 : IMPUTATION DU DATASET GAP_ALL_BUT_1 UTILISANT LES PIEZOMETRES ET LE DEBIT COMME VARIABLES D'ENTREE.	
LES VALEURS EN VERT CORRESPONDENT AUX OBSERVATIONS REELLES	100
FIGURE 7-14: IMPUTATION DU DATASET GAP_ALL_BUT_1 UTILISANT UNIQUEMENT LES PIEZOMETRES, LES PRECIPITATIONS ET LE DEBIT	
COMME VARIABLES D'ENTREE. LES VALEURS EN VERT CORRESPONDENT AUX OBSERVATIONS REELLES	101
FIGURE 7-15 : CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DU BASSIN DU VIROIN. LES DONNEES IMPUTEES SONT EN GRIS.....	102
FIGURE 7-16 : CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DU BASSIN DE LA LESSE. LES DONNEES IMPUTEES SONT EN GRIS	103
FIGURE 7-17 : CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DU BASSIN DE LA VESDRE. LES DONNEES IMPUTEES SONT EN GRIS.....	103
FIGURE 7-18 : CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DU BASSIN DE LA SEMOIS. LES DONNEES IMPUTEES SONT EN GRIS.....	104
FIGURE 7-19 : CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DU BASSIN DE LA DENDRE. LES DONNEES IMPUTEES SONT EN GRIS.....	105
FIGURE 7-20 : CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DU BASSIN DE LA DYLE. LES DONNEES IMPUTEES SONT EN GRIS	106

FIGURE 7-21 : CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES DU BASSIN DE LA DEMER. LES DONNEES IMPUTEES SONT EN GRIS	106
FIGURE 7-22 : COMPARAISON DES CHRONIQUES ANNUELLES POUR LE BASSIN DE LA SEMOIS ISSUES DE QUATRE PRODUITS : ETO DE REFERENCE, GLEAM v4.2A, MODIS16A ET ERA5-LAND. LES DONNEES SONT EXPRIMEES EN LAME D'EAU ANNUELLE (MM/AN) SUR LA PERIODE 2002-2024.....	107
FIGURE 7-23 : COMPARAISON DES CHRONIQUES ANNUELLES POUR LE BASSIN DE LA DEMER ISSUES DE QUATRE PRODUITS : ETO DE REFERENCE, GLEAM v4.2A, MODIS16A ET ERA5-LAND. LES DONNEES SONT EXPRIMEES EN LAME D'EAU ANNUELLE (MM/AN) SUR LA PERIODE 2002-2024.....	107
FIGURE 7-24 : COMPARAISON DES CHRONIQUES ANNUELLES POUR LE BASSIN DE LA DYLE ISSUES DE QUATRE PRODUITS : ETO DE REFERENCE, GLEAM v4.2A, MODIS16A ET ERA5-LAND. LES DONNEES SONT EXPRIMEES EN LAME D'EAU ANNUELLE (MM/AN) SUR LA PERIODE 2002-2024.....	108
FIGURE 7-25 : COMPARAISON DES CHRONIQUES ANNUELLES POUR LE BASSIN DE LA VESDRE ISSUES DE QUATRE PRODUITS : ETO DE REFERENCE, GLEAM v4.2A, MODIS16A ET ERA5-LAND. LES DONNEES SONT EXPRIMEES EN LAME D'EAU ANNUELLE (MM/AN) SUR LA PERIODE 2002-2024.....	108
FIGURE 7-26 : COMPARAISON DES CHRONIQUES ANNUELLES POUR LE BASSIN DU VIROIN ISSUES DE QUATRE PRODUITS : ETO DE REFERENCE, GLEAM v4.2A, MODIS16A ET ERA5-LAND. LES DONNEES SONT EXPRIMEES EN LAME D'EAU ANNUELLE (MM/AN) SUR LA PERIODE 2002-2024.....	109
FIGURE 7-27 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR_ERA_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	110
FIGURE 7-28 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA VARIANCE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR_GLEAM_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR ASSOCIEE.	111
FIGURE 7-29 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE AUX STATISTIQUES QUANTILES 10 ET 95 DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR_GLEAM_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.	112
FIGURE 7-30 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP_ERA_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	113
FIGURE 7-31 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA VARIANCE DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP_GLEAM_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	114
FIGURE 7-32 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA VARIANCE DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP_ERA_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	115
FIGURE 7-33 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE AUX QUANTILES Q10 ET Q95 DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP_GLEAM_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE	

1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	116
FIGURE 7-34 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE (ET0_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	117
FIGURE 7-35 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA VARIANCE DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE (ET0_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	118
FIGURE 7-36 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE AUX QUANTILES DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE (ET0_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	119
FIGURE 7-37 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DU STRESS HYDRIQUE (S_GLEAM_MODEL) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	121
FIGURE 7-38 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DU STRESS HYDRIQUE (STRESSHYDRIQUE_ERA) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE. ..	122
FIGURE 7-39 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE AUX QUANTILES Q10 ET Q95 DES PRECIPITATIONS (P_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.	123
FIGURE 7-40 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA VARIANCE DU DEBIT (Q_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.	124
FIGURE 7-41 : : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE AUX QUANTILES DU DEBIT (Q_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.	125
FIGURE 7-42 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA MOYENNE JOURNALIERE DES PRECIPITATIONS EFFICACES (PMM - ETR_GLEAM_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.	126
FIGURE 7-43 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE A LA VARIANCE DE P-ETR-Q (P_MM - ETR_GLEAM_MM – Q_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	127
FIGURE 7-44 : RESULTATS DU TEST DE MANN-KENDALL APPLIQUE AU QUANTILE Q95 DE P-ETR-Q (P-MM - ETR_GLEAM_MM – Q_MM) POUR CHAQUE BASSIN, CHAQUE AGREGATION TEMPORELLE SUR 40 ANNEES (1 ^{er} OCTOBRE 1984 – 1 ^{er} OCTOBRE 2024). LA VALEUR INDIQUEE EST LA PENTE DE LA REGRESSION (MM) AVEC SA P-VALEUR DU TEST ASSOCIEE.....	128
FIGURE 7-45 : VALEURS DE REFERENCES DE L'ETR ESTIMEES PAR GLEAM POUR LES 7 BASSINS	129
FIGURE 7-46 : VALEURS DE REFERENCES DE L'ETP ESTIMEES PAR GLEAM POUR LES 7 BASSINS	130
FIGURE 7-47 : VALEURS DE REFERENCES DU STRESS HYDRIQUE ESTIMEES PAR GLEAM.	131

FIGURE 7-48 : VALEURS DE REFERENCE DE L'ETR ESTIMEES PAR ERA5-LAND	132
FIGURE 7-49 : VALEURS DE REFERENCE DE L'ETP ESTIMEES PAR ERA5-LAND	133
FIGURE 7-50 : VALEURS DE REFERENCE DU STRESS HYDRIQUE CALCULEES AVEC L'ETR ET L'ETP D'ERA5-LAND.....	134
FIGURE 7-51 : VALEURS DE REFERENCE DES PRECIPITATIONS	135
FIGURE 7-52 : VALEURS DE REFERENCE DES DEBITS	136
FIGURE 7-53 : VALEURS DE REFERENCE DE L'ETO.....	137
FIGURE 7-54 : COMPOSANTES HYDROLOGIQUES ANNUELLES (PRECIPITATION, DEBIT, EVAPOTRANSPIRATION REELLE) POUR LE BASSIN DE LA VESDRE	138
FIGURE 7-55 : COMPOSANTES HYDROLOGIQUES ANNUELLES (PRÉCIPITATION, DÉBIT, ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE) POUR LE BV DE LA LESSE	138
FIGURE 7-56 : COMPOSANTES HYDROLOGIQUES ANNUELLES (PRECIPITATION, DEBIT, EVAPOTRANSPIRATION REELLE) POUR LE BASSIN DE LA SEMOIS	139
FIGURE 7-57 : COMPOSANTES HYDROLOGIQUES ANNUELLES (PRECIPITATION, DEBIT, EVAPOTRANSPIRATION REELLE) POUR LE BASSIN DU VIROIN.....	139
FIGURE 7-58 COMPOSANTES HYDROLOGIQUES ANNUELLES (PRECIPITATION, DEBIT, EVAPOTRANSPIRATION REELLE) POUR LE BASSIN DE LA DENDRE.....	140
FIGURE 7-59 : COMPOSANTES HYDROLOGIQUES ANNUELLES (PRECIPITATION, DEBIT, EVAPOTRANSPIRATION REELLE) POUR LE BASSIN DE LA DYLE	140
FIGURE 7-60 : COMPOSANTES HYDROLOGIQUES ANNUELLES (PRECIPITATION, DEBIT, EVAPOTRANSPIRATION REELLE) POUR LE BASSIN DE LA DEMER.....	141

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DES STATIONS LIMNIMETRIQUES.....	17
TABLEAU 2 : CARACTÉRISTIQUES DES SÉRIES DE DÉBITS.....	18
TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUES DES BV D'ETUDE.....	21
TABLEAU 4 : CARACTERISTIQUES DES DONNEES FOURNIES PAR L'IRM	26
TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES DES PRODUITS D'EVAPOTRANSPIRATION.....	28
TABLEAU 6 : SOURCES DES DONNEES UTILISEES DANS LE MODELE GLEAM4. SOURCE : MIRALES ET AL. 2025.....	29
TABLEAU 7 : COMPARAISON DES METHODES D'IMPUTATION POUR LE JEU DE DONNEES "CREAMED FULL"	38
TABLEAU 8 : COMPARAISON DE L'ERREUR D'IMPUTATION EN FONCTION DES DONNEES, POUR LE JEU DE DONNEES "GAP_ALL_BUT_1"	38
TABLEAU 9 : PERFORMANCE DES BILANS.....	75
TABLEAU 10 : RECAPITULATIF DES PIEZOMETRES DU BASSIN DE LA LESSE.	91
TABLEAU 11 : RECAPITULATIF DES PIEZOMETRES DU BASSIN DE LA SEMOIS.....	92
TABLEAU 12 : RECAPITULATIF DES PIEZOMETRES DU BASSIN DE LA DYLE	93
TABLEAU 13 : RECAPITULATIF DES PIEZOMETRES DU BASSIN DE LA VESDRE.....	93
TABLEAU 14 : RECAPITULATIF DES PIEZOMETRES DU BASSIN DU VIROIN.....	93
TABLEAU 15 : RECAPITULATIF DES PIEZOMETRES DU BASSIN DE LA DENDRE.....	94
TABLEAU 16 : RECAPITULATIF DES PIEZOMETRES DU BASSIN DE LA DEMER	94

Liste des acronymes

AH : Année Hydrologique

AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer

BESS : Breathing Earth System Simulator

BV : Bassin Versant

CHTESSEL : Carbon Hydrology-Tyled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land

CR : Contrat de Rivière

DGH : Direction de la Gestion Hydrologique

DOV : Data Ondergrond Vlaanderen

ECMWF : European Center for Medium-Range Weather Forecast

ERA5-Land : ECMWF Reanalysis v5

ESA : European Space Agency

ET : Évapotranspiration

ET0 : Évapotranspiration de référence

ETP : Évapotranspiration Potentielle

ETR : Évapotranspiration Réelle

FAO : Food and Agriculture Organization

GBR : Gradient Boosting Regression

GLASS-MODIS : Global Land Surface Satellite + MODIS

PML_V2 : Penman-Monteith-Leuning version 2

GLEAM : Global Land Evaporation Amsterdam Model

GRASS : Geographic Ressources Analysis Support System

HIC : Hydrologisch Informatie Centrum

IRM : Institut Royal Météorologique

MAE : Mean Absolute Error

MAX AE : Maximum Absolute Error

MK : Mann Kendall test

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MOD16 : MODIS Global Evapotranspiration Product

NASA : National Aeronautics and Space Administration

OLS : Ordinary Least Square

P – ETR : Précipitations efficaces

P : Précipitations

Q : Débit

QGIS : Quantum Geographic Information System

RMSE : Root Mean Square of Error

SAITS : Self-Attention based Imputation for Time Series

SPW : Service Public de Wallonie

SSEBop : Operational Simplified Surface Energy Balance

SWDE : Société Wallonne Des Eaux

VMM : Vlaamse Milieu Maatschappij

Chapitre 1 : Introduction

Le changement climatique est devenu au cours des dernières décennies un enjeu majeur dans le monde. La communauté scientifique souligne que l'augmentation des températures entraîne une intensification du cycle de l'eau (GIEC, 2023; IRM, 2020b) caractérisée par des précipitations et des sécheresses plus intenses dans de nombreuses régions.

En fonction du scénario, les projections climatiques en Belgique tablent sur une augmentation de la température comprise entre 0,7 et 5 °C d'ici à la fin du siècle, avec une augmentation plus marquée en hiver qu'en été (IRM, 2020b). Dans ce contexte, il est prévu une augmentation de la saisonnalité des pluies, avec des hivers nettement plus pluvieux et des étés qui le seront légèrement moins. La Belgique est un pays très densément peuplé, la région flamande affiche une densité de 504hab./km², et la région wallonne une densité de 219hab./km² (Service Public Fédéral Belge, 2025). Ceci rend la Belgique vulnérable aux déficits et excédents d'eau comme lors des inondations de 2021 (Journée et al., 2023) ou lors des sécheresses généralisées en Europe de 2018-2019 (Blauhut et al., 2022). L'Europe classe l'entièreté des régions en Belgique à un risque moyen-élevé de déficit hydrique sur base du classement de la World Resource Institute classant la Belgique parmi les 25 pays faisant face à un risque extrême de stress hydrique (Belgium - European Commission, 2023; Kuzma et al., 2023). Ce risque extrême est principalement localisé en région flamande.

Les nappes souterraines jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau potable en Belgique. En 2020 en Wallonie, les prélèvements d'eau souterraine atteignaient 368 millions de m³, chiffre qui est resté relativement constant depuis les années 2000 (SPW, 2024). Seulement 63% de ces prélèvements sont destinés à la Wallonie, le reste allant en Flandre (19%), à Bruxelles (17%) et à l'étranger (Institut wallon Evaluation, Prospective et Statistique, 2025). Il apparaît assez clairement que les ressources en eau sont un enjeu considérable pour l'entièreté de la Belgique. L'étude de leur évolution vis-à-vis des variables hydrologiques est donc primordiale afin de pouvoir mieux anticiper les déficits.

L'objectif de ce mémoire est donc d'analyser l'évolution de la relation entre variables hydrologiques et stock d'eau sur une période étendue allant de 1984 à 2024 et d'en tirer des conclusions sur l'avenir du stock d'eau en Belgique. Cette étude s'inscrit dans la continuité du mémoire réalisé par Pauline Vermeiren sur les bassins de l'Amblève et de l'Ourthe, intitulé

"Évaluation de la sensibilité des ressources en eau du bassin versant de l'Amblève et de l'Ourthe aux changements climatiques"(Vermeiren, 2023). Dans son état de l'art, ce mémoire avait présenté les changements climatiques globaux et en Belgique. Dans un souci de concision et afin d'éviter les répétitions, le lecteur est invité à consulter ce travail ainsi que la littérature pertinente pour obtenir des informations complémentaires sur cette thématique largement documentée.

Une brève introduction sur des analyses hydrologiques effectuées dans le monde et puis en Belgique sera présentée. Différents produits d'estimation de l'évapotranspiration par télédétection ou réanalyse seront comparés sur base de la littérature. Une introduction à l'imputation (complétion des points de données manquant) par machine learning de données piézométriques sera également présente.

Ensuite, les objectifs du mémoire seront expliqués plus en détail dans le Chapitre 3, à la suite duquel vous retrouverez une description détaillée de la méthodologie adoptée pour construire, traiter et interpréter les données.

Finalement, le bilan hydrologique de chaque bassin versant sera mis en relation avec des tests de tendances afin de pouvoir expliquer au mieux les changements hydrologiques qui s'opèrent sur les 40 années d'étude.

Chapitre 2 : État de l'art

Les sections 2.1 et 2.2 présentent diverses analyses hydrologiques menées dans différentes régions du monde et en Belgique pour évaluer les variations temporelles des variables hydrologiques. Il va de soi que cette présentation n'est pas exhaustive, l'hydrologie étant un domaine de recherche particulièrement vaste et actif.

2.1 Analyses hydrologiques dans le monde méthodes et résultats

De nombreuses analyses hydrologiques à l'échelle de bassins versants de différentes tailles sont disponibles dans la littérature. Les méthodologies appliquées et les résultats obtenus de quelques études sont résumés dans cette section.

2.1.1 Évapotranspiration et débits d'étiage

En Allemagne, une étude s'est intéressée à l'évolution de l'évapotranspiration réelle dérivée du bilan hydrologique sur la période 1970-2019 (Bruno & Duethmann, 2024). Selon les auteurs, la meilleure manière d'observer l'évolution de l'ETR (évapotranspiration réelle) à l'échelle du bassin est de l'estimer par bilan hydrologique. Pour ce faire, ils ont récolté des données de débits, de précipitations et de niveau piézométrique sur des bassins versants de taille comprise entre 50 et 1000km². Uniquement les bassins ayant un débit annuel inférieur aux précipitations annuelles ont été gardés. Pour n'analyser que des bassins « naturels », les auteurs ont effectué des tests de Pettitt (Pettitt, 1979), un test non paramétrique permettant de détecter les variations brusques, excluant ainsi tout bassin présentant une rupture significative, symptomatique d'une probable altération du comportement hydrologique par intervention humaine. En d'autres termes, cette approche a permis d'écarter les bassins ayant connu pendant la période d'étude la construction d'infrastructures hydrauliques (barrages, canaux), une urbanisation importante ou des modifications majeures de l'occupation du sol. Au total 461 bassins ont été sélectionnés. Pour quantifier les incertitudes des précipitations, les données ont été comparées avec 3 autres produits de précipitations. Un paramètre « Sdyn » (stockage mobilisable) a été estimé à partir de l'analyse des débits des cours d'eau (Staudinger et al., 2017). Le delta Sdyn a été calculé par la différence de Sdyn entre le début et la fin de chaque année hydrologique. Pour valider la cohérence des variations de stock ainsi obtenues, ces valeurs ont été comparées avec des observations GRACE (Gravity

Recovery and Climate Experiment) et des données provenant de 1052 piézomètres sur une période de 2002 à 2019. Les ETR dérivées du modèle ont été comparées avec des données d'ETR de contrôle local provenant de tour de flux et de lysimètres. Les résultats indiquent que l'ETR des BV en Allemagne a généralement augmenté de plus de 2mm par an entre 1970 et 2000 et est ensuite restée relativement stable (et une légère diminution sur certains bassins). Cela indiquerait une transition vers des systèmes plus limités par l'eau, davantage de stress hydrique.

Une prépublication du même auteur, également en Allemagne, s'intéresse à l'effet de l'augmentation de l'ET sur la baisse des débit d'étiage en période sèche (Bruno et al., 2024). Cette étude se limite aux bassins versants de taille inférieure à 1000 km², soit un échantillon de 363 bassins. Les analyses ont été effectuées sur la même période que l'article ci-dessus (1970-2019) appliquant la même méthodologie de calcul de l'ETR. La détection des débits d'étiage s'est basée sur le calcul d'une moyenne glissante de Q (débit), sur une fenêtre glissante de 7 jours et puis en sélectionnant la valeur minimale des mois de juin, juillet et août

Pour attribuer les tendances, les bassins ont été regroupés en différentes classes (préalpin, centre-sud, est et nord) à l'aide de la méthode de Ward (Ward, 1963). Les classes les plus proches géographiquement de la Belgique étant « nord et « centre-sud » (voir Figure 2-1) Cette méthode de classification vise à minimiser la variance au sein de chaque groupe en fusionnant entre eux les groupes qui augmentent le moins la variance totale. Les significativités des tendances estimées par la pente de Theil-Sen ont été déterminées avec le test de Mann Kendall (Kendall, M.G., 1948; Sen, 1968). Ces deux méthodes seront expliquées à la section 4.3. Comme on peut le voir sur la Figure 2-1, Les débit d'étiages en été ont

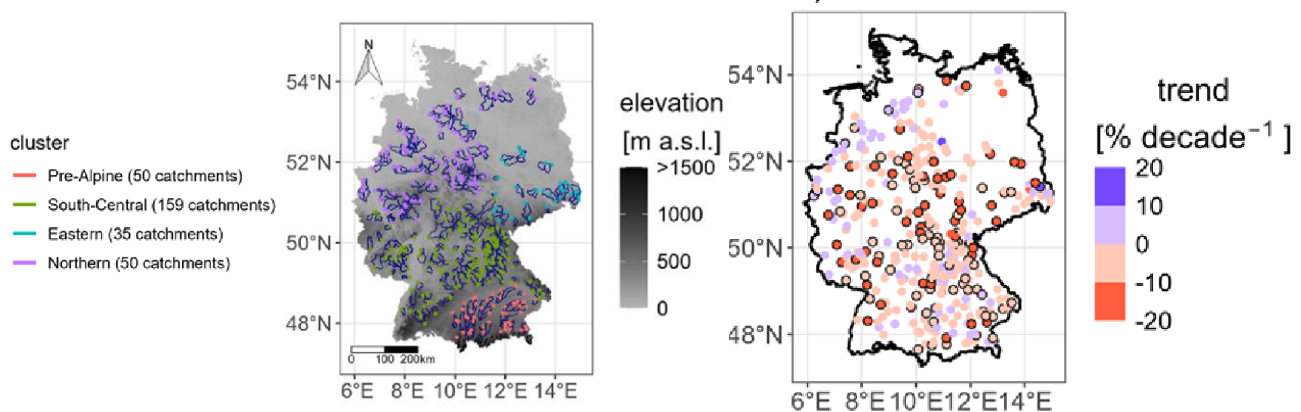


Figure 2-1 : Classes obtenues par méthode de Ward (à gauche) et tendances des débits d'étiage en Allemagne sur la période 1970-2019 (à droite). Les points avec un bord noir ont une p valeur < 0.005. Source : adapté de Bruno et Al, 2024.

largement diminué. Cette diminution est significative pour 31% des bassins versants avec une baisse médiane de 3,7% par décennie. L'ETR annuelle a augmenté entre 1970 et 2019 (surtout avant 2000 comme vu précédemment) de manière significative pour 27% des BV. La tendance médiane s'élève à 1,1% par décennie, avec un 25e percentile de -0,5% et un 75e percentile de 3,2%. La classe nord a augmenté de 3% par décennie. Sur la période 1970-1999, la tendance médiane s'élève à 4,2% (1,8%/6,9% pour les percentiles). Les résultats finaux montrent que les tendances des débits d'étiage estivaux sont négativement corrélées ($r=-0,26$ et $-0,36$ pour les classes « centre-sud » et « nord » respectivement) avec les tendances de l'ETR. Autrement dit, quand l'ETR augmente, les débits d'étiage diminuent.

2.1.2 Déficits hydriques

Une étude sur le BV de la Biebrza en Pologne s'intéresse au comportement du bilan hydrique dans le but d'améliorer la gestion des écosystèmes humides de cette vallée (Venegas-Cordero et al., 2024). Pour ce faire, des simulations ont été effectuées à l'aide du modèle SWAT (Hydrological Soil and Water Assessment Tool) pour extraire des données de précipitations, ETR, ruissellement et différence de rétention d'eau. Sur la période de 1951 à 2021, l'analyse révèle un bilan annuel moyen négatif pour le bassin indiquant la présence d'un déficit hydrique d'environ 25mm par an en moyenne. Les auteurs soulignent la nécessité d'effectuer des actions pour améliorer la rétention d'eau du bassin pour préserver les écosystèmes de ces zones humides dans le futur.

Deux études récentes dans le bassin méditerranéen révèlent des tendances convergentes. Une étude a été conduite dans un petit bassin versant du sud-est de la France (70 km²), le Réal Collobrier (Folton et al., 2019). Ce bassin constitue un site de référence car il fait partie du réseau OZCAR (<https://www.ozcar-ri.org/ozcar/>), un réseau français de sites d'observation dans lesquels des grilles extensives de stations de mesures ont été installées depuis de nombreuses années. Pour cette étude, 6 limnigraphes et 14 pluviomètres ont été utilisés, plusieurs bassins de dimensions réduites inclus dans le bassin du Réal Collobrier ont donc pu être comparés. La période d'analyse s'étend de 1968 à 2017. En résumé, l'étude a déterminé une diminution générale des précipitations en mars associée à une diminution des débits au printemps ou à l'été ou à l'automne en fonction des caractéristiques hydrogéologiques du bassin considéré. Ces observations soulignent la forte variabilité du comportement hydrologique, même sur de courtes distances de quelques kilomètres, confirmant

l'importance de l'hydrogéologie locale. L'autre étude constitue une analyse à grande échelle du bassin méditerranéen (Unnisa et al., 2023). Elle effectue un bilan hydrique et non hydrologique ici, car cette approche se concentre uniquement sur les flux d'interactions sol-plante-atmosphère, dans une démarche agronomique tandis que le bilan hydrologique cherche à comprendre le comportement global des flux du système incluant les écoulements de surface et souterrains dans un bassin versant, dans une démarche hydrologique (INRA, 2025b, 2025a). Pour ce faire, les données de TerraClimate sont utilisées. C'est une base de données climatiques globales haute résolution (4 km), qui fournit des données mensuelles de température, précipitations, évapotranspiration potentielle et autres variables climatiques, calculées pour la période 1958-présent en combinant des observations météorologiques et des données satellitaires. L'analyse porte sur l'entièreté du bassin méditerranéen et conclut à un déficit hydrique généralisé dans le bassin méditerranéen. Folton et al. ont démontré pour le petit BV (bassin versant) du Réal Collobrier que l'augmentation des températures et de l'ETP tend à diminuer la quantité d'eau disponible ce qui est confirmé par Unnisa et al. à une échelle régionale.

2.1.3 Niveau des nappes

Une étude sur plus de 170000 piézomètres et 1693 aquifères dans plus de 40 pays a montré récemment une généralisation de la chute rapide ($>0,5\text{m}$ par an) du niveau des nappes (Jasechko et al., 2024). Ce phénomène est particulièrement prononcé dans les zones arides caractérisée par une agriculture intensive. Les déclin de niveaux s'accélèrent dans de nombreux aquifères dans le monde. Les résultats attestent également de nombreuses situations où les baisses de niveaux des nappes ont connu un ralentissement, un arrêt ou une inversion à la suite d'interventions ciblées (implémentation de mesures de régulations).

2.1.4 Effet de l'agriculture sur le bilan

Une étude sur 1342 bassins versants d'Angleterre et des États-Unis s'est intéressée à l'effet de l'agriculture et de la neige sur le bilan hydrologique. Pour ce faire le modèle de Budyko est utilisé (Budyko, 1961; Mianabadi et al., 2020). Ce modèle part du principe qu'il existe une relation entre le rapport d'évapotranspiration potentielle sur les précipitations et le rapport de l'ETR sur les précipitations :

$$\frac{\overline{ETR}}{\overline{P}} = f\left(\frac{\overline{ETP}}{\overline{P}}\right) \quad (1)$$

Avec :

- $\overline{ETR}$: l'ETR moyenne annuelle et
- $\overline{P}$: les précipitations moyennes annuelles
- $\overline{ETP}$: l'ETP moyenne annuelle

Différentes formulations empiriques de l'équation de Budyko ont été proposées dans la littérature. L'analyse présentée ici s'appuie sur la formulation originale et permet de montrer que l'intensification agricole modifie significativement le bilan hydrologique des bassins versants.

2.2 Analyses hydrologiques en Belgique méthodes et résultats

Cette section explore plusieurs études explicatives des tendances hydrologiques afin d'acquérir une compréhension plus approfondie des évolutions en cours en Belgique.

2.2.1 Affectations des sols

Dans la continuité des recherches sur l'effet de l'affectation des sols, une étude menée en Flandre sur 29 sous-bassins et trois décennies a cherché à approfondir la compréhension de l'impact des variations climatiques et des modifications d'occupation du sol sur les variables hydrologiques (De Niel & Willems, 2019). Un modèle de régression statistique a été construit par ajout progressif de variables explicatives sur base du critère d'information bayésien (BIC). Le modèle final obtenu comporte 26 termes compris dans 9 variables explicatives. L'impact de l'urbanisation a été quantifié en remplaçant dans le modèle 1% de la surface totale des prairies, forêts et terres agricoles par des zones urbaines. Cette simulation a conduit à une augmentation des débits de crue estimés (jusqu'à 5%) pour la majorité des bassins étudiés. D'après les auteurs, les changements d'occupation du sol et les évolutions climatiques présentent une importance équivalente dans la modification des débits de crue. Néanmoins, ces facteurs exercent un effet moins prononcé que les paramètres topographiques ou pédologiques. Des débits de crue plus élevés sont observés dans les bassins présentant des pentes moyennes importantes et une forte proportion de sols limoneux.

2.2.2 Débits

Une analyse approfondie du bassin de la Meuse a été menée sur la base des enregistrements de précipitations, températures et débits observés entre 1911 et 2003 (de Wit et al., 2007). L'objectif principal consistait à déterminer l'origine des débits d'étiage et l'impact du changement climatique sur ceux-ci. Une modélisation confrontée aux modèles climatiques régionaux a permis d'évaluer la génération des débits faibles dans le futur. L'augmentation des précipitations hivernales pourrait dans certains cas réduire l'occurrence des débits d'étiage (qui sont principalement soutenu par les nappes qui elles-mêmes sont rechargées par les précipitations d'hiver). Sur les données de validation (1968-1998), l'analyse montre une corrélation de 0,96 entre le débit estimé et mesuré. Cependant, le modèle surestime systématiquement le débit moyen estival. Cette modélisation a permis de montrer que l'accentuation de la saisonnalité des précipitations va se traduire en une augmentation proportionnelle de la saisonnalité des débits.

Dans une autre étude en Wallonie, les débits de 84 stations sur une période de 30 à 50 ans ont été analysés (Grandry et al., 2020). Des séries de maxima annuels et de « pics » au-dessus d'un certain seuil ont été construites. Des tests de Mann Kendall et Pettitt ont été utilisés sur ces séries chronologiques pour évaluer la présence de tendances. Pour les tendances significatives la pente de Sen a été calculée. 10 stations ont présenté une augmentation du débit maximal annuel et/ou du nombre de pics au-dessus d'un certain seuil. Seulement 5 des stations montrent une augmentation de l'ampleur des pics. Il y a plus de tendances négatives que positives. Les tendances positives se situent principalement dans les bassins de la Lesse et de l'Escaut. Les auteurs attribuent ces tendances à une combinaison probable de facteurs climatiques, de changements d'affectation des terres (l'urbanisation ayant augmenté de plus de 30% en Wallonie entre 1985 et 2015) et d'interventions sur les cours d'eau (modification du réseau d'égouttage par exemple).

2.2.3 Précipitations

Au niveau des précipitations, une étude de 2008 a essayé de quantifier l'effet du changement climatique sur les extrêmes de précipitations en Belgique (Ntegeka & Willems, 2008). La station météorologique d'Uccle a été retenue pour cette analyse en raison de

plusieurs avantages : l'homogénéité méthodologique (les méthodes de mesure n'ont pas changé depuis le début des observations), l'étendue exceptionnelle de la période d'étude (107 ans) et la haute résolution temporelle des données (acquisitions toutes les 10 minutes). Des cycles pluridécennaux (30-50ans) semblent avoir été détectés, mais il est difficile de confirmer leur présence, la période d'étude étant paradoxalement trop courte. Les tendances saisonnières ont été calculées selon différentes échelles d'agrégation temporelle, allant de 10 minutes à l'échelle mensuelle. Les résultats révèlent une intensification des événements extrêmes hivernaux, ceux-ci devenant plus intenses au cours de la dernière décennie. Cette étude datant déjà de plusieurs années, il serait intéressant de connaître l'évolution de ces tendances.

2.3 Évaluation des produits d'évapotranspiration

Les produits d'évapotranspiration sont sujets à des niveaux d'incertitudes élevés rendant leur précision peu fiable (Khan et al., 2018). La comparaison des produits d'évapotranspiration permet d'évaluer la performance des uns en fonction des autres. En plus de cela, certaines méthodes de mesure de l'ET (tour de flux) plus localisées et plus précises permettent une évaluation plus poussée. Une étude a comparé plusieurs produits d'évapotranspiration entre eux, avec des tours de mesure de flux sur 3 années consécutives sans interruption pour 93 tours de flux (Zhu et al., 2022) ainsi que pour des observations in situ. Les produits comparés sont : BESS (Breathing Earth System Simulator), GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam Model), AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), MOD16 (MODIS Global Evapotranspiration Product) et SSEBop (Simplified Surface Energy Balance for Operational). Les sites des mesures d'observation in situ ont été classés en 5 classes distinctes : forêts, landes, savanne, prairies et terres arables. En Annexe A, vous pouvez retrouver la performance des différents produits en fonction du type de site considéré. On peut considérer qu'à l'échelle d'observations in situ, GLEAM performe assez mal et MODIS bien ce qui concorde avec leur résolution respective (10km, 500m). Cependant, à une plus grande échelle (site de mesure de flux ou à l'échelle du bassin), des 5 produits d'ET, GLEAM et AVHRR sont ceux qui performant le mieux (Zhu et al., 2022). Une autre étude a évalué la performance de 9 produits d'ET sur différentes échelles (dont ERA5-Land, ECMWF Reanalysis 5 - Land) (Xie et al., 2024). L'article a conclu qu'à l'échelle annuelle pour des grands bassins, GLASS-

MODIS(Global Land Surface Satellite + MODIS), BESS, GLEAM, MOD16 and PML_V2 (Penman-Monteith-Leuning version 2) performaient le mieux.

Une dernière étude présentée ici porte sur la nouvelle version de GLEAM (GLEAM version 4), où les gestionnaires de la base de données évaluent les performances de leur nouveau modèle. Il convient de préciser que d'autres études indépendantes seraient nécessaires, mais il n'y en a pas encore (D. G. Miralles et al., 2025). La résolution du produit est passée de 0,25° (environ 28km) à 0,1° (environ 11km) ce qui devrait considérablement améliorer l'estimation du modèle sur des sols qui présentent une affectation plus variable. GLEAM4 utilise maintenant le contenu en eau du sol, la profondeur racinaire et d'autres variables pour

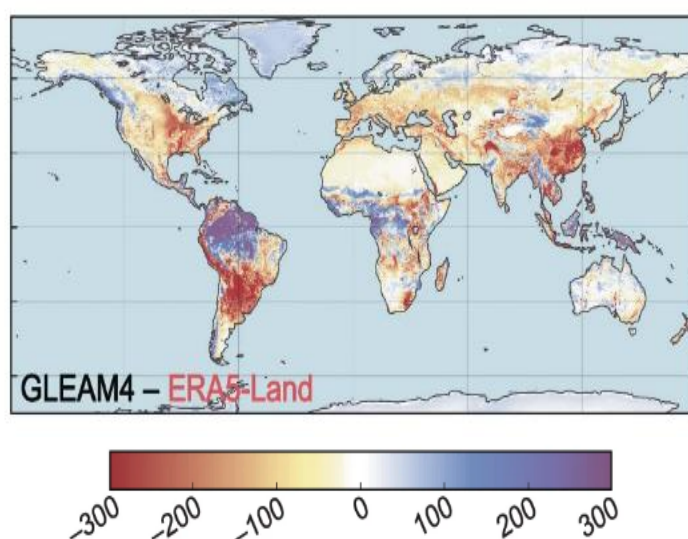


Figure 2-2 – Comparaison des moyennes long terme de GLEAM4 et ERA5-Land, adapté de Miralles et al. (2025)

déterminer le stress évaporatif par machine learning. Il a été comparé à ERA5-Land par moyenne long terme. Sur la Figure 2-2, on peut voir qu'en Europe, ERA5-Land est systématiquement plus élevé que GLEAM4. On pourra plus tard investiguer si cette relation se confirme au niveau des bassins versants de ce mémoire. Plus tard dans l'article, les auteurs comparent 4 types de site spécifiques sur une période > 10 ans : une forêt d'épicéas en Allemagne (DE-Tha), Une forêt méditerranéenne en France (FR-Pue), une culture d'alternance maïs-soja au Nebraska (US-Ne3) et une savane en Australie mais qu'on ne va pas commenter car sans pertinence pour la Belgique. Les résultats montrent que les différents produits d'évapotranspiration qu'ils ont évalués (dont GLEAM4 et ERA5-Land) reproduisent correctement le cycle saisonnier mais ne parviennent pas à mesurer correctement son

amplitude. Pour mesurer cela, les anomalies sont calculées en soustrayant la moyenne saisonnière attendue aux valeurs. Ceci a été fait pour des années exceptionnelles afin de voir

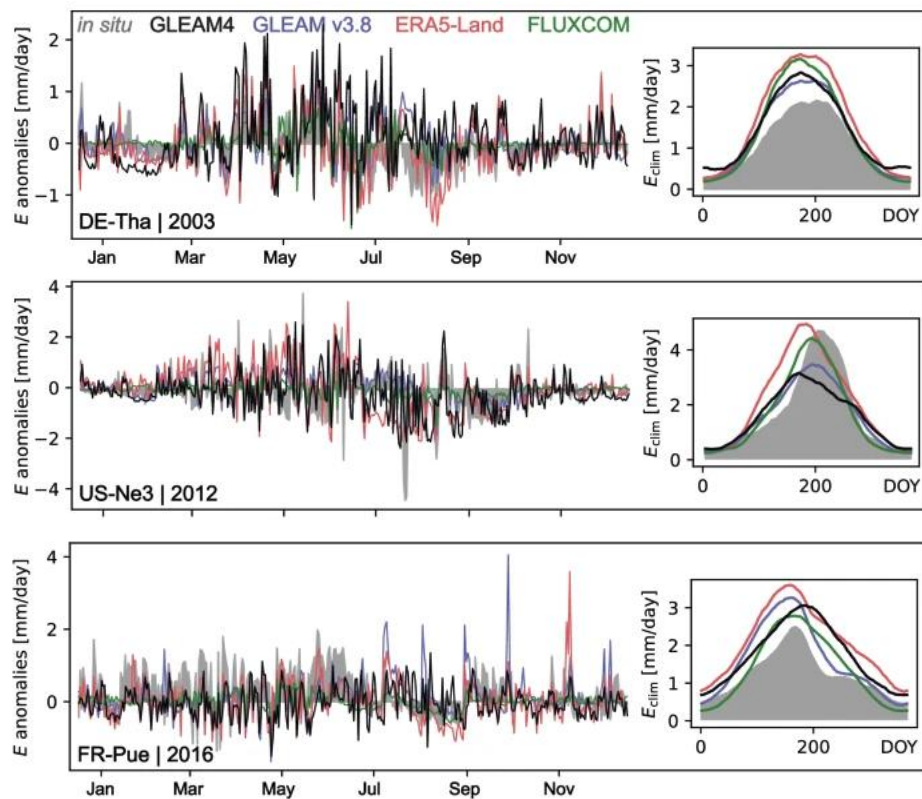


Figure 2-3 : ETR estimée par GLEAM4, GLEAMv3.8, ERA5-Land et FLUXCOM. En bas et en haut forêt méditerranéenne et forêt d'épicéa respectivement. Au milieu, terres agricole alternance maïs-soja Source : Adapté de Miralles et al., 2025

le comportement des produits dans des années extrêmes. Il en résulte que GLEAM4 surestime le cycle pour les deux forêts et sous-estime pour la culture et la savane. Autrement dit, GLEAM4 (et ERA5-Land) sous-estime l'ETR des forêts en hiver, et la surestime en été (Figure 2-3). Au niveau des cultures, il sous-estime l'ETR en été et la surestime en hiver. On peut identifier cette affirmation sur la figure, la sous-estimation en hiver pour la forêt Allemande étant très visible (en haut à gauche). Ces points sont à garder à l'esprit pour l'interprétation des résultats.

2.4 Imputation de données piézométriques par machine learning

L'imputation, dans le cadre du traitement de données, est le fait de remplacer des valeurs manquantes dans les jeux de données par des valeurs estimées (Barnard et al., 2001). Pour imputer des données dans une série chronologique partiellement observée, on peut par

exemple utiliser la moyenne, la médiane ou encore la valeur la plus fréquente. Une autre méthode d'imputation serait d'interpoler linéairement entre les valeurs observées. Cette section propose un aperçu du potentiel du machine learning dans l'imputation de données piézométriques. Les modèles de machine learning examinent les données disponibles sous différents angles afin de concevoir, selon leurs propriétés intrinsèques, des stratégies et techniques appropriées pour reconstituer les valeurs manquantes. En général, c'est un processus itératif, qui va passer dans les données successivement des centaines de fois.

Une étude s'est intéressée à la reconstruction des données piézométriques de puits proches de lacs. Pour ce faire, un modèle régression par machine learning (Gradient Boosting Regressions – GBR) a été utilisé (Can et al., 2025). C'est un algorithme d'ensemble (apprentissage sur plusieurs données) basé sur des arbres de décision, dont chaque itération corrige les erreurs des modèles précédents afin de réduire l'erreur de prédiction. Les données utilisées comprenaient les niveaux de deux piézomètres localisés à 5,5 km et 4,4 km d'un lac, dont les mesures ont également été utilisées. Pour tester la capacité d'imputation du modèle, des discontinuités temporelles ont été artificiellement générées dans les séries de données, avant et après la période utilisée pour l'entraînement du modèle. Les auteurs ont conclu que si la longueur de la période d'entraînement est adaptée aux lacunes à remplir, l'imputation fonctionne assez bien.

Une autre étude a utilisé des réseaux de neurones récurrents de mémoire longue à courte (RNN LSTM) pour imputer sur des lacunes temporelles présentes sur une période de 50ans (Vu et al., 2021). L'objectif étant d'évaluer la performance de ces réseaux neuronaux dans la reconstruction de lacunes temporelles et dans l'extension des séries de données. Les données piézométriques ont été normalisées sur une échelle de -1 à 1 pour que les piézomètres présentant de faibles variations conservent leur importance. Ils ont pu quantifier l'impact de la quantité de données d'entraînement ainsi que l'impact des paramètres du modèle. Pour donner un exemple, des séries avec des lacunes courtes (de 2 à 4 ans) ont été créées et ensuite imputées. Ces imputations ont produit des RMSE compris entre 0,46 et 0,73m. Des séries temporelles avec des lacunes longues sur les jeux de données originaux sont présentes. Les conclusions finales indiquent que la performance de l'approche dépend fortement de la qualité des données d'entraînement. La qualité des données peut être évaluée par des métriques comme, la corrélation entre les piézomètres, la durée et le nombre de piézomètres

utilisés pour l'entraînement. Si des piézomètres se trouvent dans un même contexte hydrogéologique et montrent des propriétés similaires cela facilitera la reconstruction. Optimiser les paramètres des modèles est également un facteur clé.

En conclusion, l'imputation de données piézométriques par machine learning constitue une technique prometteuse, étant donné l'intérêt de disposer de chroniques complètes.

Chapitre 3 : Objectifs

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'impact des changements globaux des 40 dernières années sur les ressources hydrologiques de plusieurs bassins versant belges. Pour ce faire, nous procéderons en plusieurs sous-objectifs :

1. Création d'une base de données des variables hydrologiques clefs sur 7 bassins versants belges (Lesse, Semois, Viroin, Vesdre, Demer, Dendre, Dyle)
2. Analyse de l'évolution des différentes variables et identification des tendances temporelles à l'échelle annuelle, semestrielle, saisonnière et mensuelle sur 40 années (1984-2024)
3. Grâce à l'établissement de bilans hydrologiques simplifiés, évaluer la qualité des hypothèses et des données utilisées et identifier les variables-clés qui affectent les ressources en eau pour chaque bassin.

Chapitre 4 : Méthodologie

4.1 Bilan hydrologique

Afin de réaliser le bilan hydrologique par bassin versant, nous aurons besoin des données suivantes:

- Les précipitations : c'est le flux qui rentre dans le bilan. Elles sont mesurées à l'aide de pluviomètres ou de données radar de précipitations (*WATERINFO - Woordenlijst*, s. d.) et peuvent être issues d'une combinaison des deux.
- L'évapotranspiration réelle : elle est composée de la transpiration des plantes, de l'évaporation des plantes et de l'interception de la canopée (Zhu et al., 2022). Différentes méthodes d'évaluation de l'ETR (télédétection, observation in situ, modèles climatiques,...) sont possibles. Pour des grands BV, les données issues de produits de télédétection ou de modèles climatiques sont très utiles mais sont toutefois associées à des niveaux d'incertitude élevés(Khan et al., 2018).
- Les mesures de débit : C'est le flux sortant du bassin, on doit le mesurer à son exutoire. On ne mesure pas en temps réel le débit d'un cours d'eau, il est estimé en établissant la relation entre hauteur d'eau et vitesse d'écoulement appelée courbe de tarage. Des limnigraphes ou limnimètres sont utilisés pour mesurer la hauteur d'eau en temps réel et des courbes de tarages sont effectuées régulièrement sur les réseaux de mesure (Hydrométrie Wallonie, s. d.; *WATERINFO - Woordenlijst*, s. d.).
- Hauteur de nappe : Mesurée par des piézomètres, qui fournissent la hauteur entre le niveau du sol et la zone saturée. En pratique, on normalise en hauteur par rapport au niveau de la mer en ajoutant le niveau de la mer ce qui permet à la fois de comparer différentes stations de mesures entre elles et d'interpoler(Databank Ondergrond Vlaanderen, s. d.; Piézométrie Wallonie, s. d.) .

Un calcul de bilan hydrologique simplifié par bassin versant sera utilisé dans ce mémoire afin d'évaluer la qualité des données:

$$P - ETR = Q \pm \Delta S \quad (2)$$

Où :

- $P = \text{Précipitations [mm]}$
- $ETR = \text{Evapotranspiration réelle [mm]}$
- $Q = \text{Débit à l'exutoire normalisé par la surface du bassin [mm]}$
- $\Delta S = \text{Variation de la quantité de stock [mm]}$

Suivant l'origine des données, nous les transformerons afin de toujours les exprimer en lame d'eau (mm). Sur une période t_0 à t l'équation (1) devient :

$$\int_{t_0}^t P - \int_{t_0}^t ETR = \int_{t_0}^t Q + (S(t) - S(t_0)) \quad (3)$$

On peut effectuer ce calcul à différentes extensions temporelles. Les bilan effectués dans ce travail seront annuels, en prenant en considération l'année hydrologique (la période à laquelle les variations de stock sont considérées les plus faibles). En Belgique, l'année hydrologique commence le 1er octobre et se termine le 30 septembre (Degré & Grandry, 2021).

Les équations 1 et 2 se basent sur plusieurs hypothèses. Tout d'abord, le BV est considéré comme défini par les lignes de crêtes topographiques avec son exutoire comme seule sortie latérale possible. Son bord constitue une limite infranchissable pour l'eau, par conséquent tous les flux souterrains convergent vers l'exutoire du BV. Ensuite, nous considérerons que la variation du stock d'eau se limite à la variation de la hauteur de la nappe phréatique: la contribution des variations de la teneur en eau de la zone non saturée aux variations de stock ne sera pas prise en compte. Notons que, les mesures des piézomètres seront interpolées linéairement pour obtenir une variation de hauteur du stock. Nous négligerons aussi les prélèvements anthropiques dans le calcul car estimé faibles par rapport aux volumes annuels du bilan. Enfin, nous considérerons que le temps de transfert des flux d'eau est bien inférieur à l'année.

Afin de pouvoir mieux interpréter les bilans hydrologiques de chacun des BV, des tests de tendances seront également effectués avec une méthodologie qui sera présentée en fin de section.

4.2 Construction et traitement de la base de données

Des jeux de données issus de sources multiples ont été collectés dans le but de construire une base de données solide permettant d'établir un bilan hydrologique pour chaque bassin. L'uniformisation et le traitement des données ont été effectués avec les logiciels QGIS et Python. L'objectif est la création d'un tableau de données journalières, sur toute la période d'étude, pour chacun des BV centralisant l'ensemble des variables à l'exception des données piézométriques qui seront traitées séparément. Le détail de l'acquisition et du traitement de chaque type de donnée est présenté dans cette section.

4.2.1 Débits

Les stations de mesures de débits sélectionnées dans ce mémoire sont présentées dans le Tableau 1. Les données proviennent des plateformes Hydrométrie Wallonie (Direction de la Gestion Hydrologique, s. d.) (DGH) et Waterinfo (Hydrologisch Informatie Centrum, s. d.), et constituent le point de départ pour l'analyse hydrologique réalisée dans ce mémoire. Leurs caractéristiques sont décrites dans le Tableau 2. Le choix des stations a été effectué en tenant compte de la disponibilité des données sur la période d'étude (1984-2024) ainsi que selon la taille des différents BV.

Tableau 1 : Caractéristiques des stations limnimétriques

Code station limnimétrique	Bassin correspondant	Localisation	Gestionnaire de la base de données
8221	Lesse	Gendron	DGH
9021	Viroin	Treignes	DGH
9434	Semois	Membre-Pont	DGH
6228	Vesdre	Chaudfontaine-Pisc	DGH
1046	Dyle	Bierges	DGH
den02a-1066	Dendre	Dendermonde	HIC
dem02a-1066	Demer	Aarschot	HIC

Tableau 2 : Caractéristiques des séries de débits.

Donnée	Source	Extension temporelle	Résolution temporelle	Unité
Débits (Wallonie)	Hydrométrie Wallonie	Variable	Journalière	m ³ /s moyen
Débits (Flandre)	Waterinfo	Variable	Journalière	m ³ /s moyen

Les données de débits étant fournies en m³/s moyen par jour, elles ont dû être transformées en lame d'eau de la manière suivante :

$$Q = \frac{Q_{brut} \times 86400 \times 1000}{S} \quad (4)$$

Avec :

- Q = Débit journalier total en lame d'eau [mm/jour]
- Q_{brut} = Débit moyen journalier [(m³/s) /jour]
- S = surface du bassin en [m²]
- Les 2 chiffres permettant de passer de débit moyen à débit total (1jour) et pour le passage en mm respectivement

4.2.2 Redéfinition des bassins versants sur base des stations limnimétriques

Pour la suite de l'analyse, chaque BV versant a dû être redéfini en choisissant comme exutoire la localisation de la station limnimétrique sélectionnée. Cette étape est nécessaire pour avoir une cohérence entre le débit et les autres variables (qui seront acquises sur base de la limite du bassin). Pour ce faire le logiciel QGIS a été utilisé.

La redéfinition des bassins est effectuée à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT). Pour ce travail, le « Copernicus Global Digital Elevation Model 30m » (European Space Agency, 2024) issu de la mission TanDEM-X d'une résolution de 30m a été utilisé. Ce modèle a été téléchargé sur le site Open Topography.

Une zone autour de la Belgique a ensuite été clippée de ce MNT et reprojetée dans le système de coordonnées Lambert 72 (EPSG :31370) référentiel standard utilisé en Belgique pour les analyses géographiques.

Pour réduire les temps de calcul, le MNT a été copié et découpé pour chaque BV en délimitant une zone tampon autour du BV attendu. Ensuite, l'algorithme `r.watershed`, intégré dans le package GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), a été appliqué sur ces MNT reprojetés pour générer automatiquement le réseau de drainage théorique et calculer les lignes de flux.

La définition des bassins versants à chaque exutoire a ensuite été effectuée avec la méthode « deterministic 8 » de l'outil `r.wateroutlet` en utilisant comme raster le sens de drainage obtenu précédemment. Dans cette méthode, pour chaque pixel on considère comme direction d'écoulement de l'eau le pixel ayant la descente la plus raide des 8 pixels autour. Les pixels de ligne de flux les plus proches des stations limnimétriques ont été considérés comme exutoire. Les outils `fix.geometries` et `vertex.tool` ont ensuite été utilisés pour corriger les problèmes de géométries des polygones ainsi obtenus.

Pour le bassin de la Demer à Aarschot, le bassin obtenu a été fusionné avec les sous-bassins de la Demer délimité par la VMM (Vlaamse Milieu Maatschappij, 2023) se situant en amont du canal Albert. Le canal Albert étant surélevé, le bassin initialement obtenu s'arrêtait à son niveau, ne représentant donc pas l'hydrogéologie locale.

Enfin les bassins résultants ont été exportés sous format shapefile et geopackage avec l'outil `r.to.vect` pour permettre l'acquisition et le traitement des données.

4.2.3 Description des bassins versants d'étude

La Figure 4-1 présente les BV délimités avec leurs stations limnimétriques respectives et leur répartition selon les districts hydrographiques (Meuse en brun et Escaut en vert). Les

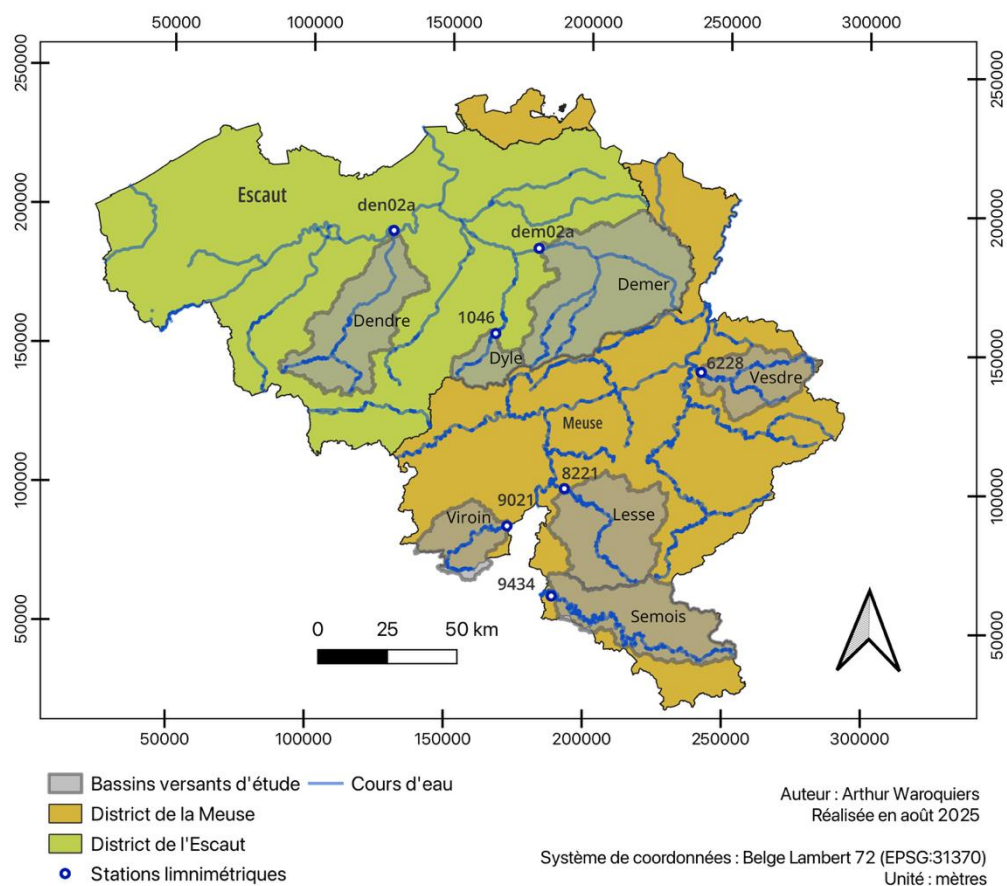


Figure 4-1 : Cartes des bassins versants obtenus, la localisation de leur station ainsi que la délimitation entre les districts de la Meuse et de l'Escaut

bassins de la Vesdre, du Viroin, de la Lesse et de la Semois sont regroupés dans le district hydrographique de la Meuse, tandis que les bassins de la Dendre, de la Dyle et de la Demer appartiennent au district hydrographique de l'Escaut.

La Figure 4-2 présente la topographie de la Belgique. Les BV du district de l'Escaut sont visiblement inclus dans un relief moins prononcé que les BV du district de la Meuse. C'est confirmé par les pentes moyennes de chaque BV (calculées sur QGIS). D'autres caractéristiques géographiques et topographiques sont présentées dans le Tableau 3. En

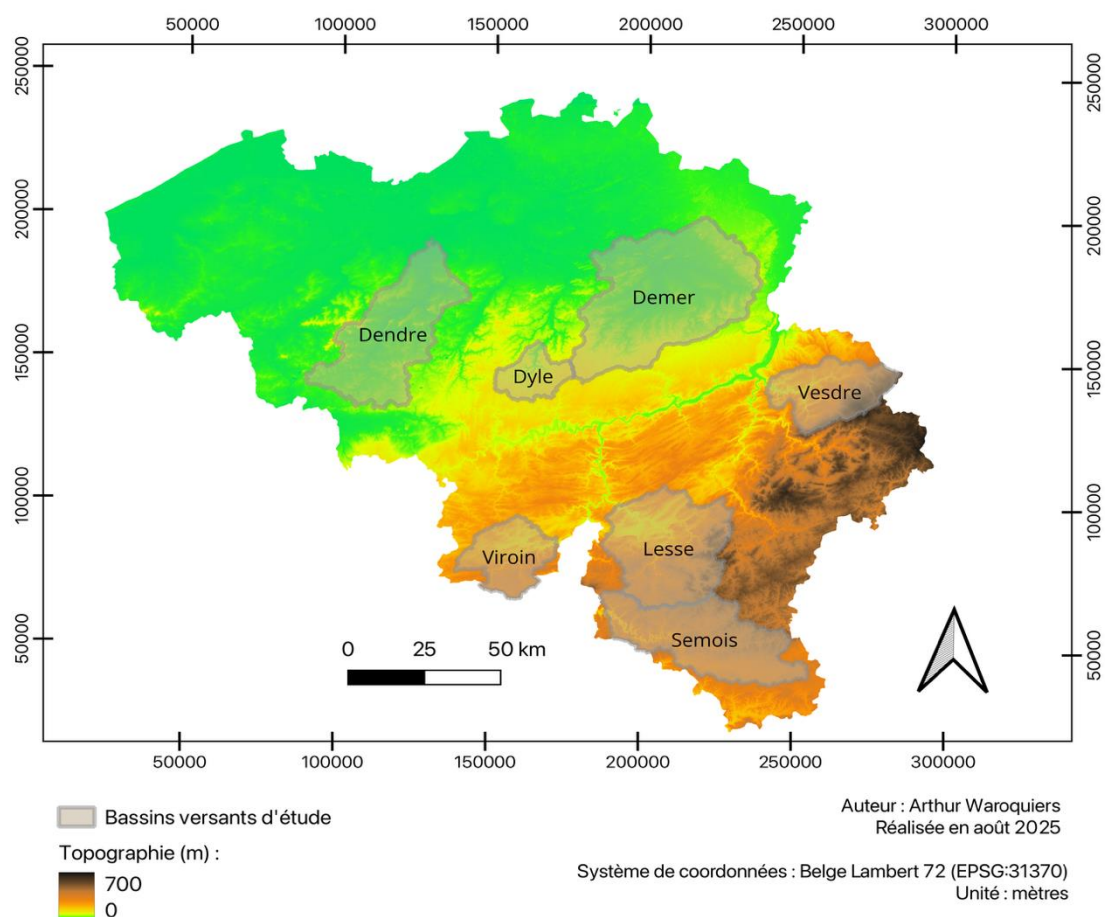


Figure 4-2 : Carte topographique de la Belgique. Les bassins versants d'étude sont mis en évidence.

comparant les altitudes maximales et les pentes moyennes, on peut considérer que le regroupement par district hydrographique est déjà pertinent.

Tableau 3 : Caractéristiques des BV d'étude

BV	District	Localisation	Superficie	Alt. max.	Alt. exut.	Pente moyenne
Lesse	Meuse	Sud	1286 km ²	603 m	106 m	12,94 %
Viroin	Meuse	Sud-ouest	553 km ²	399 m	122 m	10,98 %
Semois	Meuse	Sud	1218 km ²	562 m	177 m	13,81 %
Vesdre	Meuse	Sud-est	686 km ²	694 m	79 m	12,45 %
Demer	Escaut	Nord-est	2151 km ²	186 m	11 m	5,4 %
Dendre	Escaut	Nord-ouest	1346 km ²	156 m	1 m	4,69%
Dyle	Escaut	Centre	309 km ²	187 m	46 m	7,28%

Considérant cela, le climat des BV d'étude peut être décrit selon une dénomination nord-sud, le nord correspondant aux districts hydrographiques de l'Escaut et le sud à ceux de la Meuse. La Belgique dans son entièreté est caractérisée par un climat tempéré se traduisant par des hivers relativement doux et des étés relativement frais (IRM, 2020a). Néanmoins, il existe des différences notables entre les BV du nord et les BV du sud. Sur la Figure 4-3, On peut distinguer la différence de précipitations moyennes annuelles entre le nord et le sud.

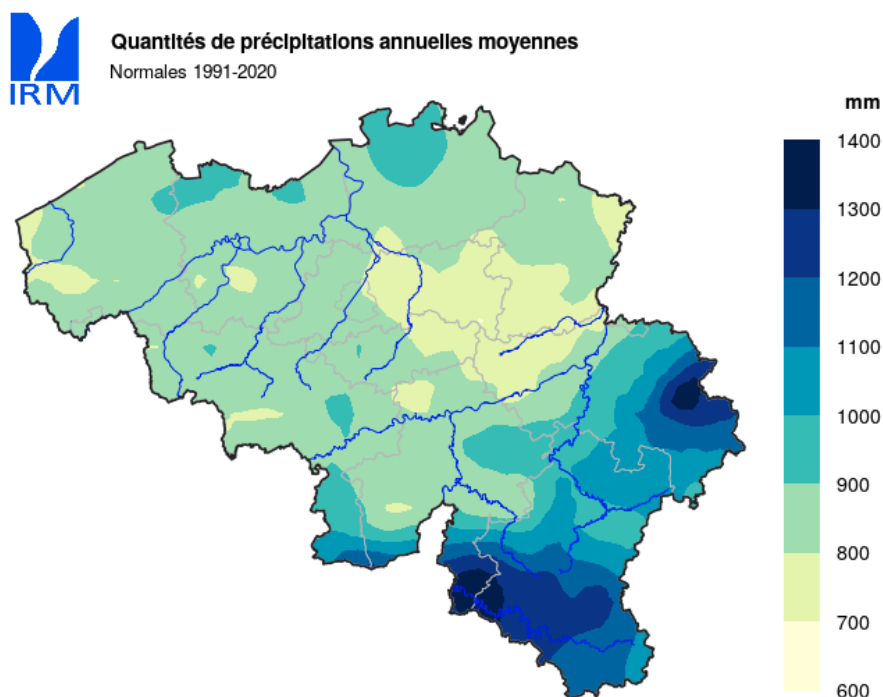


Figure 4-3 : Carte des précipitations annuelles moyennes (1991-2020) - IRM

Les BV situés dans le sud sont caractérisés par des pluviométries annuelles de l'ordre de 1000 à 1300mm par an, alors que les bassins situés dans le nord sont caractérisés par des moyennes plus faibles, entre 700 et 1000mm par an. Décembre est en moyenne le mois le plus pluvieux et avril le plus sec toutes régions confondues (IRM, 2020a; SPW, 2018). Dans son rapport climatique de 2020, L'IRM prévoit à l'avenir une baisse des précipitations en été et une augmentation en hiver (IRM, 2020b).

Au niveau des températures, un gradient de température nord-sud est observable toute l'année. Le nord bénéficiant de températures plus élevées qu'au sud principalement en raison de la différence d'altitude (IRM, 2020a).

La description des types de sols rencontrés n'est pas vraiment généralisable. Un résumé des types de sols rencontrés est tout de même présenté en Annexe B (page 90). Au

nord, dans le bassin de la Dendre, on rencontre principalement des sols limoneux sur les pentes et les plateaux, et des sols limoneux sableux dans les vallées (Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, 2022b) (voir Annexe B). Le bassin de la Demer se distingue par une plus grande variabilité pédologique. Il présente un gradient nord-sud consistant, avec des sols à texture sableuse au nord, des sols sablo-limoneux au centre du bassin, et des sols limoneux dans la partie sud du BV (Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, 2022a). Le bassin de la Dyle est quant à lui composé principalement d'un mélange de sols limoneux (68%), sablo-limoneux (26%). On retrouve également des sols alluviaux et limono-caillouteux à hauteur de 3% chacun (SPW, 2005d).

Dans la partie sud, au sein du district de la Meuse, le type de sol rencontré est également difficilement généralisable. Pour la Vesdre, le sol est composé principalement de sols limono-caillouteux (42%), limoneux peu caillouteux (25%) , limoneux (6%) et tourbeux (8%) (SPW, 2005c). Pour le BV de la Lesse, on retrouve principalement des sols limono-caillouteux (54%), limoneux peu caillouteux (29%), sols argileux (5%) (SPW, 2005b). Le BV de la Semois présente une plus grande variété de sols. On y retrouve des sols limono-caillouteux (40%), limoneux peu-caillouteux (9%), sableux à sablo-limoneux (21%) et des sols argileux (16%) (SPW, 2005e). Les informations pour le bassin du Viroin ne sont pas disponibles directement. La consultation de la carte des types de sol de Wallonie a permis de déterminer 3 types de sols prévalents : limono-caillouteux, limoneux peu caillouteux et argileux sur WalOnMap (Voir Annexe B).

L'occupation du sol a été résumée dans la Figure 4-4 en se basant sur les données disponibles dans les plans de gestion des risques d'inondations, les plans de gestion des bassins hydrographiques, les états des lieux des sous-bassins hydrographiques ainsi que certains contrats de rivière (Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, 2022b; CR Dendre, 2017; CRV asbl, 2017; Service Public de Wallonie, 2021; SPW, 2005a). On peut constater qu'au niveau occupation du sol, les BV de la Lesse, du Viroin et de la Semois sont très similaires. La Vesdre et la Demer présentent également des similarités, avec une proportion de prairies égale ainsi qu'une répartition entre forêts, zones artificialisées et terres arables comparable. Le dernier groupe comprend la Dyle et la Dendre. Ces deux bassins sont caractérisés par une proportion plus importante de terres arables (>50% dans les deux cas).



Figure 4-4 : Diagrammes camemberts de l'occupation du sol des différents BV d'étude, les valeurs de la Dendre sont une moyenne pondérée en proportion de la surface sur base des informations disponibles pour la Flandre et la Wallonie

La Figure 4-5 montre la complexité et l'enchevêtrement des masses d'eau du sous-sol de Belgique. En Flandre la carte des masses d'eau souterraines comporte 6 niveaux (appelés « horizons »)(Hydrologisch Informatie Centrum, s. d.). Seulement les 3 premiers niveaux rencontrés ont été représentés sur cette carte car aucun des piézomètres utilisés dans les bilans hydrologiques ne s'insère dans des niveaux supérieurs à 3. L'horizon 1 correspond à la première masse d'eau rencontrée, le 2 à la seconde et ainsi de suite. Les flèches oranges

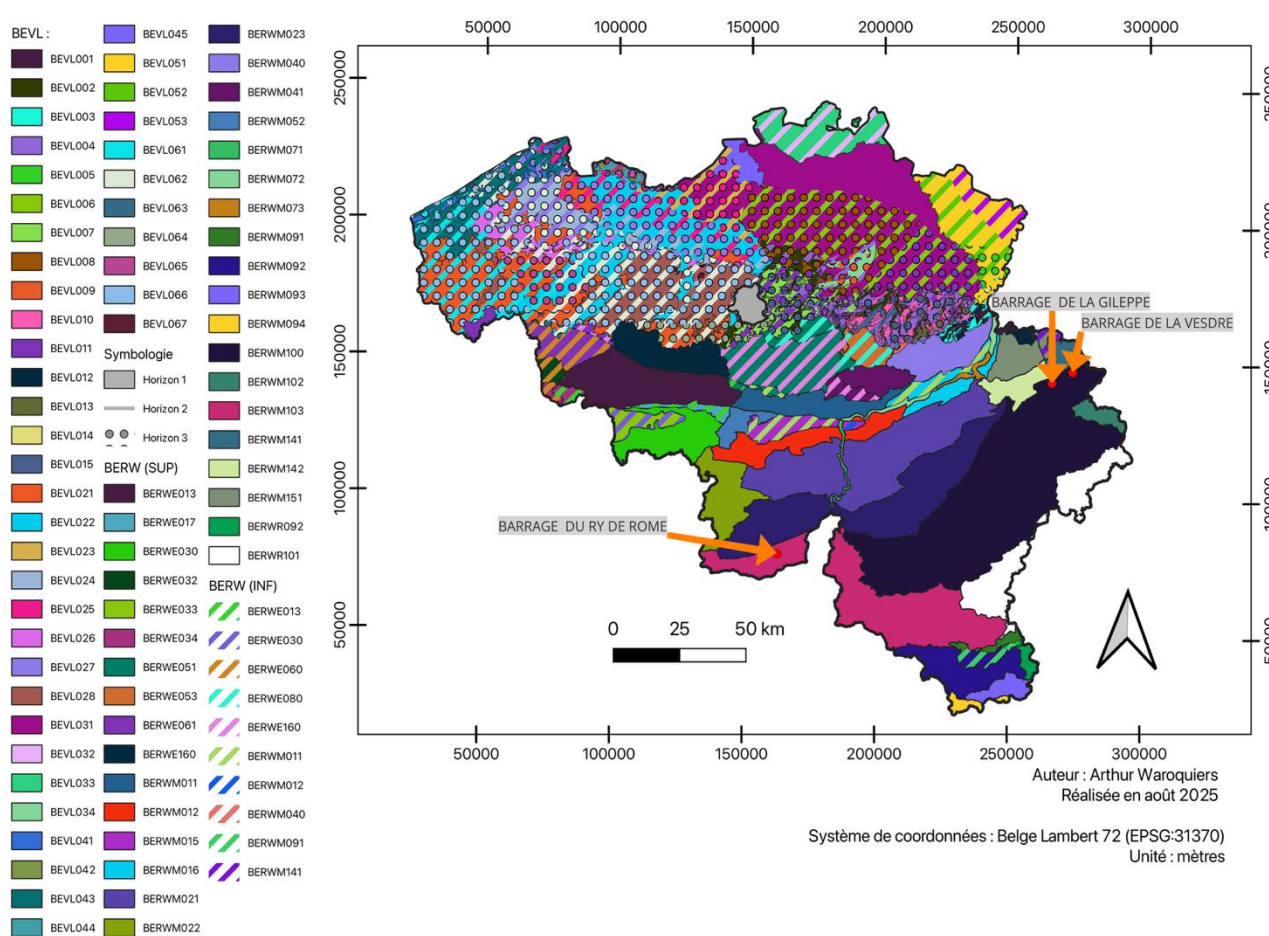


Figure 4-5 : Carte des masses d'eaux souterraines pour la Flandre et la Wallonie. Pour le sous-sol de Flandre, seulement les 3 premières couches (sur 6) sont représentées. La légende hachurée des secondes masses d'eau de Wallonie, bien que de couleurs différentes lorsqu'une masse d'eau est présente dans les deux horizons, reste correcte. Les éléments graphiques situés visuellement au-dessus correspondent aux aquifères les plus profonds

indiquent la localisation des principaux ouvrages hydrauliques présents dans les BV d'étude. Les barrages de la Gileppe et de la Vesdre ont, en plus de la génération d'hydroélectricité, une fonction d'approvisionnement en eau potable. 16,7 millions et 15,9 millions de m³ d'eau potable, respectivement, ont été fournis à la Société Wallonne Des Eaux (SWDE) en 2022 par

ces deux barrages (Service Public de Wallonie - Portail Infrastructures, s. d.). Ils ont également une fonction de soutien aux débits d'étiage pour la navigation fluviale ainsi qu'une fonction d'écrtage des crues (EDIWALL - Service Public de Wallonie, 2021). Dans le BV du Viroin, le barrage du Ry de Rome a produit quant à lui 2 millions de m³ d'eau potable pour la SWDE en 2022 (Service Public de Wallonie - Portail Infrastructures, s. d.). Il exerce également une fonction d'écrtage des crues pour le Ry de Rome (Service Public de Wallonie, 2021). Un barrage à vocation hydroélectrique est également présent sur la Vierre, affluent de la Semois(ASBL Contrat de Rivière Semois-Chiers, 2014). Il permet également d'écrteter les débits de crues de la Vierre mais est trop petit pour avoir un impact sur la Semois (Service Public de Wallonie, 2021). La Lesse présente également des petits barrages à vocation touristique et hydroélectrique mais qui n'ont pas de rôle de régulation (Service Public de Wallonie, 2021).

4.2.4 Précipitations

Les caractéristiques des données fournies par l'IRM sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques des données fournies par l'IRM

Donnée	Source	Extension temporelle	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Unité
Précipitations	IRM	1961-présent	Climate grid 5x5km	journalière	mm/jour
Évapotranspiration de référence (ET0)	IRM	1961-présent	Climate grid 5x5km	journalière	mm/jour

Ces données sont accompagnées d'un fichier contenant la localisation de 1360 centroïdes correspondant à une maille de 5kmx5km couvrant l'entièreté de la Belgique (Royal Meteorological Institute catalogue, s. d.). Dans le fichier brut, une valeur de donnée en mm est attribuée quotidiennement à chaque centroïde. La précipitation moyenne de chaque bassin versant est calculée en suivant la méthode des polygones de Thiessen (ou polygones de Voronoi). L'Équation ((5) présente la logique derrière cette méthode :

$$P_{bassin} = \sum_{i=1}^{1360} \frac{S_i \cdot P_i}{S_{bassin}} \quad (5)$$

Où :

- P_{bassin} = précipitation sur le bassin [mm]
- S_i = la surface du centroïde i incluse dans le bassin [m^2]
- S_{bassin} = la surface totale du bassin [m^2]
- P_i = la valeur de précipitation du centroïde i [mm]

La Figure 4-6 présente les centroïdes utilisés pour chaque bassin, coloriés selon leur contribution relative à la superficie du BV correspondant. Naturellement, la majorité des

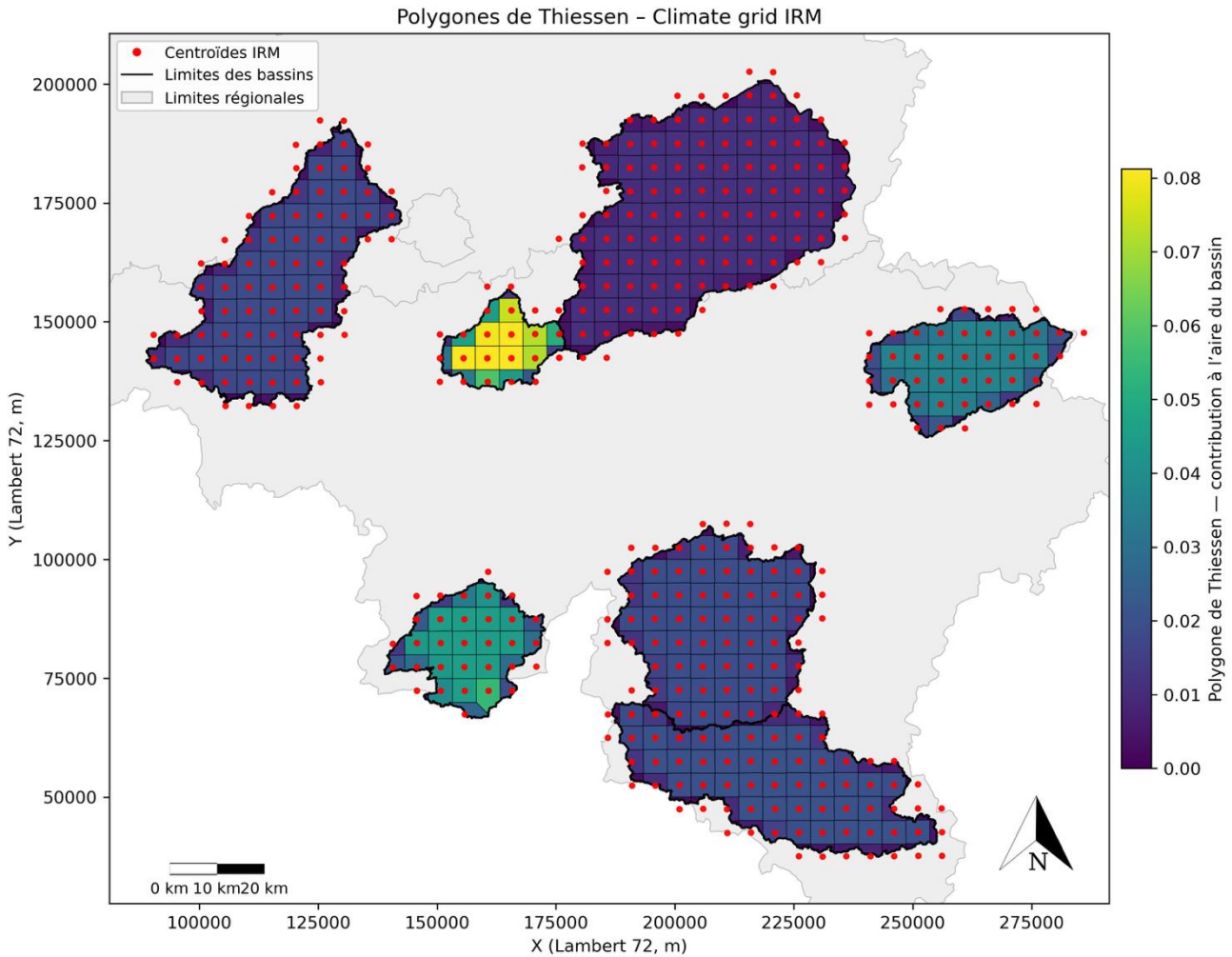


Figure 4-6 : Polygones de Thiessen des centroïdes de la climate grid de l'IRM. Carte réalisée en Août 2025 sur python à l'aide des modules geopandas et geovoronoi. Système de coordonnées : Belge Lambert 72 (EPSG :31370), unités : m

centroïdes de la climate grid ne présentent aucune surface incluse dans le bassin versant, ce qui annule leur contribution dans le calcul. À l'issue de ce traitement, une série chronologique

journalière de précipitations (et de l'ET0 disponible sous le même format) a été obtenue pour chacun des BV.

4.2.5 Évapotranspiration

Les différentes caractéristiques des trois produits d'évapotranspiration envisagés pour ce travail - MODIS16A (Running et al., 2021), GLEAMv4.2a(D. Miralles et al., 2023; D. G. Miralles et al., 2025), ERA5-Land(Copernicus Climate Change Service, 2019) - sont résumées dans le Tableau 5.

L'ET0, fournie par l'IRM, a été traitée avec la même méthodologie adoptée que pour les données de précipitation à la section 4.2.4. Le couvert végétal utilisé comme référence est l'herbe bien arrosée.

Tableau 5 : Caractéristiques des produits d'évapotranspiration

Donnée	Source	Extension temporelle	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Unité
ETR	GLEAM4	1980 -	0.1°≈11km	Journalière	mm
ETP	GLEAM4	1980 -	0.1°≈11km	Journalière	mm
ETR	MODIS16A	2000 -	500m	Somme sur 8jours	mm
ETP	MODIS16A	2000 -	500m	Somme sur 8jours	mm
ETR	ERA5-Land	1950 -	9km	Journalière	mm
ETP	ERA5-Land	1950 -	9km	Journalière	mm

GLEAM v4.2a (Global Land Evaporation Amsterdam Model) est un modèle global d'évapotranspiration qui intègre des données d'observations satellitaires, de réanalyses et d'observations de terrain pour estimer les différentes composantes de l'évaporation terrestre : transpiration, évaporation du sol nu, perte par interception, évaporation en surface libre et sublimation(D. Miralles et al., 2023; D. G. Miralles et al., 2025). Contrairement aux versions précédentes qui utilisaient l'équation de Priestley-Taylor, GLEAM v4.2a emploie désormais, entre-autre, l'équation de Penman pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. Toutes les variables utilisées dans le modèle sont présentées dans le Tableau 6 :

Tableau 6 : Sources des données utilisées dans le modèle GLEAM4. Source : Mirales et al. 2025

Variable	Source	Type	Resolution
Net radiation (R_n) and shortwave incoming (SW_i)	MSWX v1.00 ³⁷	Downscaled reanalysis	0.1°
	CERES ^{51,68}	Satellite	0.5°
Air temperature (T_a)	MSWX v1.00 ³⁷	Downscaled reanalysis	0.1°
	AIRS ^{38,69}	Satellite	1°
Precipitation (P)	MSWEP v2.8 ⁵⁰	Observational merger	0.1°
	IMERG Final V07 ^{52,70}	Satellite	0.1°
Wind speed (u)	ERA5 ^{71,72}	Reanalysis	0.25°
Vapour pressure deficit (VPD)	MSWX v1.00 ³⁷	Downscaled reanalysis	0.1°
	AIRS ^{38,69}	Satellite	1°
Carbon dioxide concentration (CO_2)	CAMS ^{73,74}	Reanalysis	0.75°
Snow water equivalent (SWE)	GlobSnow ⁷⁵ /NSIDC ⁷⁶	Satellite	25 km
Surface soil moisture (SM_s)	ESA CCI ^{48,77}	Satellite	0.25°
Vegetation optical depth (VOD)	VODCA v2 ^{78,79}	Satellite	0.25°
Fraction absorbed photosynthetic radiation (fPAR)	MOD15A3H ⁸⁰	Satellite	500 m
Leaf area index (LAI)	MOD15A3H ⁸⁰	Satellite	500 m
Vegetation height (h)	GEDI/Landsat ³⁶	Satellite	30 m
Land cover fractions	MEaSURES ⁸¹ /MOD44B ⁸²	Downscaled reanalysis	0.05°/ 250 m
Soil properties	HiHydroSoil ⁸³	Observation driven	250 m

L'ETR est obtenue en appliquant un facteur de stress évaporatif dérivé de réseaux de neurones profonds entraînés sur des données globales d'eddy-covariance. L'eddy-covariance est une technique largement utilisée pour quantifier les flux locaux de gaz (CO_2 , vapeur d'eau) entre les écosystèmes et l'atmosphère (Baldocchi, 2003). Les données GLEAM sont fournies au format netCDF via un serveur SFTP dont il faut demander l'accès sur « <https://www.gleam.eu/#downloads> ». Elles présentent une résolution journalière avec 1 fichier par année d'environ 2,5 Go par variable. Pour cette étude, les variables ETR, ETP et stress hydrique (S) ont été téléchargées directement sur un disque dur externe (300giga). Elles ont ensuite été extraites sous Python à l'aide de la bibliothèque pyproj.geod, qui permet d'effectuer des calculs d'aires géodésiques pour pondérer les pixels situés en bordure de bassin en fonction de leur surface d'inclusion réelle. Cette approche a permis d'obtenir un fichier CSV journalier par variable sur la période d'étude, directement intégrable au tableau de données commun.

MODIS16A2 est un produit de télédétection développé par la NASA qui estime l'ETR et l'ETP à une résolution de 500m en utilisant les satellites Terra et Aqua (Running et al., 2019, 2021). Il est disponible sous un format de somme cumulée sur 8 jours. La valeur cumulée est divisée par 8 pour estimer une valeur journalière. Principalement basé sur l'équation de

Penman-Monteith, il utilise des données météorologiques de réanalyse ainsi que des données issues de la télédétection. Les données MODIS sont disponibles sur la plateforme d'analyse géospatiale en ligne Google Earth Engine.

ERA5-Land est un produit issu de la réanalyse du produit ERA-5 par l'ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) (Copernicus Climate Change Service, 2019). Le cœur d'ERA5-Land est le modèle de surface terrestre du ECMWF : le Carbon Hydrology-Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land (CHTESSEL). L'ETP est calculée par bilan énergétique en supposant une végétation de type culture sans stress hydrique. Les données d'ERA5-Land sont également disponibles sur Google Earth Engine.

Le facteur de stress hydrique S est calculé selon les recommandations de la FAO (Food and Agriculture Organization) (Allen, 1998) (Voir Annexe C) :

$$ETP \cdot S = ETR \quad (6)$$

4.2.6 Stock

Pour l'analyse du stock d'eau souterrain, les chroniques piézométriques ont été collectées sur les sites Piézométrie Wallonie et Databank Ondergrond Vlaanderen.

Donnée	Source	Extension temporelle	Résolution temporelle	Unité
Piézométrie	Piézométrie Wallonie	Variable	Journalière	m par rapport au niveau de la mer
Piézométrie	DOV	Variable (1994 -)	Journalière	cm par rapport au niveau du sol

4.2.6.1 Variation du stock

Pour quantifier les variations de stock d'eau souterraine, il est nécessaire d'estimer la porosité du sol. En effet, lorsque le niveau de la nappe varie, le volume d'eau correspondant n'équivaut pas à 100% de la variation de hauteur observée, car la masse d'eau souterraine évolue au sein d'un milieu poreux où l'eau occupe uniquement les vides entre les particules solides. Des valeurs de porosité doivent donc être attribuées à chaque piézomètre du BV. La

méthodologie adoptée pour estimer ces valeurs de porosité diffère pour les puits wallons et flamands. Pour les piézomètres wallons, les étapes suivantes ont été mises en place :

- a) Identification de la masse d'eau dans laquelle se situe le piézomètre
- b) Détermination des unités hydrogéologiques présentes dans cette masse d'eau
- c) Recherche dans la littérature des valeurs de porosité associées à ces unités hydrogéologiques (Thomas et al., 2019). Lorsqu'aucune valeur spécifique n'est disponible, l'estimation se base sur la lithologie générale de la masse d'eau.

Pour les piézomètres flamands, l'estimation se base uniquement sur la lithologie principale de la masse d'eau. Les unités hydrogéologiques sont considérées comme équitablement présentes dans la masse d'eau et parfaitement connectées (si le niveau augmente quelque part, il augmente partout sur la surface). Cette approche nous permet donc d'établir une porosité effective moyenne pour chacun des piézomètres. Les tableaux comprenant chacun des piézomètres est repris en Annexe D.

Comme pour la climate grid de l'IRM, grâce à la méthode des polygone de Voronoï et en utilisant la localisation des piézomètres, on peut associer la variation de stock d'un piézomètre à une surface et ainsi pouvoir calculer la moyenne pondérée par rapport à cette surface. Les polygones ainsi obtenus sont présenté dans la Figure 4-7.

- $n = \text{nombre de piézomètres}$

Il faut également noter que les données provenant de la DOV sont fournies en niveau relatif (par rapport au niveau du sol) et en cm. Elles ont donc dû être normalisées par rapport au niveau de la mer.

4.2.6.2 *Imputation des données piézométriques*

Dans le cadre d'analyses hydrologiques de longue durée, disposer de données complètes de stock d'eau est essentiel pour pouvoir évaluer les tendances qui peuvent se dégager, comprendre les processus de recharge et établir des stratégies de gestion des ressources en eau (Bekesi et al., 2009; Bikše et al., 2023; Vu et al., 2021). En pratique, les jeux de données hydrologiques présentent souvent des données non continues et/ou comprenant des périodes manquantes et peuvent différer dans les dates de démarrage. On retrouve en Annexe H un graphique par bassin représentant les chroniques piézométriques sur la période d'étude, les valeurs colorées étant les vraies valeurs de piézométrie. On peut très vite remarquer qu'un nombre important d'années sont discontinues et/ou complètement manquantes.

Pour pallier cela, il est possible d'interpoler linéairement mais ce n'est valable que pour des lacunes de courte durée. Au plus les lacunes augmentent au plus l'interpolation linéaire supprime la variabilité du niveau de stock. Dans ce mémoire, il a été décidé d'interpoler uniquement sur des lacunes de 10 jours maximums entre 2 valeurs. Au-delà de ce seuil, il peut être utile d'explorer d'autres techniques pour combler les lacunes temporelles présentes dans ces séries.

En Annexe E, pour le BV de la Lesse et du Viroin, les relations entre piézomètres ont été représentées graphiquement par des nuages de points, chaque graphique représentant un piézomètre en fonction d'un autre piézomètre du même bassin. Ces graphiques permettent d'évaluer si un piézomètre pourrait être estimé par un autre, ce qui nécessiterait une relation quasi-linéaire entre les deux. Ce n'est visiblement pas le cas pour la plupart des paires de piézomètres étudiées. Cependant, cette représentation permet d'apprécier visuellement les différences de dynamique entre les piézomètres lors des phases de charge et de décharge du stock. Certains piézomètres peuvent augmenter et atteindre un seuil maximal pendant que l'autre continue de monter. On voit très bien cette dynamique pour le PZ8009 du bassin du

Viroin qui présente un niveau maximal autour de 259m. Il est également observable que de nombreux piézomètres présentent des "lignes" parfois parallèles, traduisant des évolutions temporelles communes présentant une certaine corrélation, ainsi que des corrélations globales modérées perceptibles. Ces observations suggèrent le recours à des modèles de machine learning, approche qui permettrait d'exploiter ces relations observées entre les différents piézomètres.

L'exploitation de ces relations entre piézomètres est une piste explorée dans ce travail. Cela consiste à utiliser les données observées pour entraîner des modèles de machine learning spécifiquement dédiés à l'imputation de séries temporelles partiellement observées. L'outil utilisé pour cela est la bibliothèque python pyPOTS (Du, Yang, et al., 2023), qui regroupe et simplifie l'utilisation de différents algorithmes d'imputation de séries chronologiques partiellement observées (POTS = « Partially Observed Time Series »). Le modèle sélectionné pour l'imputation de données dans ce mémoire est le modèle SAITS, Self-Attention based Imputation for Time Series (Du, Cote, et al., 2023). Les hyperparamètres du modèle ont été fixés en adoptant des valeurs considérées comme raisonnables dans la littérature, selon les recommandations initiales des auteurs. L'optimisation des hyperparamètres d'un modèle de machine learning constitue une démarche complexe et chronophage en raison des temps de calcul considérables requis. Il convient également de noter que ces paramètres auraient idéalement dû être adaptés spécifiquement à chaque bassin versant, en fonction du nombre de piézomètres disponibles. Les hyperparamètres utilisés sont les suivants :

- `n_steps` = le nombre de jours
- `n_features` = le nombre de variables qu'on insère dans le temps (piézomètres + autres)
- `n_layers` = 2 (nombre de couches = « profondeur de réflexion »)
- `n_heads` = 2 (nombre de têtes d'attention parallèles)
- `d_k` = 16 (hyper-paramètre de dimension)
- `d_v` = 16 (hyper-paramètre de dimension)
- `d_model` = 32 (dimension du modèle : $d_k = d_v = d_{\text{model}} / n_{\text{heads}}$)
- `d_ffn` = 128 (dimension du réseau feed-forward : $4 \times d_{\text{model}}$)

- epochs = 1500 (nombre d'époques d'entraînement, le nombre de « passages » dans les données)

Dans ce mémoire, deux approches d'imputation ont été comparées : l'imputation des piézomètres utilisant uniquement les autres piézomètres comme variables d'entrée, et l'imputation intégrant des variables hydrologiques supplémentaires (précipitations et débit du bassin versant du piézomètre).

Afin d'évaluer la performance de l'imputation, un jeu de données filtré sur la période 2006-2024 a été constitué pour le bassin de la Lesse dont la représentation est fournie en Annexe F. Afin de simuler différentes situations de données manquantes, deux traitements distincts ont été appliqués à ce jeu de données.

Le premier traitement consiste en un écrémage aléatoire (« creamed_full »), où 70% des données ont été supprimées de manière aléatoire sur l'ensemble de la période. Cette configuration permet de comparer les performances de l'imputation par modèle SAITS avec celles de l'interpolation linéaire classique.

Le second traitement génère un jeu de données où seul un piézomètre conserve des données complètes depuis 2006, tous les autres présentant des lacunes importantes (gap_all_but_1). C'est représentatif de la plupart des jeux de données de piézomètres qui ne présentent que rarement des données avant 2000 et permet ainsi d'estimer la performance en « conditions réelles ».

Pour le jeu de données creamed_full trois approches d'imputation sont comparées à l'interpolation 1D : interpolation 10 jours suivie d'imputation par SAITS avec Q et avec P, interpolation 10 jours suivie d'imputation par SAITS sans Q et sans P et l'imputation par SAITS directement. Pour le jeu de données gap_all_but_1 quatre approches ont été comparées toujours commençant par une interpolation 1D de 10 jours maximum : avec Q et avec P, avec Q, avec P, sans Q et sans P. Grâce aux données initiales non filtrées plusieurs indicateurs de performance ont pu être calculés : l'erreur absolue moyenne (Mean Absolute Error – MAE), la racine de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square of Error - RMSE) et l'erreur maximale absolue (Maximum Absolute Error – MAX AE) et sont repris et discutés dans la section performance de l'imputation.

Avec davantage de temps disponible, plusieurs méthodes d'optimisation de l'imputation en plus de l'optimisation des hyperparamètres auraient pu être explorées. Par exemple, l'utilisation de données de précipitation plus localisées autour de chaque piézomètre, plutôt qu'une moyenne à l'échelle du bassin versant. De même, l'établissement de regroupements de piézomètres présentant des comportements similaires pourrait permettre d'améliorer les performances du modèle en optimisant l'utilisation des corrélations spatiales entre piézomètres aux dynamiques comparables. En d'autres mots, la qualité des données d'entrée peut faire varier la qualité des résultats obtenus.

Les séries chronologiques avec valeurs imputées en gris de chaque bassin sont présentées en Annexe H.

4.3 Tests de tendances

L'ensemble des variables hydrologiques (à l'exception de la cote piézométrique) et leurs combinaisons est donc été regroupé en un seul tableau journalier commun couvrant l'entièreté de la période d'étude. Afin de mieux pouvoir interpréter les bilans hydrologiques annuels, des tests de tendances ont dû être effectués.

A partir du tableau journalier, des agrégations ont été construites selon différentes échelles temporelles : annuelle (hydrologique), bisannuelle (de octobre à mars), saisonnière (octobre à décembre, janvier à mars, avril à juin, juillet à septembre) et mensuelle. Les valeurs journalières sont d'abord extraites pour la période d'intérêt, ensuite des statistiques descriptives sont appliquée annuellement sur ces agrégations (moyenne, variance, q10, q95). Concrètement, pour l'été par exemple, l'algorithme extrait toutes les valeurs journalières des mois d'été pour chaque année hydrologique de la période d'étude (1984-2024). Sur ce sous-ensemble de données, les quatre statistiques sont calculées annuellement. Cette procédure génère donc quatre séries temporelles annuelles de 40 valeurs, chaque série caractérisant la variation du comportement estival selon une statistique différente.

Pour évaluer cette variation, le test de Mann-Kendall a été utilisé (Kendall, M.G., 1948; Sen, 1968). Le test de Mann-Kendall est un test non paramétrique qui évalue la présence d'une tendance monotone en comparant les paires de valeurs ordonnées dans le temps. Concrètement, sur un échantillon de taille n , pour chaque paire (x_i, x_j) avec $i < j$ on calcule :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe} (x_i - x_j) \quad (8)$$

La statistique S correspond donc à la somme de toutes les comparaisons de paires de valeurs. Une valeur positive suggère une tendance à la hausse et une valeur négative une tendance à la baisse. Pour évaluer la significativité de cette tendance, il est nécessaire de normaliser la statistique S selon une distribution normale standard afin de déterminer la p -valeur associée.

Pour quantifier les tendances, les pentes de Theil-Sen sont calculées (Alexander, 2016; Sen, 1968). La pente de Theil-Sen est une méthode, robuste aux années exceptionnelles, qui calcule la pente de la tendance en déterminant la médiane de toutes les pentes individuelles calculées entre chaque paire de points de la série temporelle.

Il est important de souligner que l'autocorrélation temporelle représente un biais potentiel dans l'analyse de séries temporelles hydrologiques. En l'absence de test d'autocorrélation dans cette étude, il convient d'interpréter les tendances identifiées avec la prudence requise. Toutefois, la comparaison simultanée de plusieurs variables hydrologiques offre une capacité d'analyse critique : l'identification de tendances incohérentes entre variables corrélées physiquement constitue un indicateur potentiel de biais et permet d'affiner l'interprétation des résultats.

Chapitre 5 : Résultats et discussions

5.1 Performance de l'imputation

Afin de pouvoir valider l'utilisation des données complétées par machine learning, les jeux de données fictifs, `creamed_full` (70% de données artificiellement manquantes) et `gap_all_but_1` (données artificiellement manquantes pour tous les piézomètres sauf un de 2006 à 2014) ont été utilisés permettant la comparaison entre les données imputées par le modèle de machine learning utilisé (SAITS) et les vraies valeurs.

Ces jeux de données sont visualisables en Annexe F. Les comparaisons entre l'interpolation 1D et l'imputation par SAITS ont été exprimées en termes de diminution ou augmentation relative par rapport à l'interpolation 1D et sont présentées dans le Tableau suivant.

Tableau 7 : Comparaison des méthodes d'imputation pour le jeu de données "creamed full"

Méthode d'imputation comparée à l'interpolation valeur en % d'augmentation ou diminution par rapport à l'interpolation linéaire	Erreurs période : 2006-2024		Erreurs période : 2006-2010	
	Erreur moyenne absolue (MAE)	RMSE	Erreur moyenne absolue (MAE)	RMSE
Interp. 10jours+SAITS avec Q avec P	-1,3%	-2,4%	-10,4%	-8,4%
Interp. 10Jours+SAITS sans Q sans P	-1,4%	-1,7%	-10,6%	-7,3%
SAITS seul sans Q sans P	+228%	+75%	-25%	-27,6%

Des améliorations de MAE, RMSE ont été observées pour toutes les variantes sauf pour l'utilisation du modèle seul. Cela confirme que l'interpolation de trous de relativement courte durée est préférable à l'imputation. Lorsqu'on combine l'interpolation de courte durée au machine learning, on observe des diminutions de MAE et de RMSE. L'imputation est encore améliorée par l'ajout d'autres variables en plus des chroniques piézométriques.

Le Tableau 8 présente les erreurs de l'imputation des données sur le jeu de données `gap_all_but1` sur les données imputées. Les résultats montrent de manière évidente que rajouter les valeurs de débit (Q) dans les données d'entraînement des modèles améliore significativement la qualité de l'imputation c'est moins clair pour les précipitations (P).

Tableau 8 : Comparaison de l'erreur d'imputation en fonction des données, pour le jeu de données "gap_all_but_1"

Unité : m	Erreur sur l'imputation des données piézo sur la période : 2006-2010
-----------	--

données d'entraînement utilisées	Erreur moyenne absolue MAE	RMSE	MAX AE
Hauteur	2,27	3,06	11
Hauteur + Q	1,84	2,51	11,38
Hauteur + P	2,3	3,1	11,04
Hauteur + P + Q	1,83	2,51	10,13

En Annexe G, les jeux de données de validation imputés sont présentés. On peut apprécier visuellement que l'ajout de variables en plus (Q, P ou les deux) semblent permettre de mieux capturer certaines dynamiques des piézomètres même si quantitativement parlant, P n'améliore pas le modèle. Les chroniques brutes et imputées de chaque bassin sont présentées En Annexe H.

5.2 Choix du produit d'évapotranspiration

Trois produits d'évapotranspiration ont été téléchargés afin de pouvoir les comparer et décider lequel semble le plus opportun pour les bilans. Ils seront comparés de deux manières. Premièrement, afin d'estimer les coefficients culturaux, les ETP seront représentées graphiquement contre l'ET0 estimée par l'IRM, pour les mois d'été et d'hiver. Ensuite, les séries chronologiques annuelles seront générées pour évaluer la concordance entre les produits.

Sur la Figure 5-1, les coefficients culturaux de 2 bassins ont été comparés pour l'été (juin, juillet, août) et l'hiver (décembre, janvier, février). Pour MODIS, un lissage des valeurs extrêmes est observé résultant de la période de 8 jours sur laquelle MODIS est moyenné. En ce qui concerne les coefficients culturaux, MODIS semble évaluer correctement la dépendance

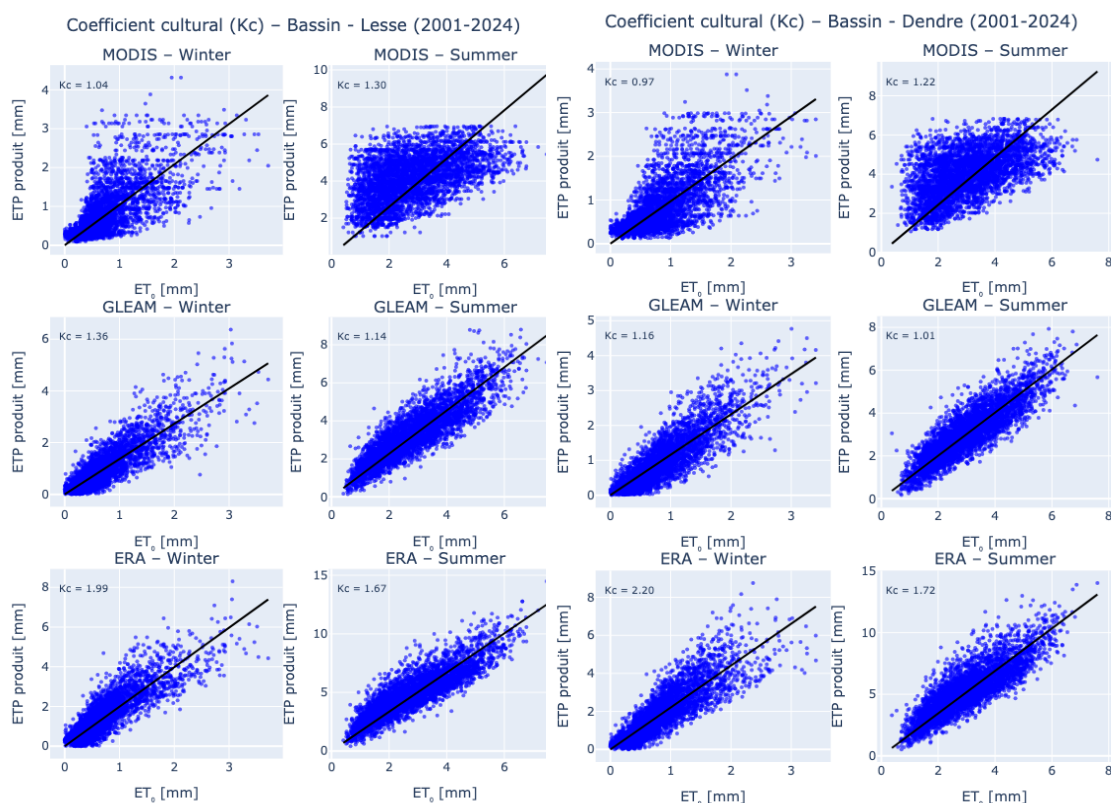


Figure 5-1 : Comparaison des coefficients culturaux pour les différents produits d'ET sur les bassins de la Lesse et de la Dendre (été : juin, juillet)

saisonnaire avec un Kc plus élevé en été. Les produits ERA5-Land et GLEAM ont une relation plus linéaire avec l'ET_o. Ceci est en partie expliqué par leur résolution journalière. ERA5-Land semble surestimer largement l'ETP en été comme en hiver. GLEAM semble surestimer l'ETP en hiver et la sous-estimer en été (surtout pour le bassin de la Dendre).

Les Figure 5-3 et Figure 5-2 nous présentent les produits d'ET agrégés annuellement. La

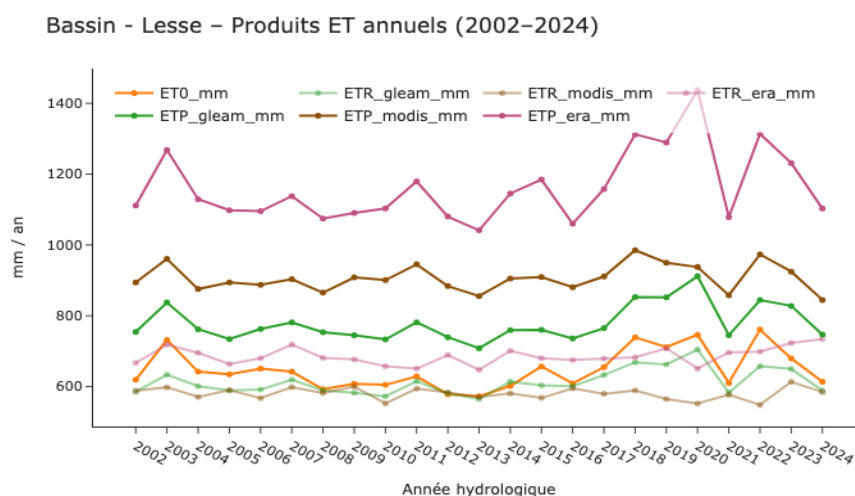


Figure 5-3 : Comparaison des chroniques annuelles d'évapotranspiration pour le bassin de la Lesse issues de quatre produits : ETO de référence, GLEAM v4.2a, MODIS16A et ERA5-Land. Les données sont exprimées en lame d'eau annuelle (mm/an) sur la période 2002-2024

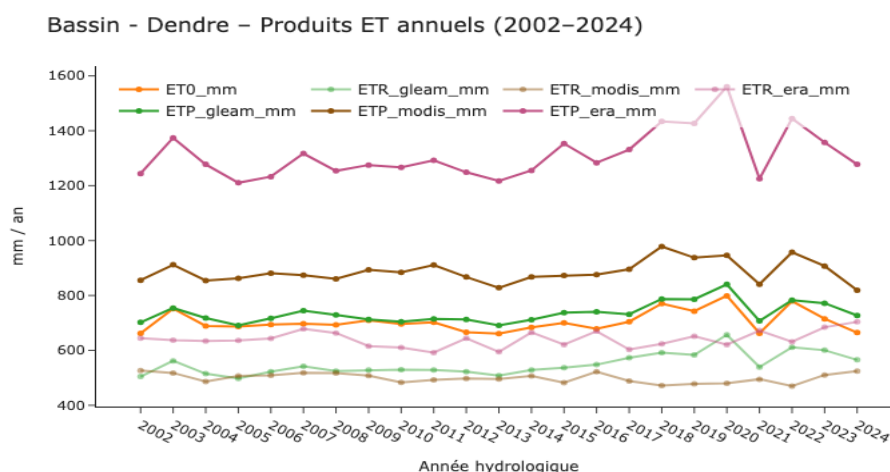


Figure 5-2 : Comparaison des chroniques annuelles d'évapotranspiration pour le bassin de la Dendre issues de quatre produits : ETO de référence, GLEAM v4.2a, MODIS16A et ERA5-Land. Les données sont exprimées en lame d'eau annuelle (mm/an) sur la période 2002-2024

surestimation systématique de l'ETP d'ERA5-Land semble se confirmer. Cette surestimation se traduit également dans l'estimation de l'ETR. Les produits GLEAM et MODIS fournissent toujours une ETR plus faible que celle d'ERA5-Land. L'ETP annuelle estimée par GLEAM sur le bassin de la Dendre concorde avec les problèmes évoqués ci-dessus. Si effectivement l'ETP est sous-estimée en été, l'ETP annuelle sera beaucoup plus proche de l'ETO. En Annexe I, on remarque que cette tendance est valable pour le bassin de la Dyle et de la Demer également.

En termes de résolution, MODIS présente la meilleure résolution mais n'est pas disponible sur l'entièreté de la période d'étude. La Figure 5-4 illustre la distribution spatiale de l'évapotranspiration réelle totale pour l'année 2020 selon le produit GLEAMv4.2a. L'examen de cette carte confirme qu'on peut considérer la résolution de ce produit comme appropriée au vu de la taille des BV étudiés dans ce mémoire.

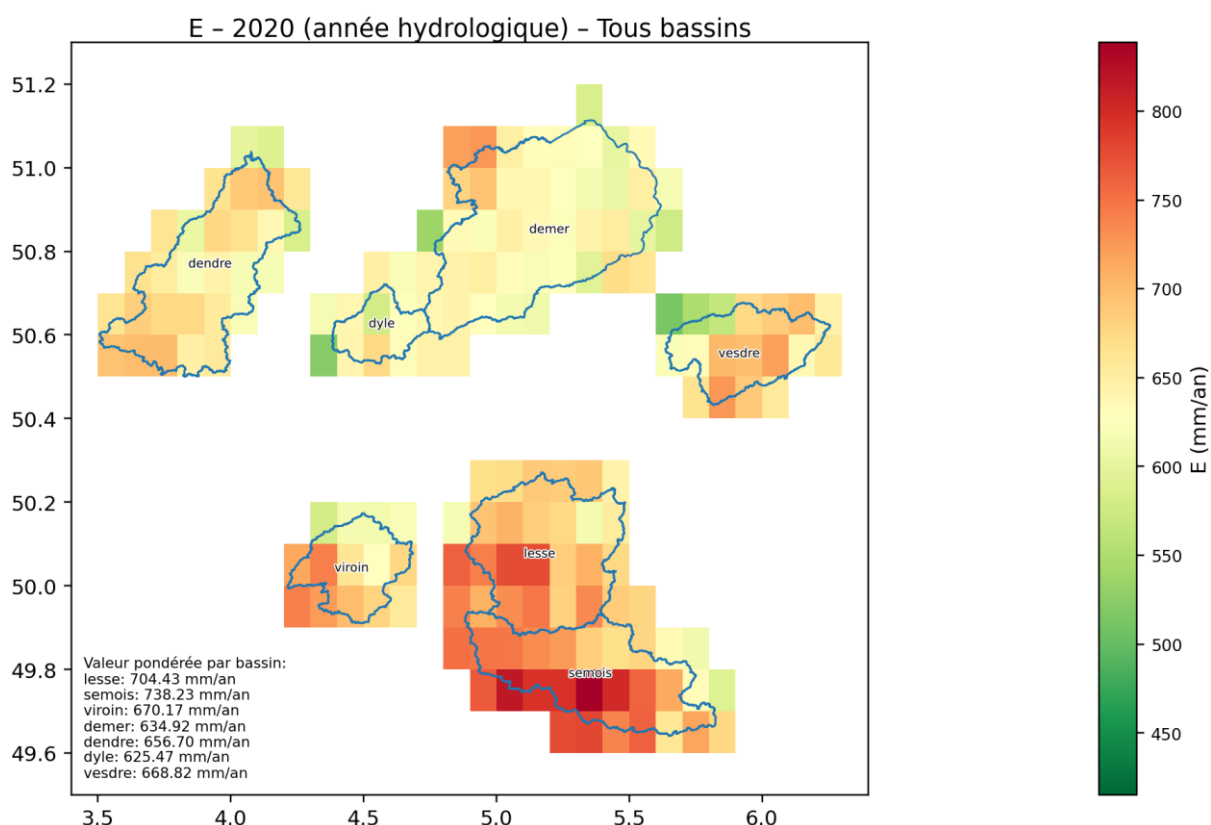


Figure 5-4 : Évapotranspiration réelle annuelle en 2020 (année la plus évapotranpirante sur les 40 années tous bassins confondus) estimée par GLEAMv4.2a. L'extraction des données et les calculs d'aire d'influence ont été réalisés sur python à l'aide du module pyproj.geod

Chacun des produits d'évapotranspiration présente des limitations spécifiques. Le choix s'est porté sur GLEAM en raison de sa disponibilité sur l'ensemble de la période d'étude et de ses estimations d'ETR plus concordantes avec celles de MODIS et l'ET0 au niveau annuel. Cette sélection a été maintenue malgré les biais observés au niveau des bassins du district de l'Escaut en été et les problèmes issus de la littérature (surestimation du cycle saisonnier).

5.3 Comparaisons interbassins variable par variable

Pour comparer les bassins entre eux, des tests de tendances ont été réalisés comme expliqué dans la section 4.3. Étant donné le nombre conséquent d'échantillons utilisés pour les tests et calculs de pentes (plus de 4000 au total), ces résultats sont présentés dans des

tableaux récapitulatifs. Vous pouvez retrouver en Annexe M un lien Zenodo sur lequel un fichier zip contenant toutes les régression et bilans est téléchargeable.

Pour la présentation des résultats de test, une structure pyramidale a été choisie. Les agrégations temporelles les plus larges commençant en haut (AH, bisannuel), pour descendre progressivement vers les agrégations temporelles plus fine (saisons et puis mois). Chaque case contient la pente de la régression estimée par la méthode de Theil-Sen ainsi que la p-valeur associée au test de MK. Pour orienter plus facilement la lecture, les cases ont été coloriées selon leur niveau de significativité. Afin de regrouper les bassins du district de la Meuse et de l'Escaut l'ordre des bassins a été défini comme suit : Lesse, Viroin, Semois, Vesdre, Demer, Dendre et Dyle. En Annexe K, des tableaux de valeurs de références pour le début de la période, obtenus en calculant l'intercept de la pente de Theil-Sen avec la première année de la période, sont présentés. L'objectif est d'avoir une année représentative (qui fait office de « valeur de référence ») du début de la période pour estimer facilement l'ordre de grandeur de la variation (en %). Les variations relatives présentées dans cette section sont toujours sur la totalité de la période.

$$Variation\ relative\ (\%/durée) = \frac{pente \times durée\ en\ années}{référence} \times 100 \quad (9)$$

Dans cette section les tendances identifiées seront mises en relation les unes avec les autres pour mieux comprendre les interactions. Lorsque des tendances générales sont identifiées certains chiffres peuvent être développés. Ces chiffres sont des ordres de grandeur. Le détail des chiffres par bassin peut être calculé avec les pentes des tests et les valeurs de références reprises dans l'Annexe K.

5.3.1 Évapotranspiration réelle (ETR)

5.3.1.1 Moyenne

Test Mann-Kendall – ETR_gleam_mm (agrég. mean)

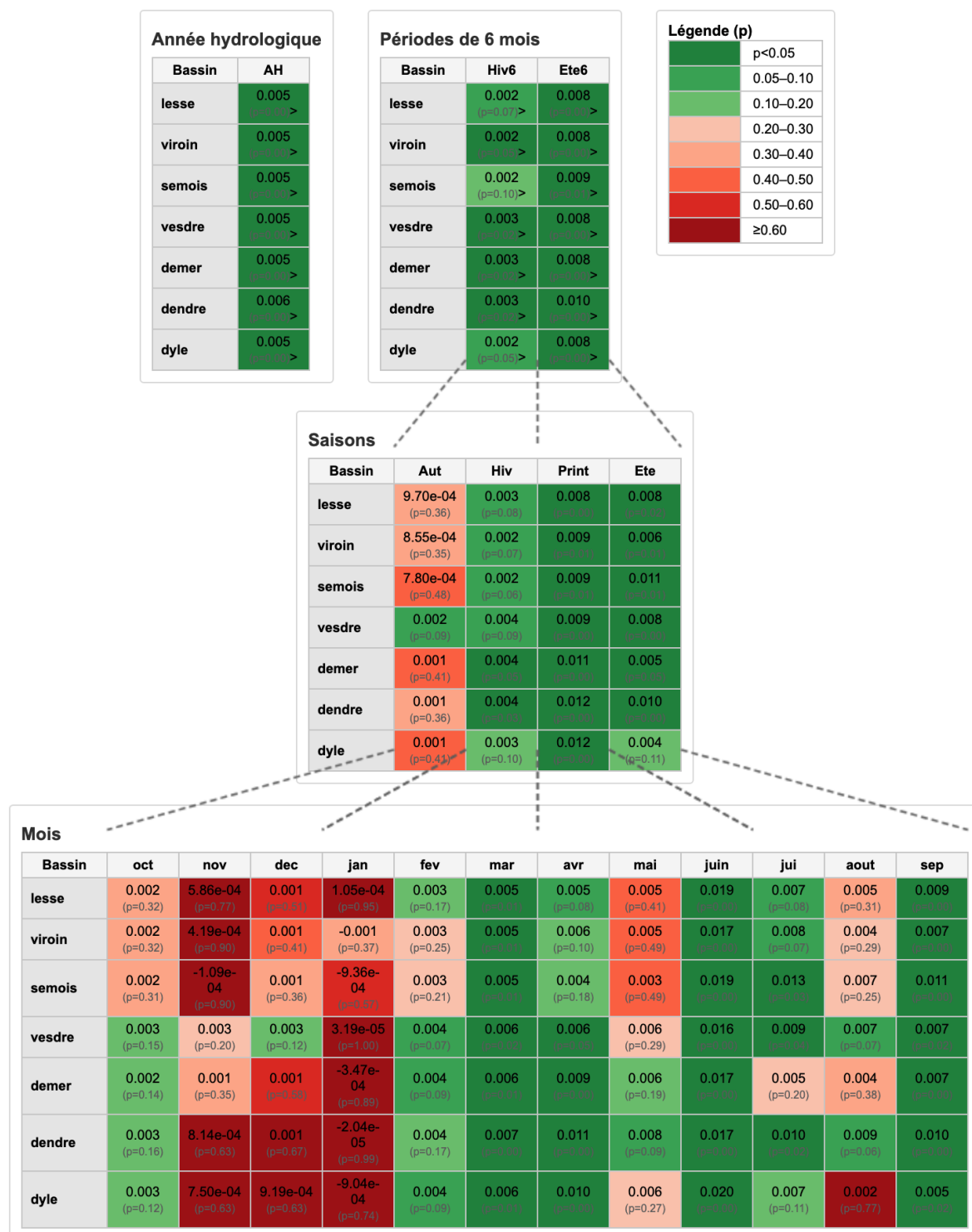


Figure 5-5 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière de l'évapotranspiration réelle (ETR_gleam_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

On remarque une tendance généralisée de l'augmentation de l'ETR pour tous les bassins ce qui concorde avec l'augmentation de température due au changement climatique (IRM, 2020b). Cette augmentation est très significative sur tous les bassins durant les mois de mars, juin et septembre. La pente est plus marquée en juin. Ces observations sont confirmées par le produit ERA5-Land (voir Figure 7-27, page 110). Cependant, l'intensité des tendances varie en fonction du produit. GLEAM présente des pentes plus élevées qu'ERA5-Land pour les mois d'avril et juin, tandis qu'ERA5-Land affiche des pentes supérieures à GLEAM en mars. Cette augmentation de l'ETR en mars peut être expliquée par un développement accéléré des plantes au début du printemps ainsi qu'une disponibilité en eau encore satisfaisante à cette période (Bauwens et al., 2011, 2013; Tabari et al., 2015). L'ETR atteint donc son niveau maximum plus tôt dans la saison. Les deux produits ont des tendances similaires en septembre. À l'échelle annuelle, les deux produits s'accordent sur une augmentation significative de l'ETR. Pour donner des ordres de grandeurs : En 40 ans, l'ETR annuelle a augmenté d'environ 60mm (+10%), l'ETR en septembre a augmenté d'environ 8mm (+15-20%) et l'ETR en mars d'au moins 5mm (+15%).

5.3.1.2 Variance

Au niveau de l'année hydrologique (voir Figure 7-28, page 111), la variance a augmenté de manière significative pour l'ensemble des bassins étudiés. Cette augmentation se traduit principalement par une hausse de la variance en septembre pour tous les bassins versants. Selon l'IRM, le mois de septembre se caractérise par des températures contrastées (IRM, 2020a), se traduisant par des journées chaudes et des journées froides sur le même mois. L'augmentation de la variance de l'ETR en septembre pourrait donc indiquer un renforcement de ce comportement. Les tests sur les quantiles sont disponibles page 112.

5.3.2 Évapotranspiration potentielle (ETP)

5.3.2.1 Moyenne

Test Mann-Kendall – ETP_gleam_mm (agrég. mean)

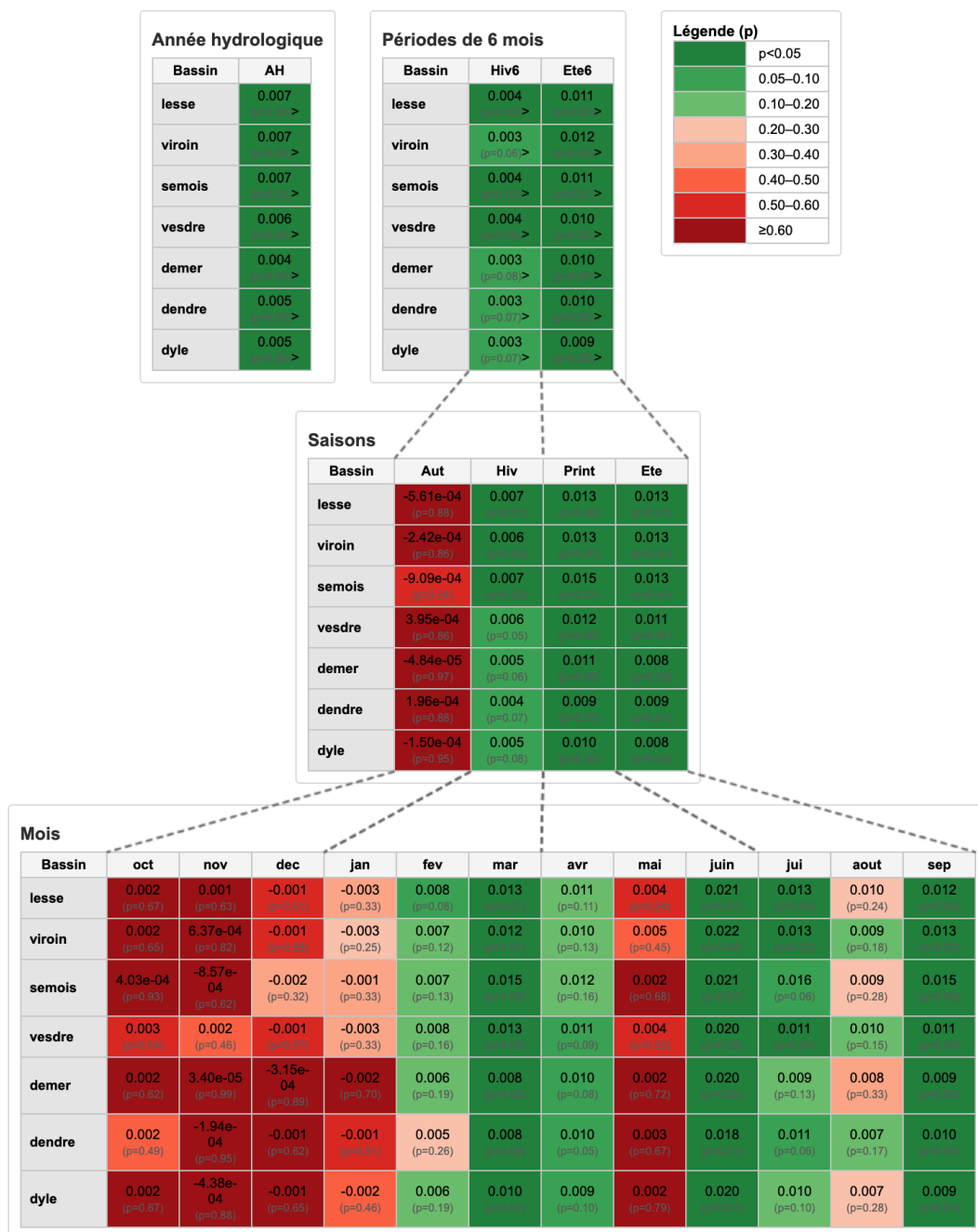


Figure 5-6 — Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière de l'évapotranspiration potentielle (ETP_gleam_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

L'ETP présente les mêmes tendances générales que l'ETR à l'échelle annuelle, avec des augmentations particulièrement significatives en mars, juin et septembre pour les deux produits (ERA5-Land voir Figure 7-30, page 113).

L'analyse des valeurs de référence (voir Annexe K) révèle des divergences notables entre GLEAM et ERA5-Land. En mars, GLEAM indique que l'ETR augmente davantage que l'ETP pour les bassins du district de l'Escaut alors qu'ERA5-Land estime une augmentation de l'ETR proportionnelle à l'ETP. En avril et en juin, ERA5-Land estime une augmentation de l'ETP supérieure à l'augmentation de l'ETR. GLEAM estime l'inverse pour tous les bassins en avril et uniquement pour les bassins de l'Escaut en juin. Ces constats semblent confirmer l'hypothèse formulée dans la section 5.2 selon laquelle GLEAM sous-estime l'ETP estivale, particulièrement pour les BV de l'Escaut. Même constat lorsqu'on compare les ETR et ETP annuelle des BV du district de l'Escaut.

Comme pour l'ETR, les deux produits s'accordent sur une augmentation significative de l'ETP annuelle de l'ordre de 10% sur la période d'étude. Les deux produits semblent également s'accorder sur le mois de septembre. Pour ERA5, en septembre, la demande évaporative a augmenté d'environ 20% pour les BV du district de l'Escaut et d'environ 25% pour ceux de la Meuse. GLEAM présente une variation similaire avec une augmentation de même ampleur pour les bassins du district de l'Escaut (environ 20%), de 24% pour la Vesdre et de 25 à 30% pour les autres bassins du district de la Meuse. Quantitativement parlant, selon GLEAM, l'augmentation de la demande évaporative en septembre est de 11 à 18mm.

5.3.2.2 Variance

Les deux produits s'accordent sur une augmentation très significative de la variance en septembre pour les bassins du district de la Meuse (Figure 7-31, Figure 7-32, page 114).

5.3.3 ETO

5.3.3.1 Moyenne

Des tendances sont observées pour les mois de mars juin et septembre également (voir Figure 7-34, page 117).

5.3.3.2 Variance

La variance de l'ET0 en septembre présente la même tendance d'augmentation que celles observées pour l'ETR et l'ETP, confirmant ainsi la cohérence des résultats obtenus pour ce mois (Figure 7-35, page 118).

5.3.4 Stress hydrique

5.3.4.1 Moyenne

Test Mann-Kendall – S_gleam_model (agrég. mean)

Mois												
Bassin	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	4.76e-06 (p=0.99)	6.85e-04 (p=0.45)	9.65e-04 (p=0.20)	0.001 (p=0.24)	-0.001 (p=0.17)	-0.002 (p=0.10)	-6.71e-04 (p=0.33)	5.44e-04 (p=0.31)	-5.39e-04 (p=0.22)	-9.48e-04 (p=0.02)	-5.88e-04 (p=0.15)	-0.001 (p=0.11)
viroin	-2.44e-05 (p=0.93)	7.37e-04 (p=0.26)	0.001 (p=0.20)	7.48e-04 (p=0.41)	-3.33e-04 (p=0.71)	-0.001 (p=0.09)	-4.70e-04 (p=0.49)	2.67e-04 (p=0.80)	-6.08e-04 (p=0.35)	-0.001 (p=0.22)	-0.001 (p=0.06)	-0.001 (p=0.10)
semois	4.02e-04 (p=0.21)	6.47e-04 (p=0.38)	0.002 (p=0.97)	8.26e-04 (p=0.49)	-9.10e-04 (p=0.38)	-0.003 (p=0.02)	-9.67e-04 (p=0.13)	2.90e-04 (p=0.81)	-3.56e-04 (p=0.21)	-2.90e-04 (p=0.40)	-8.12e-05 (p=0.87)	-1.88e-04 (p=0.77)
vesdre	4.14e-04 (p=0.60)	8.67e-04 (p=0.25)	0.002 (p=0.98)	0.001 (p=0.15)	-1.33e-04 (p=0.95)	-0.001 (p=0.10)	-4.88e-04 (p=0.48)	8.34e-04 (p=0.07)	-5.08e-04 (p=0.35)	-7.60e-05 (p=0.77)	3.66e-05 (p=0.88)	-8.37e-04 (p=0.17)
demer	0.001 (p=0.23)	9.85e-04 (p=0.98)	0.001 (p=0.95)	6.90e-04 (p=0.11)	4.72e-04 (p=0.67)	1.78e-05 (p=0.97)	0.001 (p=0.32)	0.002 (p=0.30)	3.78e-04 (p=0.37)	-3.51e-04 (p=0.41)	2.12e-04 (p=0.79)	1.90e-04 (p=0.82)
dendre	0.001 (p=0.11)	9.58e-04 (p=0.98)	0.001 (p=0.90)	7.65e-04 (p=0.12)	8.45e-04 (p=0.22)	4.16e-04 (p=0.14)	0.001 (p=0.30)	0.002 (p=0.30)	0.001 (p=0.30)	9.83e-04 (p=0.02)	0.001 (p=0.11)	0.001 (p=0.02)
dyle	0.001 (p=0.02)	8.06e-04 (p=0.35)	0.001 (p=0.02)	3.68e-04 (p=0.62)	6.47e-04 (p=0.30)	-4.68e-05 (p=0.98)	0.002 (p=0.02)	0.002 (p=0.02)	0.001 (p=0.06)	-2.74e-04 (p=0.47)	-8.24e-04 (p=0.11)	-5.73e-04 (p=0.48)

Test Mann-Kendall – StressHydrique_era (agrég. mean)

Mois												
Bassin	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	8.84e-04 (p=0.27)	0.002 (p=0.14)	0.003 (p=0.02)	0.001 (p=0.35)	0.002 (p=0.23)	-1.16e-04 (p=0.82)	-0.001 (p=0.14)	-2.54e-04 (p=0.68)	-0.001 (p=0.26)	-0.001 (p=0.32)	0.001 (p=0.38)	-1.94e-04 (p=0.78)
viroin	8.28e-04 (p=0.28)	0.001 (p=0.28)	0.003 (p=0.08)	8.16e-04 (p=0.57)	0.002 (p=0.18)	-7.65e-06 (p=0.99)	-0.001 (p=0.19)	-3.89e-05 (p=0.93)	-0.001 (p=0.15)	-0.001 (p=0.37)	5.48e-04 (p=0.72)	-2.82e-04 (p=0.77)
semois	8.14e-04 (p=0.35)	0.002 (p=0.11)	0.002 (p=0.08)	0.001 (p=0.12)	0.002 (p=0.11)	-3.62e-04 (p=0.70)	-0.001 (p=0.22)	-2.40e-04 (p=0.72)	-0.001 (p=0.27)	-0.001 (p=0.41)	9.00e-04 (p=0.48)	-4.99e-04 (p=0.57)
vesdre	2.70e-04 (p=0.77)	0.001 (p=0.25)	0.002 (p=0.13)	0.002 (p=0.19)	2.34e-04 (p=0.81)	-4.77e-04 (p=0.02)	-0.001 (p=0.08)	-1.22e-04 (p=0.88)	-0.002 (p=0.06)	-0.002 (p=0.27)	0.001 (p=0.30)	-5.35e-04 (p=0.54)
demer	7.51e-04 (p=0.26)	0.001 (p=0.12)	0.001 (p=0.10)	0.002 (p=0.06)	0.002 (p=0.02)	-4.58e-06 (p=0.99)	-0.001 (p=0.08)	-2.51e-04 (p=0.65)	-0.002 (p=0.13)	-4.19e-04 (p=0.72)	0.001 (p=0.31)	4.76e-04 (p=0.58)
dendre	0.001 (p=0.13)	0.001 (p=0.17)	0.001 (p=0.29)	0.002 (p=0.06)	0.001 (p=0.12)	-1.45e-04 (p=0.88)	-0.001 (p=0.12)	-8.00e-05 (p=0.89)	-8.10e-04 (p=0.42)	-0.002 (p=0.26)	0.001 (p=0.51)	2.81e-04 (p=0.84)
dyle	9.31e-04 (p=0.16)	0.001 (p=0.13)	0.002 (p=0.15)	0.002 (p=0.07)	0.002 (p=0.12)	1.03e-05 (p=1.00)	-0.001 (p=0.08)	-2.56e-04 (p=0.70)	-8.96e-04 (p=0.27)	-0.001 (p=0.45)	0.001 (p=0.41)	4.16e-04 (p=0.68)

Figure 5-7 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière du stress hydrique (S_gleam_model et StressHydrique_era) pour chaque bassin, l'agrégation mensuelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Comme attendu, GLEAM estime une diminution du stress hydrique pour les bassins de la Dendre, de la Demer et de la Dyle en avril, mai et juin, résultat vraisemblablement biaisé pour les raisons évoquées dans les sections précédentes. La comparaison avec les données de précipitations permettra de confirmer ou infirmer cette hypothèse. En avril, les estimations d'ERA5-Land montrent une augmentation du stress hydrique à différents niveaux de significativité. En décembre, les deux produits convergent sur une diminution du stress hydrique à différents niveaux de significativité.

5.3.5 Précipitations (P)

5.3.5.1 Moyenne

Test Mann-Kendall – P_mm (agrég. mean)

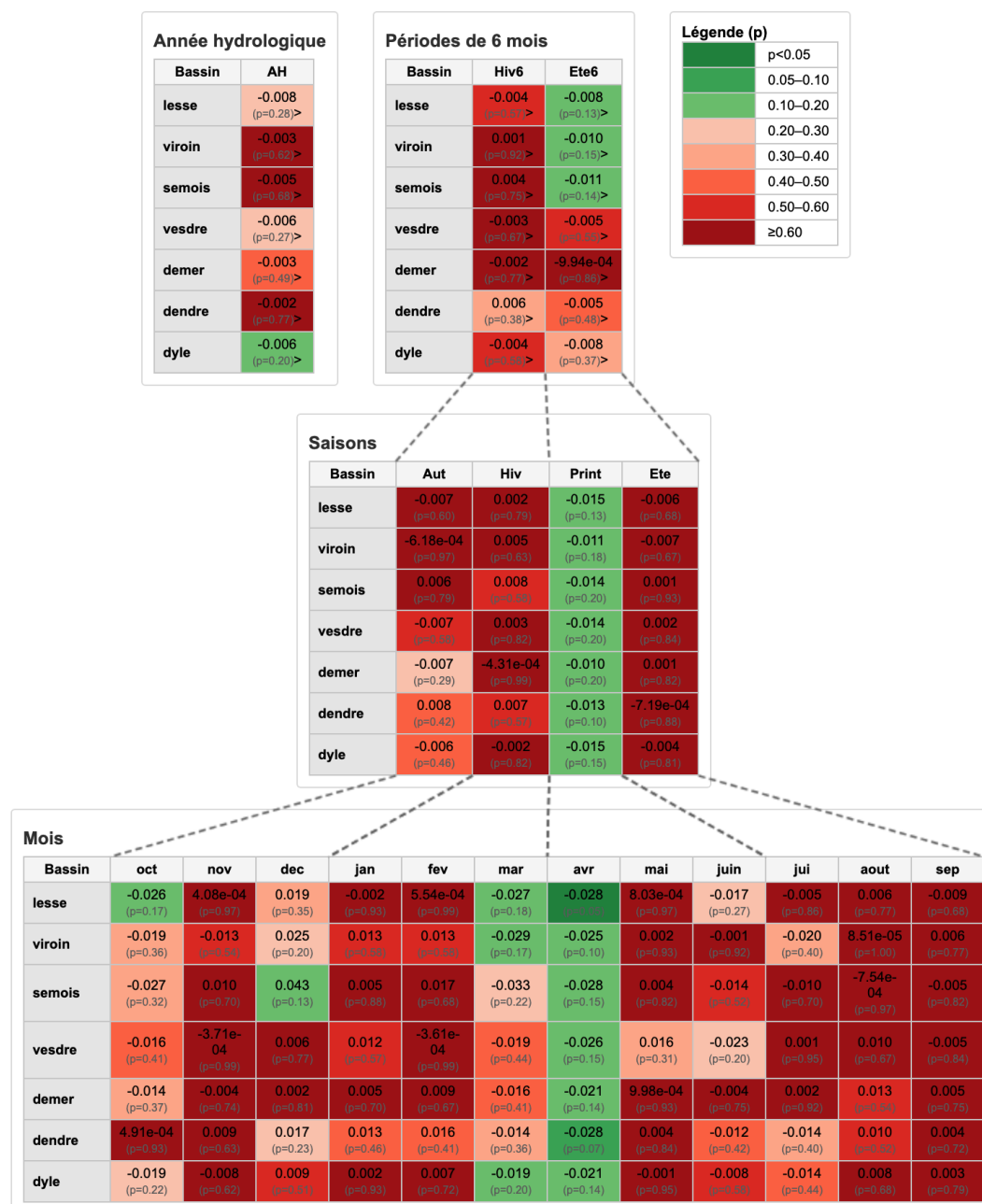


Figure 5-8 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière des précipitations (P_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Une tendance générale, à la baisse des précipitations en avril est observée pour l'ensemble des bassins, avec différents degrés de significativité. Cette diminution confirme l'hypothèse selon laquelle GLEAM estime incorrectement le stress hydrique en avril (et

probablement aussi en mai et en juin) en raison d'une sous-estimation de l'ETP et d'une possible surestimation de l'ETR. Ceci valide l'augmentation du stress estimée par ERA5-Land en avril.

Selon l'IRM, avril est le mois le moins pluvieux de l'année (*IRM - Avril*, s. d.). Les résultats montrent qu'il l'est encore moins qu'avant : sur 40 ans, les précipitations d'avril ont diminué entre 25 et 34 mm au total, représentant une baisse d'entre 40 et 50% selon les bassins versants.

Deux tendances faiblement significatives de baisse des précipitations sont également identifiées pour les bassins de la Lesse et du Viroin en mars. Cela suggère que GLEAM pourrait correctement estimer l'augmentation du stress hydrique pour ces bassins durant ce mois.

5.3.5.2 Variance

Test Mann-Kendall – P_mm (agrég. var)

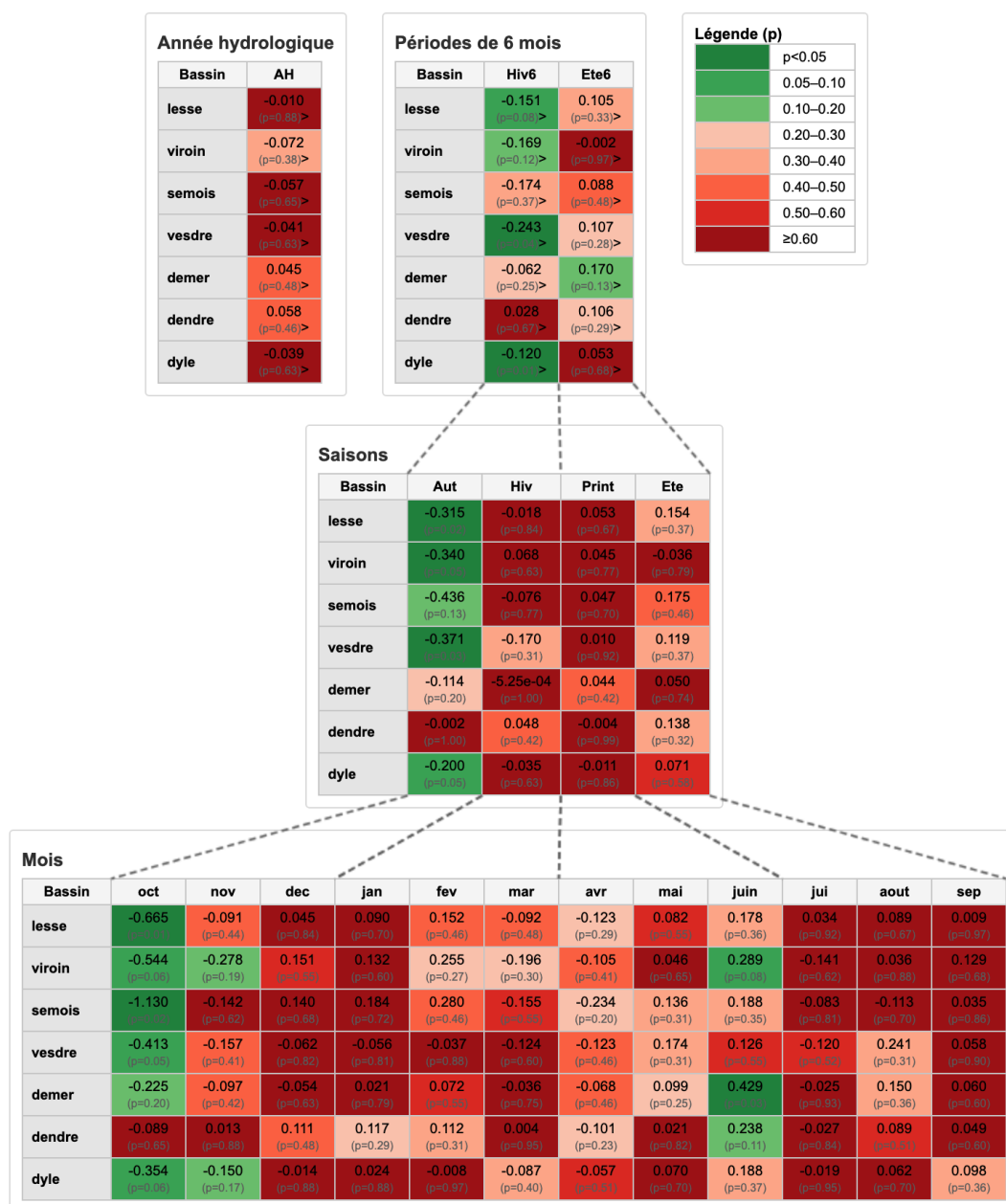


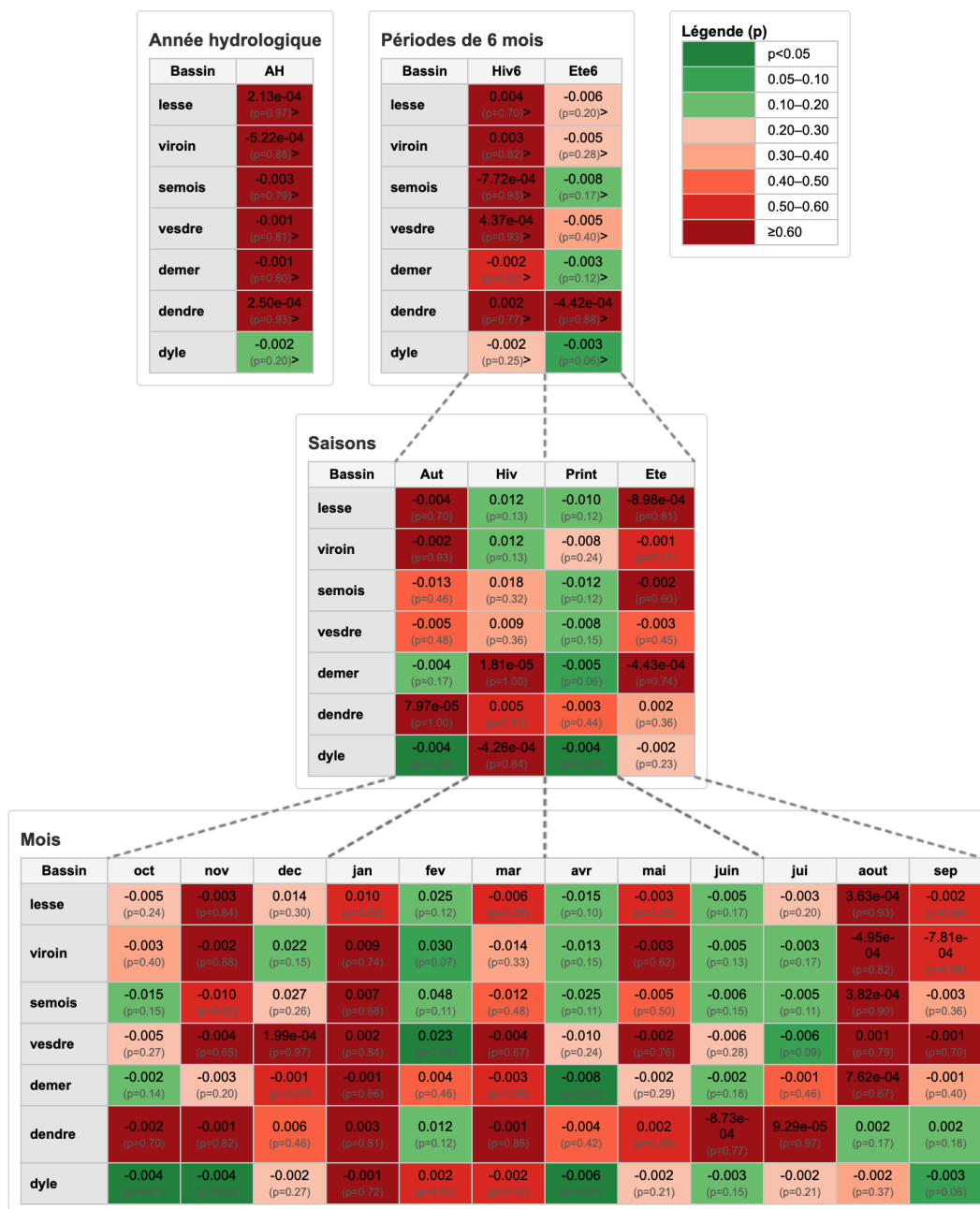
Figure 5-9 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la variance des précipitations (P_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

On observe une diminution de la variance des précipitations en octobre pour tous les bassins sauf pour la Dendre. Parallèlement, en automne, on observe une réduction des événements pluvieux extrêmes (q95) et une augmentation des précipitations faibles (q10). Cela suggère une évolution vers des précipitations constantes d'intensité plus homogène.

5.3.6 Débit (Q)

5.3.6.1 Moyenne

Test Mann-Kendall – Q_mm (agrég. mean)



Une augmentation des débits est observée en février pour les bassins du district de la Meuse, avec différents niveaux de significativité. À l'inverse, les débits diminuent significativement en avril pour la Demer et la Dyle, ainsi que de manière moins significative pour la Semois, le Viroin et la Lesse. Cette diminution des débits d'avril concorde avec la baisse des précipitations observée pour ce mois.

Quantitativement, la diminution des débits d'avril atteint 9,5 mm pour la Demer et 7,2 mm pour la Dyle. Compte tenu de la diminution des précipitations de 25 mm pour ces bassins durant ce mois, il apparaît que les débits diminuent proportionnellement moins que les précipitations. Cette observation suggère qu'un effet de compensation intervient, vraisemblablement lié au stock d'eau accumulé durant la période hivernale qui atténue partiellement l'impact de la baisse des précipitations et de l'augmentation de l'ETR sur les débits.

5.3.6.2 *Variance*

Comme pour les précipitations, la variance diminue en octobre à différents niveaux de significativité sauf pour la Demer.

Une baisse de 20 à 30% des débits d'étiage (q_{10}) est observable au printemps pour les BV de la Demer, Dyle, Lesse, Semois et Vesdre avec des niveaux de significativité décroissants respectivement. On observe également une baisse des débits d'étiage au niveau annuel pour l'entièreté des BV.

5.3.7 P-ETR

5.3.7.1 Moyenne

Test Mann-Kendall – P_minus_ETR_gleam (agrég. mean)

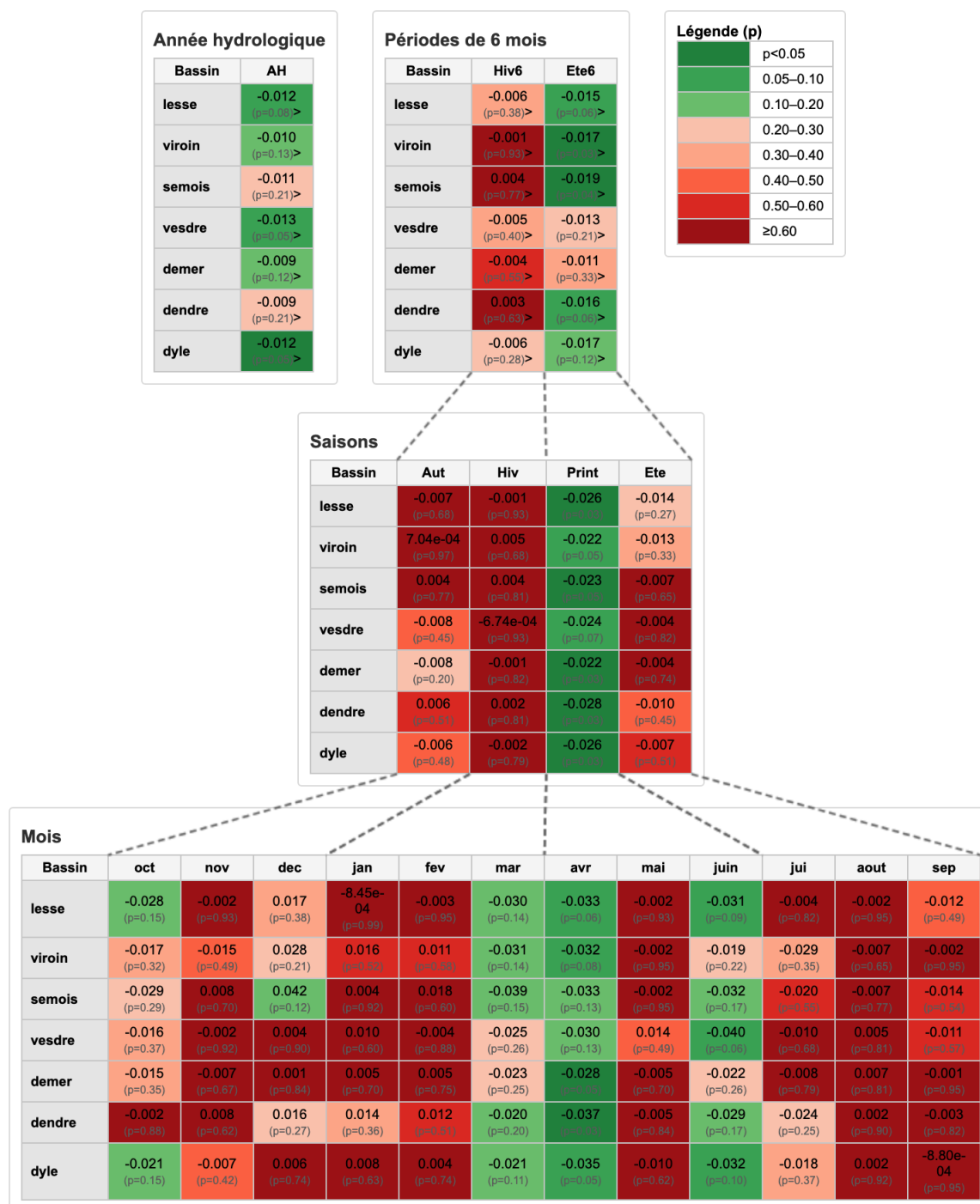


Figure 5-10 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière de P-ETR(P-ETR_gleam_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Une diminution des précipitations efficaces (P-ETR) est observée au printemps pour tous les bassins étudiés, résultant principalement de la baisse des précipitations d'avril pour tous les bassins. C'est également observé en juin pour tous les bassins (sauf la Demer et le Viroin). Cela se traduit au niveau annuel à différents niveaux de significativité pour tous les bassins sauf ceux de la Dendre et de la Semois.

5.3.7.2 Variance

La variance des précipitations efficaces diminue à l'automne, cela s'explique probablement par la diminution de la variance des précipitations à cette période. L'analyse des quantiles q10 révèle des tendances à la baisse particulièrement marquées en hiver et au printemps, se traduisant par une diminution annuelle généralisée sur l'ensemble des BV. Les 10% des journées les plus sèches deviennent encore plus sèches (de l'ordre de 10 à 25%).

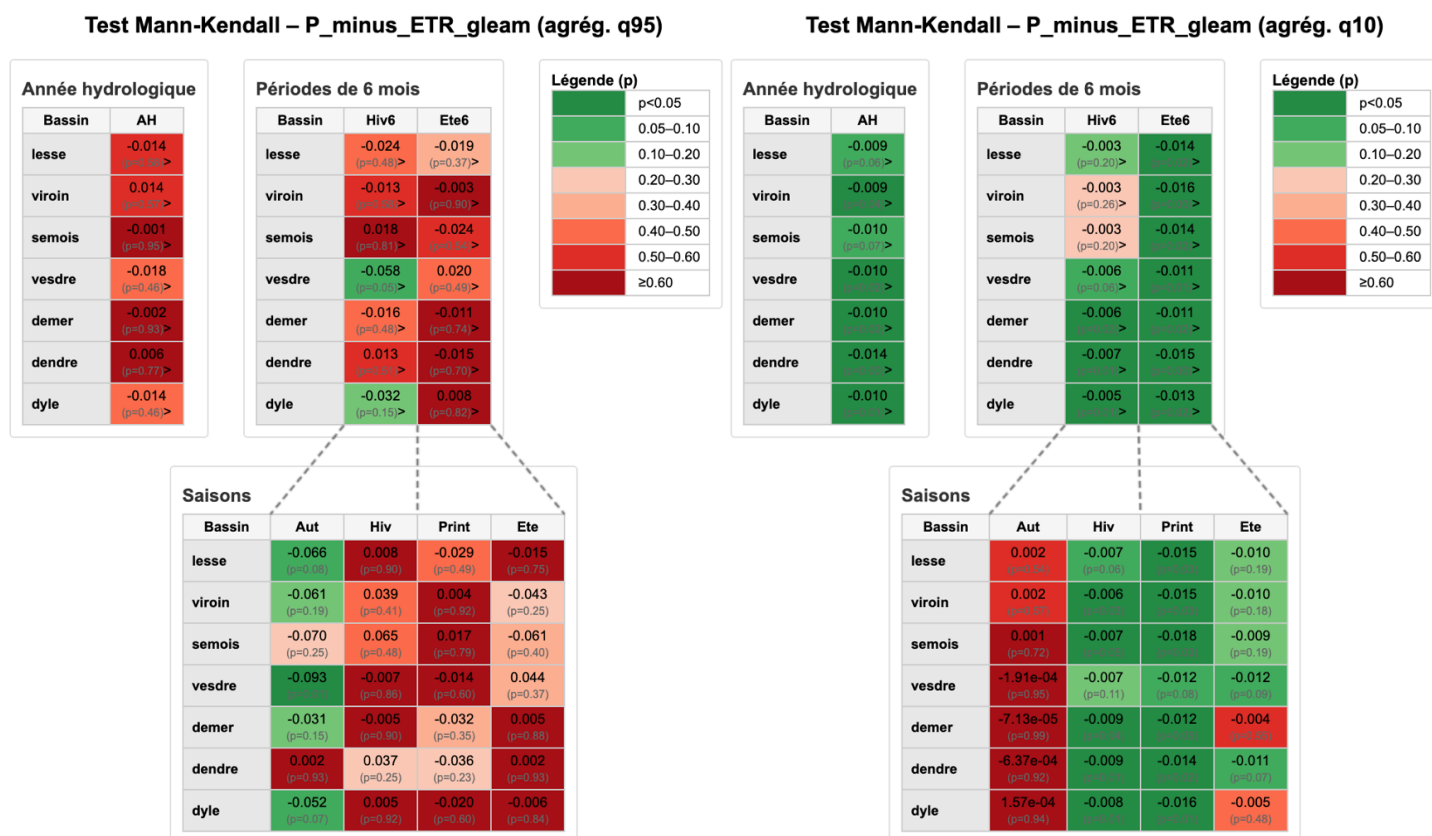


Figure 5-11 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux quantiles des précipitations efficaces (P_mm - ETR_gleam_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

5.3.8 P-ETR-Q

5.3.8.1 Moyenne

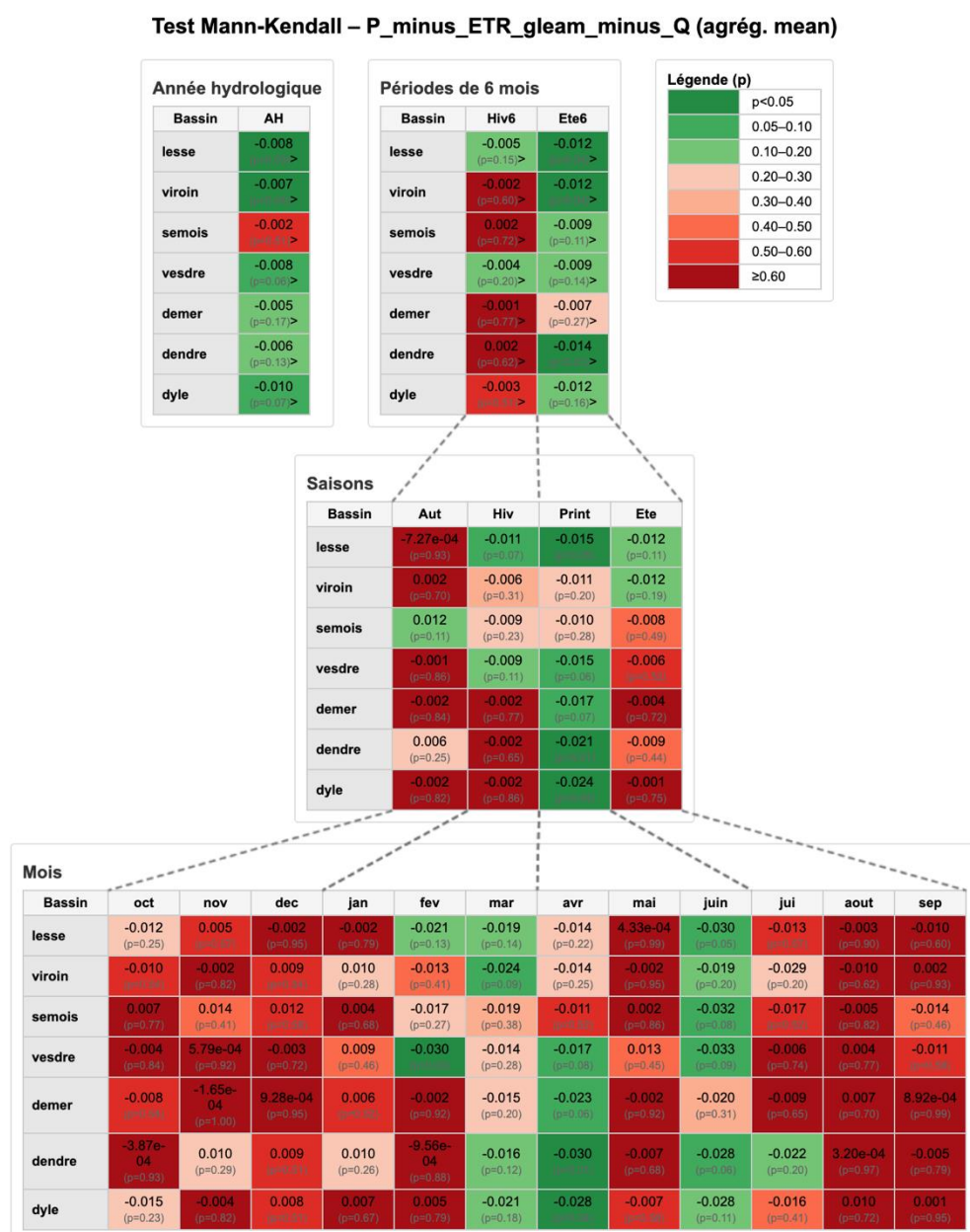
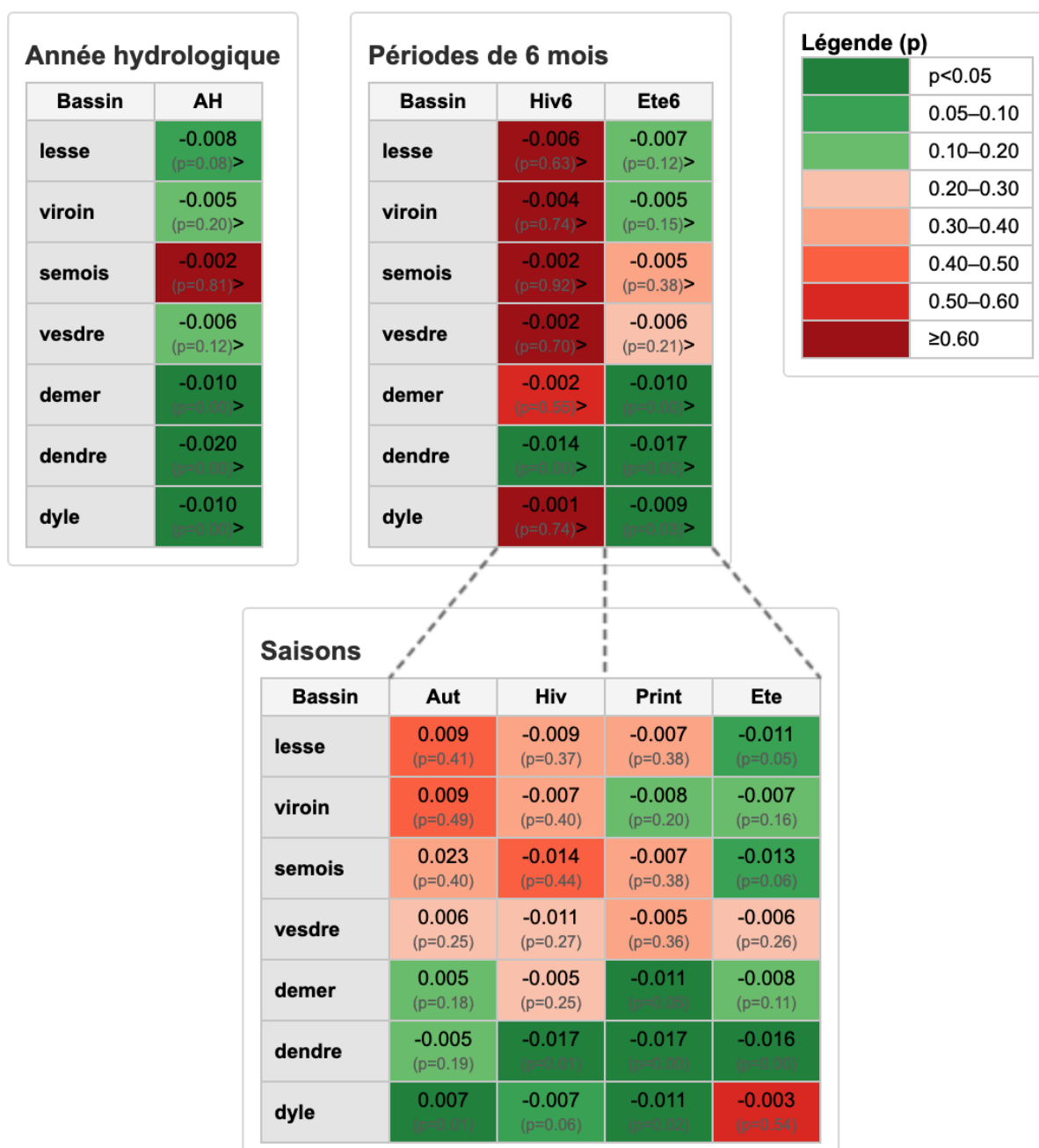


Figure 5-12 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière P-ETR-Q ($P_{mm} - ETR_{gleam_{mm}} - Q_{mm}$) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Tendances annuelles à la baisse pour tous les bassins sauf la Semois à des niveaux de significativité croissants selon cet ordre : Demer < Dendre < Vesdre < Dyle < Viroin < Lesse.

Test Mann-Kendall – P_minus_ETR_gleam_minus_Q (agrég. q10)



Tendance très significative observée annuellement à la baisse pour les bassins de la Demer de la Dendre et de la Dyle.

5.3.9 Tendances annuelles du niveau moyen des piézomètres

Les tendances annuelles du niveau moyen, présentées dans les Figure 5-13 et Figure 5-14, ont été calculées uniquement pour les années où chaque mois présente une couverture d'au moins 90 %. La moyenne annuelle est obtenue en calculant d'abord la moyenne de chaque mois, puis en moyennant les 12 mois. Le test de Mann-Kendall a été appliqué lorsque les séries de données comprenaient plus de 15 années. En dessous de ce seuil, une régression linéaire par moindres carrés (OLS) a été utilisée, car la pente de Theil-Sen est moins adaptée aux petits échantillons.

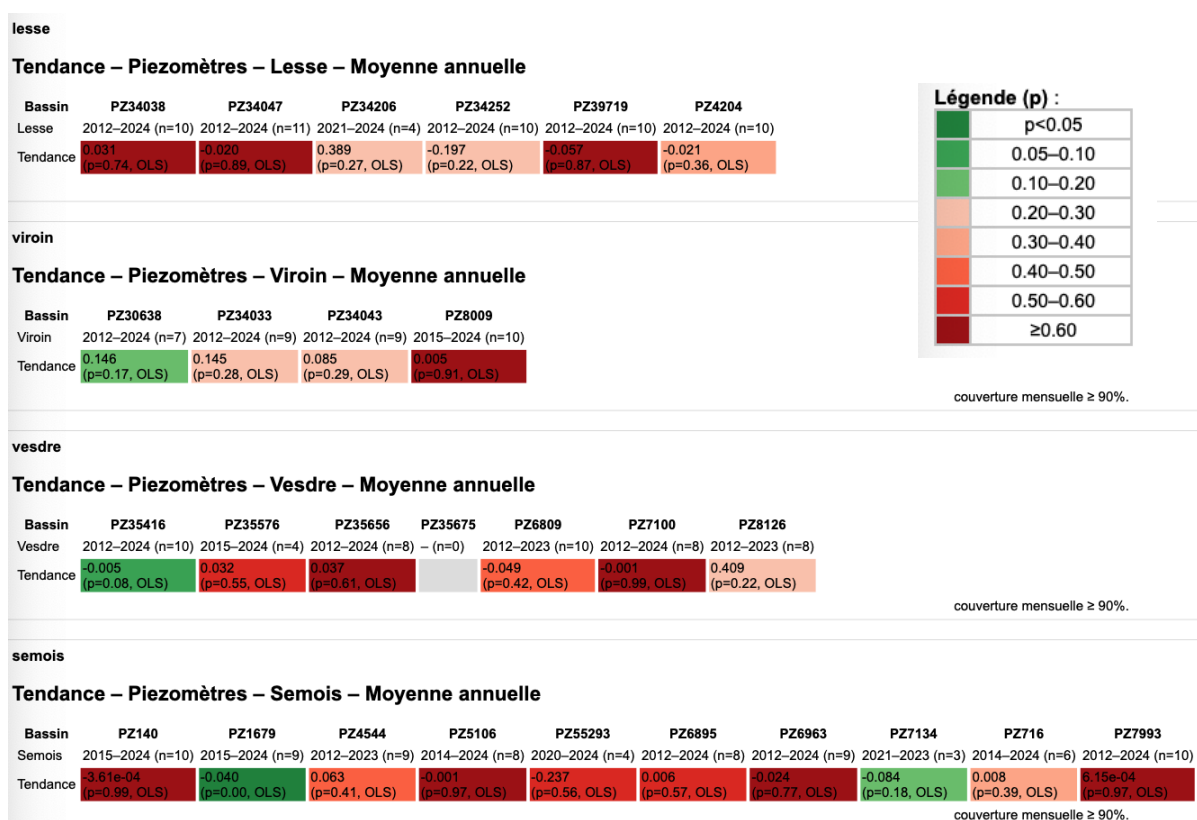


Figure 5-13 : Tendances annuelles du niveau des piézomètres (m) des bassins du district de la Meuse pour les années dont tous les mois présentent une couverture de données de 90% ou plus. Les niveaux moyens annuels ont été calculés en déterminant d'abord la moyenne mensuelle de chaque mois, puis en moyennant l'ensemble des moyennes mensuelles. Avec en gris les séries qui ont moins de 3 années valides. En dessous de 15 années de données une régression linéaire est appliquée, au-delà on utilise le test de Mann Kendall et la pente de Theil Sen.

L'analyse met en évidence très peu de tendances significatives pour les piézomètres du district de la Meuse. Deux tendances (dont une très significative qui correspond au piézomètre le plus en amont du BV, l'autre tendance correspond au second piézomètre le plus en amont) à la baisse sont observées pour le bassin de la Semois. Pour le bassin de la

Vesdre une tendance à la baisse est également observée. Une tendance peu significative à la hausse est observée pour le BV du Virain.

En outre, le nombre d'années disponibles sur lesquelles ces tendances sont calculées reste souvent très faible (entre 3 et 10). Cela limite grandement notre capacité à mettre en lien ces tendances avec les bilans.

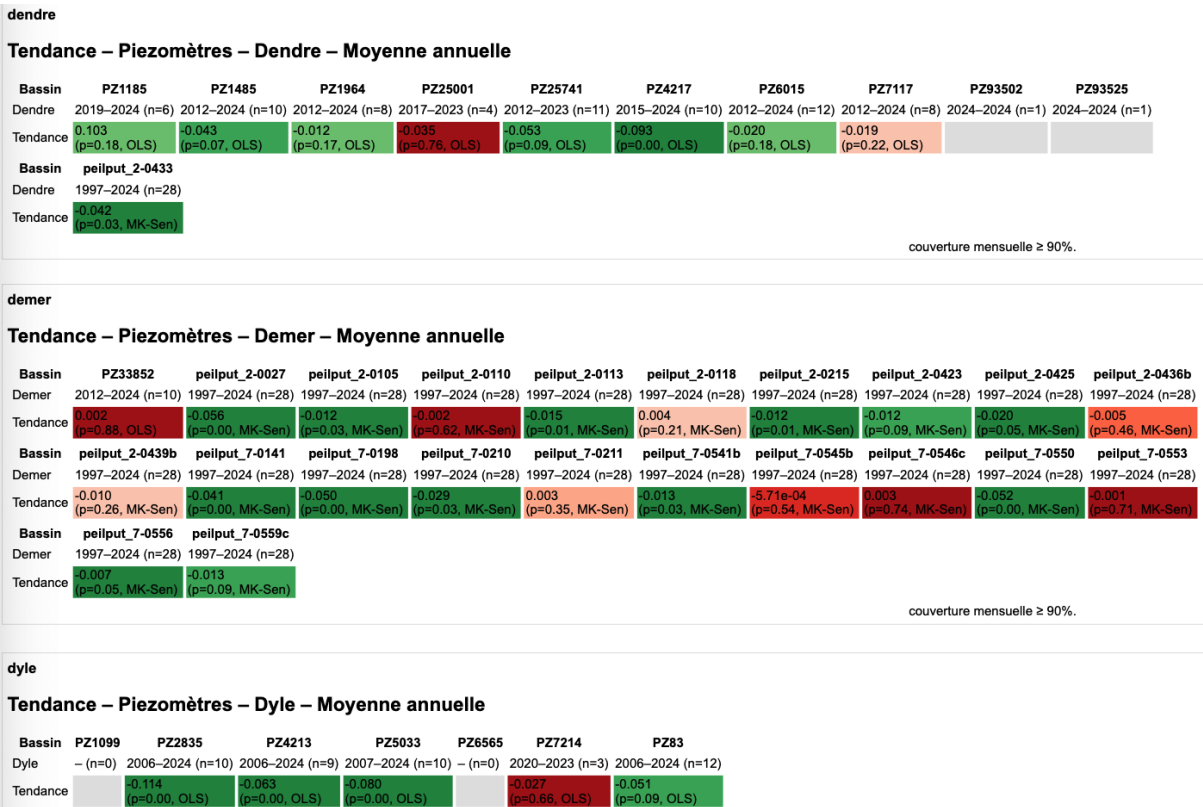


Figure 5-14 : Tendances annuelles du niveau des piézomètres (m) des bassins du district de l’Escaut pour les années dont tous les mois présentent une couverture de données de 90% ou plus. Les niveaux moyens annuels ont été calculés en déterminant d’abord la moyenne mensuelle de chaque mois, puis en moyennant l’ensemble des moyennes mensuelles. Avec en gris les séries qui ont moins de 3 années valides. En dessous de 15 années de données une régression linéaire est appliquée, au-delà on utilise le test de Mann Kendall et la pente de Theil Sen.

Nettement plus de tendances significatives sont observées pour les piézomètres des BV de l’Escaut. De plus, pour les piézomètres flamands, les données continues sont disponibles sur une période plus longue (1997-2024). Le bassin de la Dendre présente 7 tendances, de significativité variable, toutes orientées à la baisse mais selon des temporalités différentes. La Demer compte 13 tendances négatives, avec une diminution allant de 0,2 m à 1,5 m sur 28

ans. Enfin, la Dyle présente quatre tendances, dont trois très significatives entre 2006/2007 et 2024 avec des baisses comprises entre 1 et 1,6m.

5.4 Bilan hydrologique par bassin

Pour chacun des BV, les graphes des composantes annuelles (P, Q, ETR) sont présentés en Annexe L. Les graphes de bilans complets sont accompagnés d'un sous-graphe indiquant, pour chaque année hydrologique, la densité d'observations piézométriques réelles au cours de l'année (entre le tick de début d'année et le tick suivant). Cet indicateur a pour vocation d'identifier les périodes où l'imputation est la plus susceptible d'avoir produit des valeurs plausibles. La densité est calculée à partir de la fraction quotidienne d'observations réelles, puis lissée par convolution avec une gaussienne. Pour ce faire, la fonction `gaussian_filter1d` (module `scipy`) a été utilisée avec un écart type $\sigma = 10$ jours. En complément, un petit chiffre sur la série principale de ΔStock indique, au 1/10 de chaque année, le nombre de piézomètres ayant des valeurs réelles ainsi que le nombre total de piézomètres.

Les indicateurs de performance (r , R^2 , RMSE et biais) sont calculés en comparant les composantes du bilan hydrologique calculées (P- ETR ou P - ETR - Q) avec les variables « observées » correspondantes (Q ou ΔS). Un biais négatif indique que l'estimation (P-ETR ou P-ETR-Q) est en moyenne inférieure à la valeur observée (Q ou ΔS). C'est l'inverse pour un biais positif.

5.4.1 District de la Meuse

En observant les graphes des composantes annuelles du bilan pour le District de la Meuse (Voir Annexe L), on peut remarquer que l'ETR se situe systématiquement entre 500 et 700mm par an. Trois bassins ont par ailleurs un comportement similaire pour les débits et les précipitations : Le BV de la Vesdre, celui du Viroin et celui de la Lesse. La Semois présente des précipitations et des débits systématiquement plus élevés que ceux observés dans les trois autres bassins. Cela coïncide avec la carte des précipitations moyennes (présentée à la section 4.2.3.) qui montre des précipitations moyennes très nettement supérieures au reste de la Belgique autour du BV de la Semois.

5.4.1.1 Bassin de la Lesse

La Figure 5-15 nous montre le bilan hydrologique simple sans considération des variations de stock. On peut voir que les précipitations efficaces (P-ETR), suivent assez bien le débit. La droite de tendance P-ETR semble descendre. Sa p-valeur (voir 5.3.7) est de 0,08 pour une pente de -0,012mm, ce qui équivaut à une diminution de 175mm en 40ans. Cette diminution peut en partie être expliquée par la baisse des précipitations en avril de 33,6mm

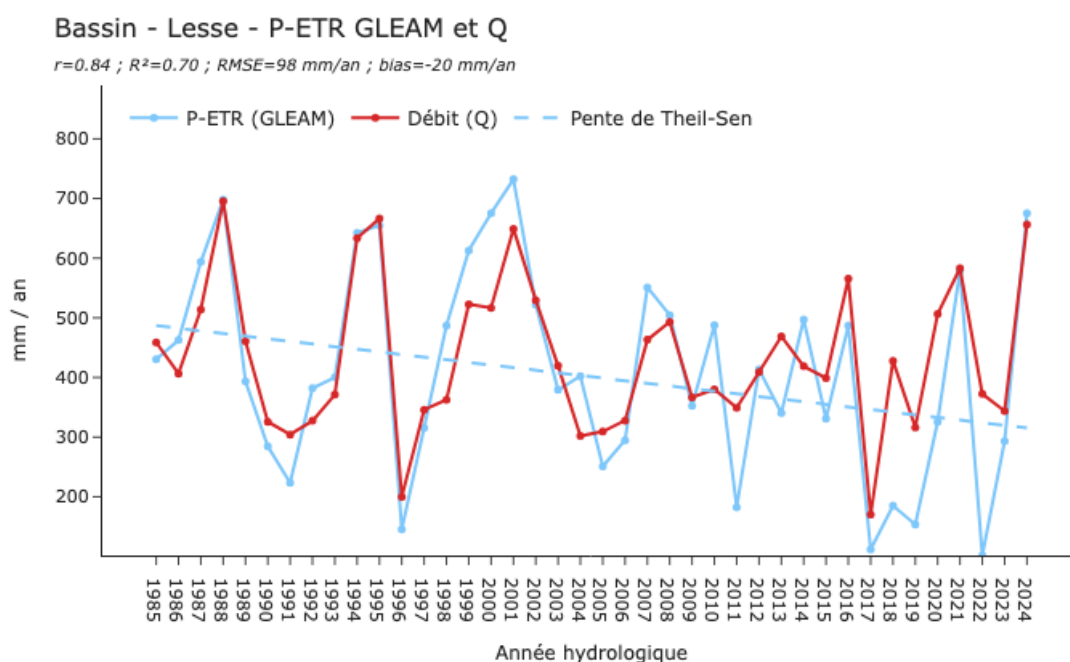


Figure 5-15 : Comparaison des composantes P - ETR et du débit annuel (Q) pour le bassin de la Lesse.

($p = 0,05$) et par l'augmentation de l'ETR annuelle d'environ 70mm ($p < 10^{-3}$). Le débit ne variant pas de manière significative, on peut se demander si l'introduction de la variable de stock permet d'expliquer en tout ou en partie l'écart restant. Sur la Figure 5-16, on peut voir que le bilan n'est pas bien fermé : P-ETR-Q explique mal la variation de stock et inversement. Cependant, on peut observer que les directions de variation semblent régulièrement cohérentes ($r=0,34$). La droite de tendance ($p = 0,03$) indique une diminution de 116mm sur 40ans qui ne semble pas être suivie par la variation du stock. Aucune tendance significative pour les piézomètres du bassin de la Lesse n'a été observée. On peut donc émettre plusieurs hypothèses concernant le fait que le stock ne diminue pas. Premièrement, le nombre d'années sur lesquelles des valeurs sont disponibles est possiblement trop faible pour percevoir l'évolution. Une autre explication pourrait être que les bilans ne sont en réalité pas vraiment fermés en une seule année, et qu'il faut parfois plusieurs années pour voir l'effet

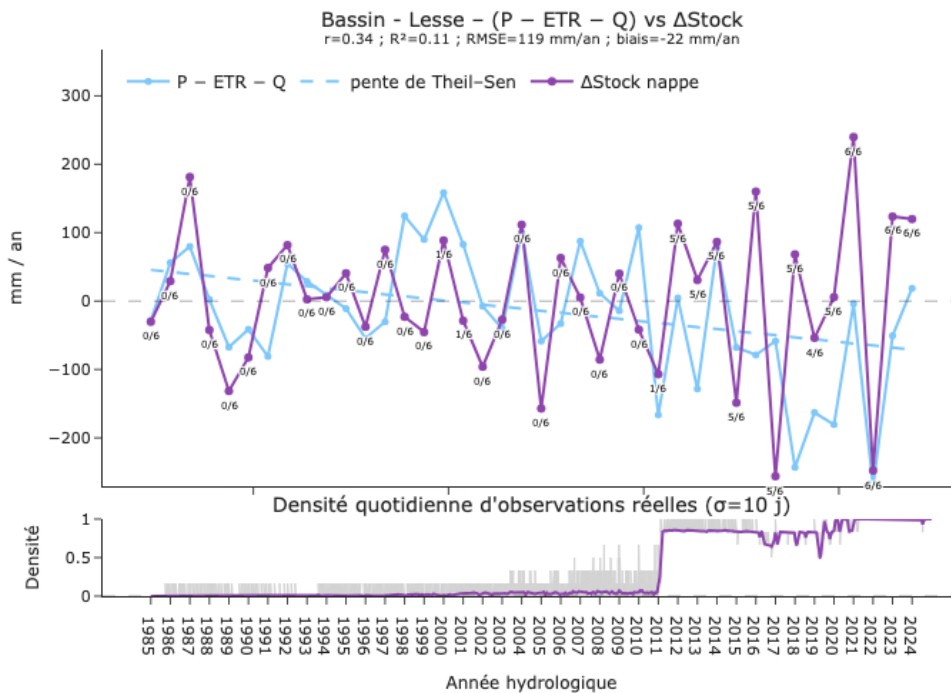


Figure 5-16 : Comparaison entre le bilan hydrologique annuel (P - ETR - Q) et la variation de stock souterrain (ΔS) pour le bassin de la Lesse. Le sous-graphe inférieur présente la densité d'observations piézométriques réelles (fraction quotidienne lissée, $\sigma = 10$ jours). Les annotations indiquent le nombre de piézomètres valides par rapport au total.

d'une variation sur le stock d'eau. Enfin cette divergence pourrait être due à la surestimation ou sous-estimation d'une variable. La comparaison avec d'autres bilans pourra peut-être clarifier cette situation.

5.4.1.2 Bassin de la Vesdre

Sur la Figure 5-17, on peut constater des tendances similaires à ce qui est observé pour le BV de la Lesse. Une diminution significative ($p = 0,05$) des précipitations efficaces s'observe. Non reflétée dans le débit, cela indiquerait un déficit hydrique qui devrait être expliqué par la variation de stock. La diminution de P-ETR est de 190mm ce qui s'explique par une diminution significative ($p=0,07$) au printemps de 87mm. Elle-même expliquée par une diminution au mois d'avril ($p= 0,13$) et au mois de juin ($p=0,06$) de 36 et 48mm respectivement. Le débit ne variant pas significativement il faut s'intéresser au bilan complet. Sur la Figure 5-18, on remarque que les variations de stock suivent assez bien le bilan pour les années avec une densité d'observations réelles élevée. La droite de tendance indique une diminution de 116mm ($p=0,05$) pour P-ETR-Q. Une seule tendance significative de diminution a été observée pour un piézomètre. De 2012 à 2024, le PZ35416 a baissé de 0,05m en

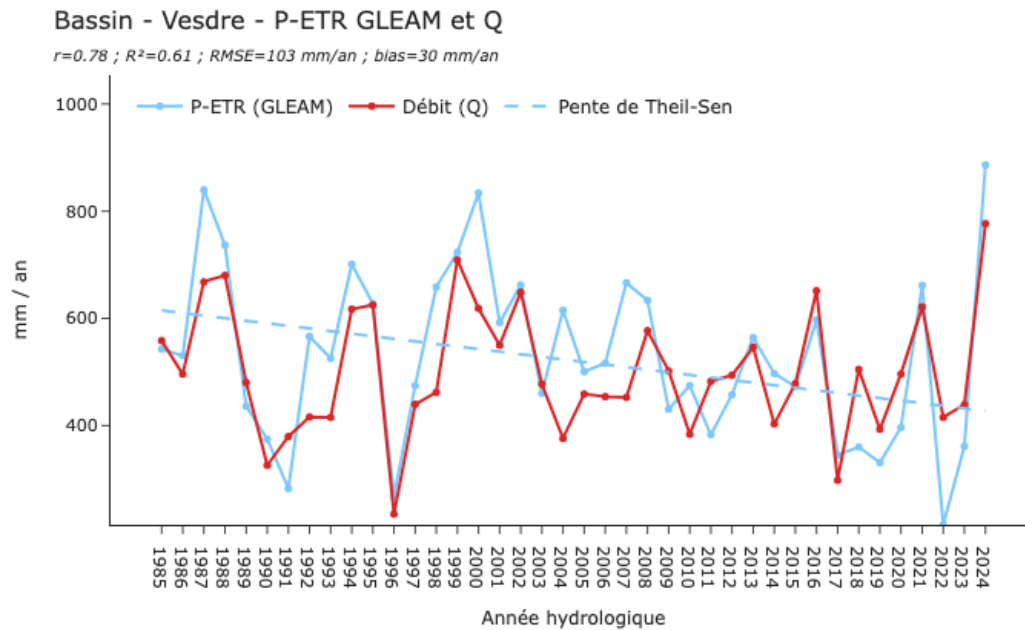


Figure 5-17 : Comparaison des composantes P - ETR et du débit annuel (Q) pour le bassin de la Vesdre

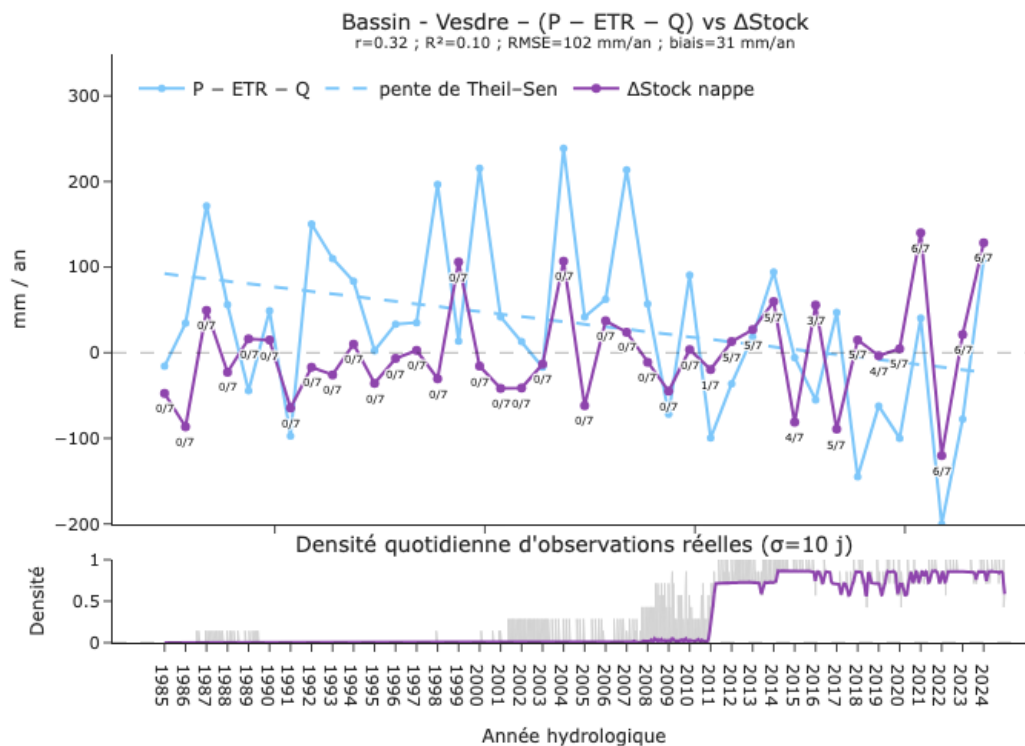


Figure 5-18 : Comparaison entre le bilan hydrologique annuel (P - ETR - Q) et la variation de stock souterrain (Δ S) pour le bassin de la Vesdre. Le sous-graphe inférieur présente la densité d'observations piézométriques réelles (fraction quotidienne lissée, $\sigma = 10$ jours). Les annotations indiquent le nombre de piézomètres valides par rapport au total.

moyenne pour une porosité effective estimée de 0,02 (voir Annexe D) cela équivaut à 1mm de diminution, soit 4 si la tendance s’observait sur 40ans, ce piézomètre n’est pas représentatif de la tendance. Les prélèvement d’eau dans les deux barrages du BV de la Vesdre étaient de 30 millions de m³ en 2022 ce qui équivaut, divisé par la surface du BV, à environ 44mm par an valeur non négligeable (entre 5 et 10% du débit). Les variations de stocks semblent difficiles à quantifier pour les bassins de la Meuse, mais les tendances des variables hydrologiques semblent s’orienter vers un déficit hydrique.

5.4.1.3 Bassin de la Semois

Pour le BV de la Semois, la tendance annuelle sur les précipitations efficaces n’est pas significative. Cependant, elles diminuent tout de même au printemps et plus particulièrement en avril (significativement) et en juin (faible significativité) comme pour les bassins de la Vesdre et de la Lesse. Un biais positif systématique est observé pour les débits, même si le modèle semble très bien estimer le débit en fonction des précipitations efficaces ($r=0,9$). La question se pose de savoir si ce biais systématique est expliqué par la variation du stock d’eau.

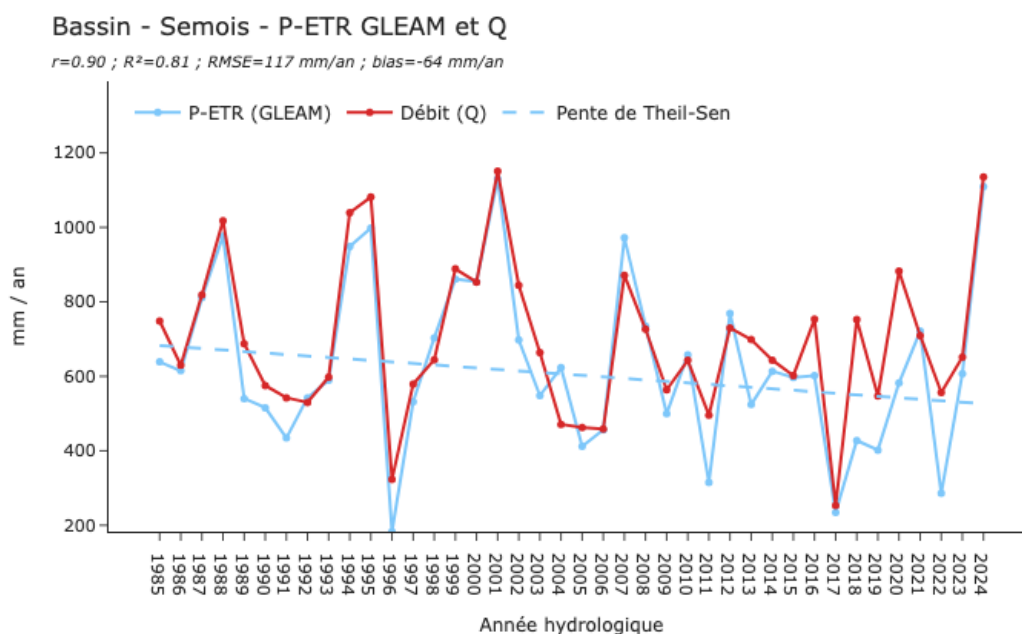


Figure 5-19 : Comparaison des composantes P - ETR et du débit annuel (Q) pour le bassin de la Semois

la Figure 5-20 montre que ce n’est pas le cas : lorsqu’on effectue le bilan complet, le biais subsiste sur l’entièreté de la période. Les variations de stock n’expliquent pas le déficit

systématique. Reste alors à déterminer à quelle(s) variable(s) ce biais est associé. L'exploration des bilans des autres bassins devrait apporter des éléments complémentaires, et une hypothèse plus solide pourra être formulée à l'issue de cette comparaison.

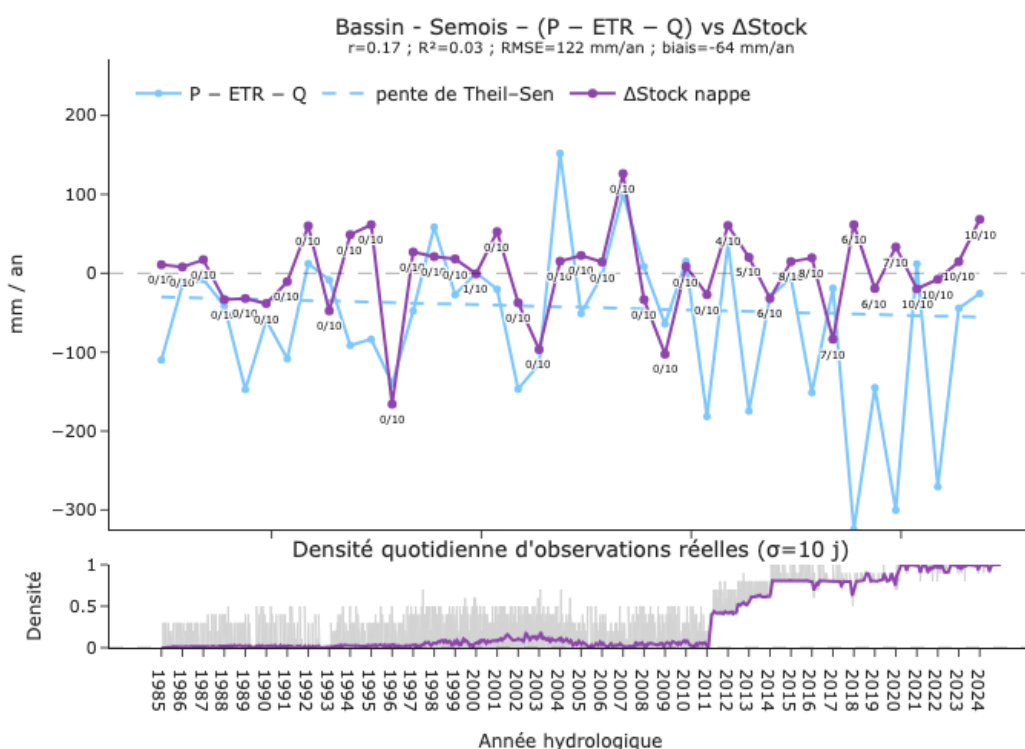


Figure 5-20: Comparaison entre le bilan hydrologique annuel (P - ETR - Q) et la variation de stock souterrain (Δ S) pour le bassin de la Semois. Le sous-graphe inférieur présente la densité d'observations piézométriques réelles (fraction quotidienne lissée, $\sigma = 10$ jours). Les annotations indiquent le nombre de piézomètres valides par rapport au total.

5.4.1.4 Bassin du Viroin

La Figure 5-21, montre une tendance à la baisse de 146mm pour les précipitations efficaces du bassin du Viroin ($p=0,13$). Cette tendance est traduite par une baisse de 124mm en été de 6 mois ($p=0,03$) ce qui est partiellement expliqué par les mois de mars et avril qui diminuent tous deux de 38mm (p valeur de 0,14 et 0,08 respectivement). Ces tendances négatives des mois de mars et avril sur P-ETR qui sont elles-mêmes expliquées par une augmentation de 6,2 mm de l'ETR en mars ($p=0,01$) ainsi qu'une diminution des précipitations de 36mm en mars ($p=0,17$) et de 30mm en avril ($p=0,1$). A noter que l'augmentation de l'ETR en avril n'est pas considérée pour les raisons exposées dans la section 5.3.5.1. On voit sur la

Figure 5-22 (page 68), que les variations du bilan suivent assez bien la variation du stock pour les années présentant une densité supérieure à 50%. C'est confirmé par un coefficient de corrélation global de 0,4 , le meilleur des bassins de la Meuse. Cependant, le biais du BV de la Semois semble être présent ici aussi mais dans une moindre mesure.

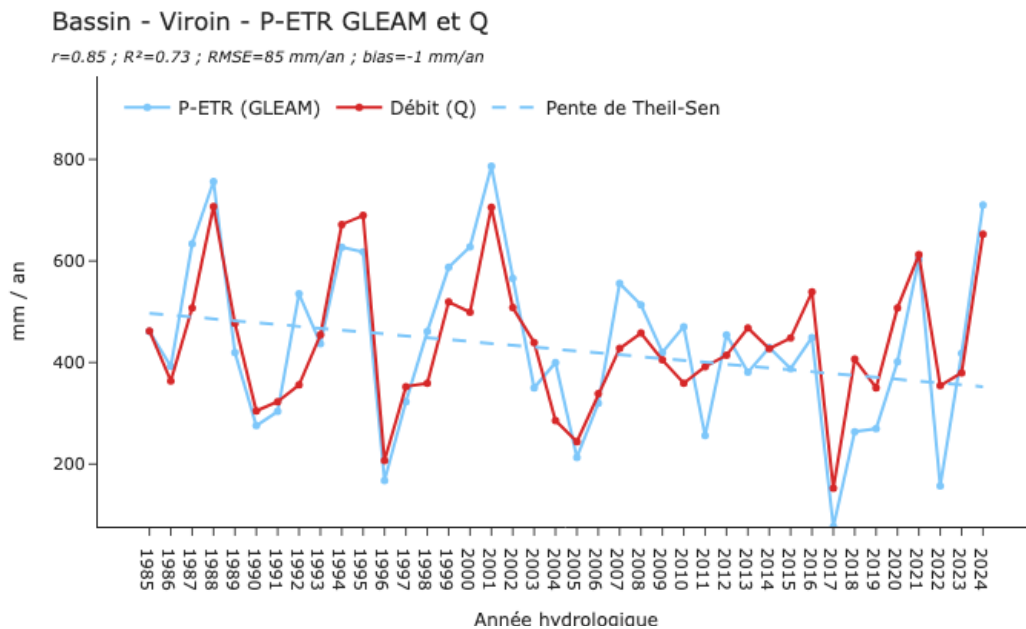


Figure 5-21 : Comparaison des composantes P - ETR et du débit annuel (Q) pour le bassin du Viroin

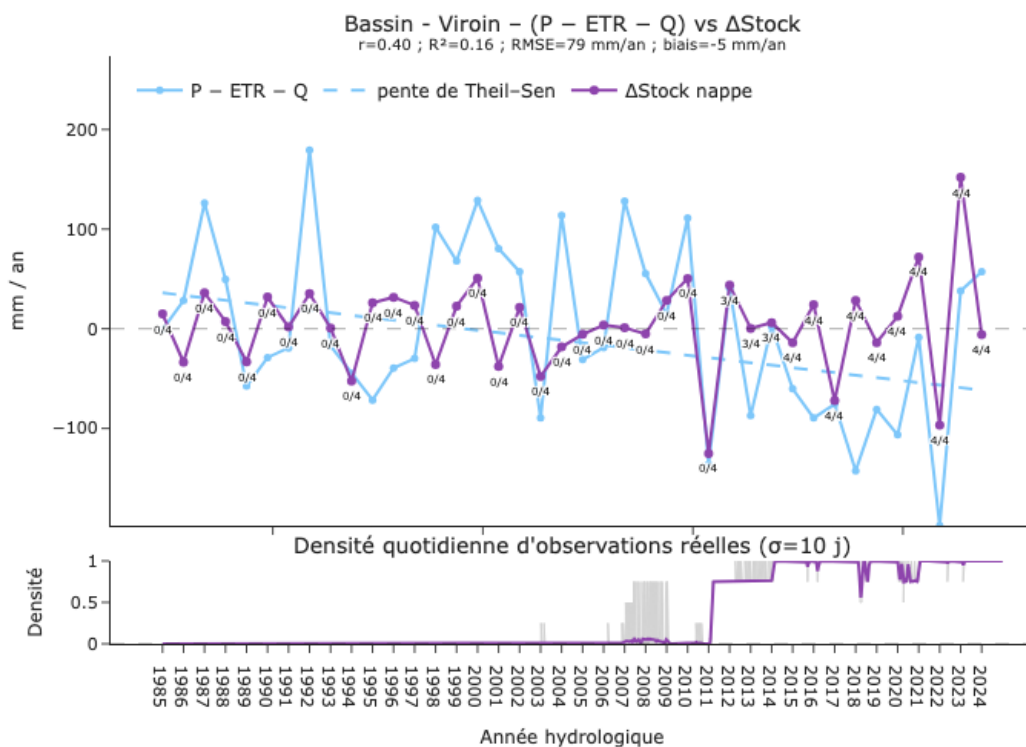


Figure 5-22 : Comparaison entre le bilan hydrologique annuel (P - ETR - Q) et la variation de stock souterrain (Δ S) pour le bassin du Viroin. Le sous-graphe inférieur présente la densité d'observations piézométriques réelles (fraction quotidienne lissée, $\sigma = 10$ jours). Les annotations indiquent le nombre de piézomètres valides par rapport au total.

5.4.2 District de l'Escaut

Les chroniques des composantes annuelles du bilan sont très similaire pour les 3 BV (Voir Annexe L). Les précipitations annuelles sont comprises entre 600 et 1000mm. Cela concorde avec la description du climat de ces bassins. L'ETR annuelle semble légèrement plus faible que pour les BV de la Meuse alors que les débits, eux, y sont nettement inférieurs. Ceci s'explique en partie par des précipitations plus faibles. Cependant, le rapport P/Q n'est pas le même : il est autour de 2 voire moins (BV de la Semois) pour les bassins de la Meuse alors qu'il est autour de 3 voire 4 (Dyle) pour ceux de l'Escaut. Cela signifie qu'une proportion plus importante des précipitations de l'année est traduite en débit sur la même année pour les bassins de l'Escaut. Une hypothèse serait que les débits des bassins de la Meuse sont plus représentatifs du débit qui sort réellement du bassin à l'année considérée. Comme la pente moyenne de ces bassins est plus élevée, les flux convergent plus rapidement et facilement vers l'exutoire. A contrario, les BV de l'Escaut ont une pente plus faible. Donc, selon la position

de l'exutoire (fonction de la station), on peut se trouver à un endroit où beaucoup plus de flux parviendraient à « éviter » l'exutoire du bassin par des nappes ne représentant pas le bassin hydrologique par exemple, le seul flux sortant n'est plus l'exutoire du bassin, l'entièreté des flux qui s'infilte ne ressort pas forcément avant l'exutoire. Les flux souterrains sortant ne seraient donc plus négligeables. De plus, une pente plus élevée favorise le ruissellement ce qui se traduit par une conversion plus rapide des précipitations en débit sans délai d'infiltration. De ce raisonnement, ressortirait une sous-estimation du débit pour les bassins de l'Escaut. Si cette hypothèse s'avère correcte, cela suggère que le biais observé pour le district de la Meuse serait davantage lié à une surestimation de l'ETR qu'à une surestimation du débit. Ce qui amène à penser que l'ETR estimée par GLEAM4 serait donc probablement surestimée sur des zones plus fortement boisées et moins urbanisées. Ce qui concorde avec la littérature scientifique estimant un biais négatif de l'ETR GLEAM en hiver pour une zone boisée compensée par un biais positif en été et au printemps probablement de plus grande ampleur ce qui amènerait à une surestimation sur l'échelle annuelle.

5.4.2.1 Bassin de la Demer

Sur la Figure 5-23, on remarque que le débit suit les variations des précipitations efficaces assez fidèlement mais pas autant que pour les BV du district de la Meuse. La diminution de P-ETR est relativement significative ($p=0,12$) et de l'ordre de 130mm sur toute la période. C'est partiellement expliqué par une diminution des précipitations d'avril de 25mm ($p=0,14$) ainsi qu'une augmentation probable de l'ETR en mars (7mm, $p=0,01$) et en

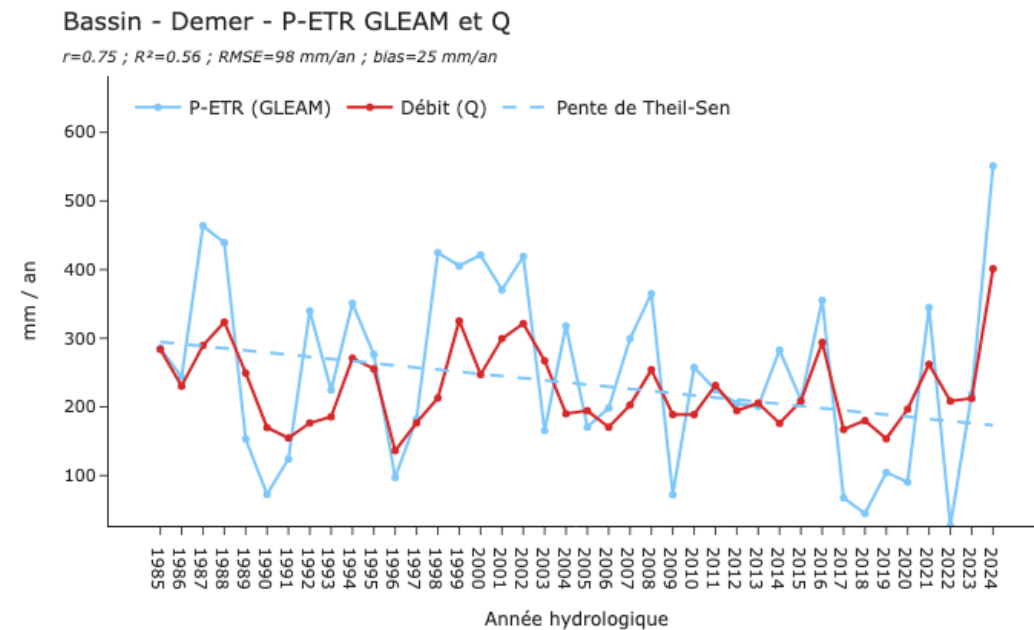


Figure 5-23 : Comparaison des composantes P - ETR et du débit annuel (Q) pour le bassin de la Demer

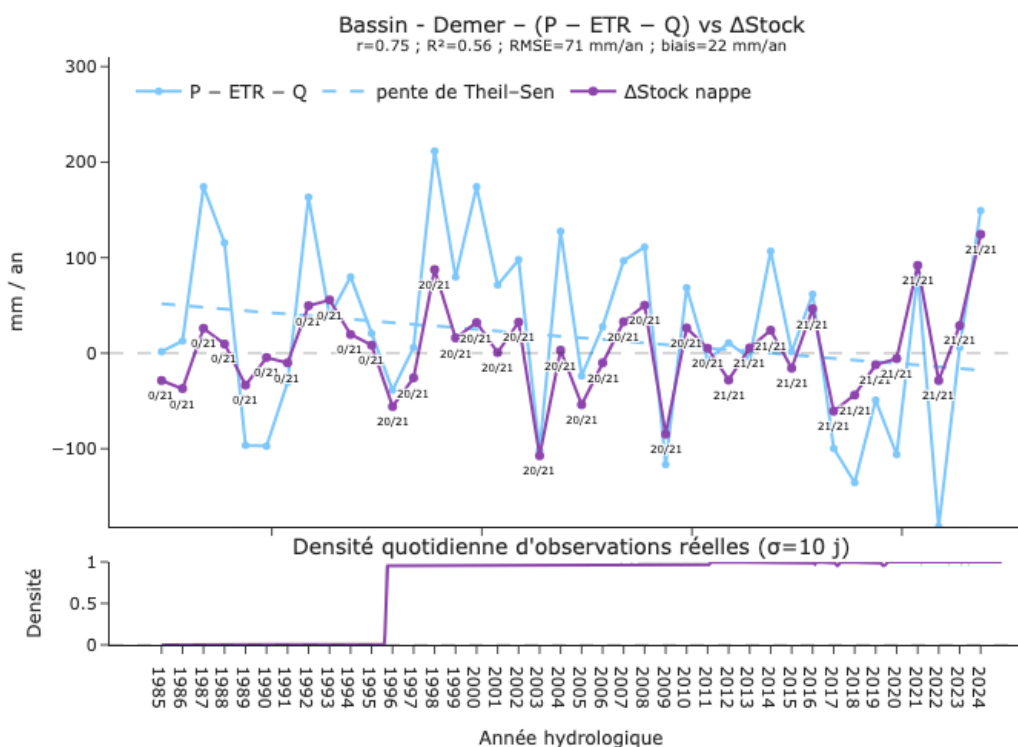


Figure 5-24 : Comparaison entre le bilan hydrologique annuel (P - ETR - Q) et la variation de stock souterrain (Δ S) pour le bassin de la Demer. Le sous-graphe inférieur présente la densité d'observations piézométriques réelles (fraction quotidienne lissée, $\sigma = 10$ jours). Les annotations indiquent le nombre de piézomètres valides par rapport au total.

septembre (8,5mm, $p<10^{-3}$). Comparé aux bassins de la Meuse, le bilan complet du BV de la

Demer semble mieux expliquer les variations de stock d'eau (Figure 5-24). Si on inspecte les tendances des piézomètres, on peut remarquer que la plupart ont une tendance significative à la baisse sur une période assez étendue (28 années). Cela confirme l'importance de disposer de données piézométriques complètes afin de comprendre les interactions entre variables hydrologiques. Dans les nappes de ce bassin, la réponse du stock d'eau aux variations d'apport semble correcte annuellement. On peut par ailleurs noter une diminution significative des débits d'étiage, cela signifie que la nappe ne suffit pas à compenser les apports en eau faiblissants.

5.4.2.2 Bassin de la Dendre

Les constats sont très similaires pour le bassin de la Demer, cependant la tendance sur P-ETR n'est pas significative. Le bilan complet diminue de manière significative. Les Figure 5-25 et Figure 5-26 montrent que à partir de 2015 le bilan a tendance à être en déficit hydrique. Si on observe les tendances des piézomètres, on remarque que les tendances sont à la baisse pour 6 piézomètres sur 7 ayant des p-valeur < 0.2. Ces tendances s'observent pour des périodes généralement commençant avant 2015. Le bilan concorde donc avec l'évolution du stock d'eau. Un piézomètre en amont du BV a une tendance à la hausse.

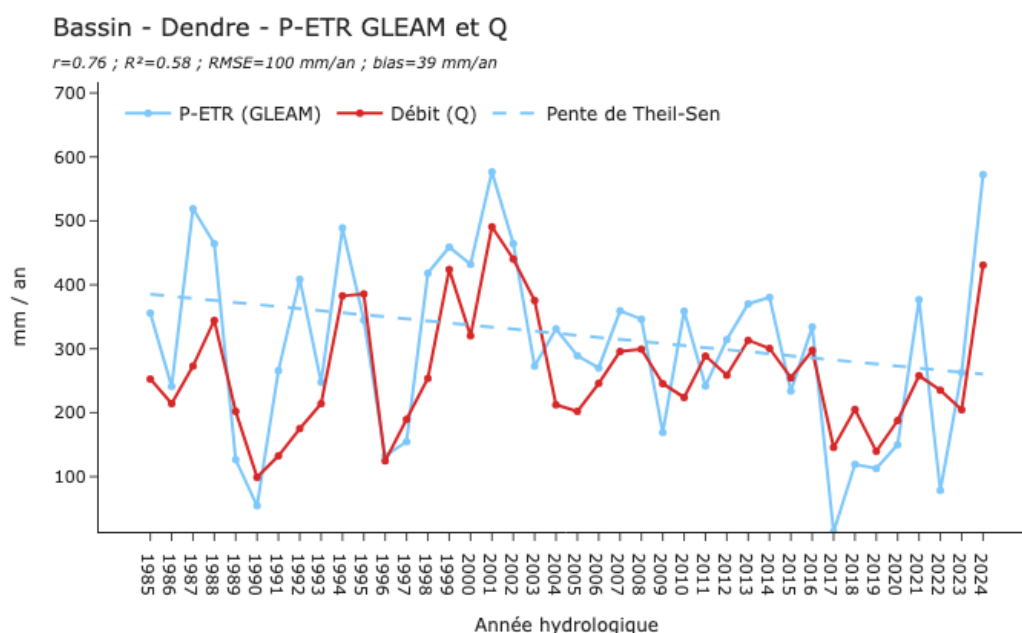


Figure 5-25: Comparaison des composantes P - ETR et du débit annuel (Q) pour le bassin de la Dendre

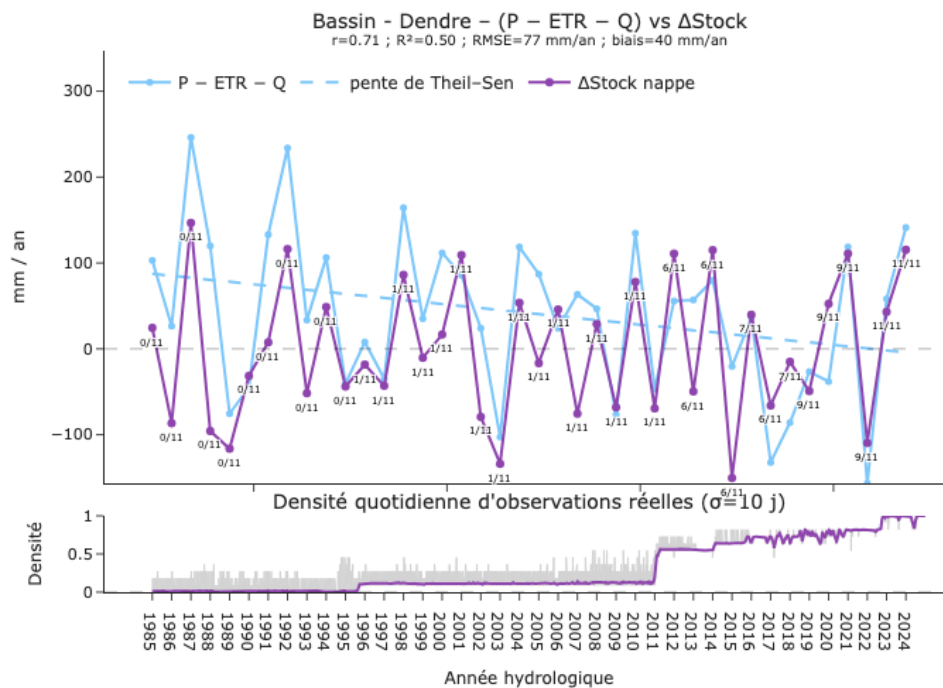


Figure 5-26 : Comparaison entre le bilan hydrologique annuel (P - ETR - Q) et la variation de stock souterrain (ΔS) pour le bassin de la Dendre. Le sous-graphe inférieur présente la densité d'observations piézométriques réelles (fraction quotidienne lissée, $\sigma = 10$ jours). Les annotations indiquent le nombre de piézomètres valides par rapport au total.

5.4.2.3 Bassin de la Dyle

On remarque que le biais systématique est présent aussi pour ce BV (plus que pour les deux autres) signalant que les débits ou l'ETR sont peut-être sous-estimés. La sécheresse de 2018-2019 (Blauhut et al., 2022) est visible sur le minimum de la courbe de débit. Le bilan complet ne semble à première vue pas très bien estimer la variation du stock. L'analyse des tendances piézométriques significatives révèle des baisses comprises entre 1 et 1,6 m. Cette

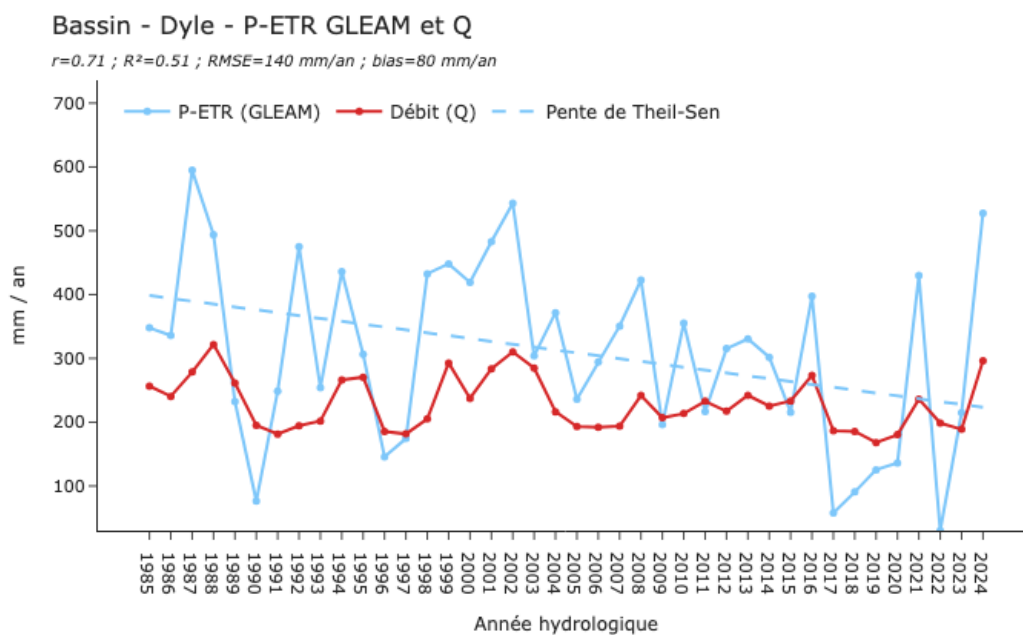


Figure 5-27 : Comparaison des composantes P - ETR et du débit annuel (Q) pour le bassin de la Dendre

variation peut être illustrée par le piézomètre PZ2835 : avec une variation de 1,6m et une porosité effective de 0,15, la baisse observée correspond à une diminution de 240 mm de stock d'eau souterraine sur la période 2006-2024. Quatre piézomètres comportent des tendances à la baisse de leur niveau moyen. Sachant cela, cela offre une toute autre perspective sur la capacité du bilan complet à évaluer correctement les variations de stock. La tendance P-ETR-Q sur 18ans donne une diminution de 65mm.

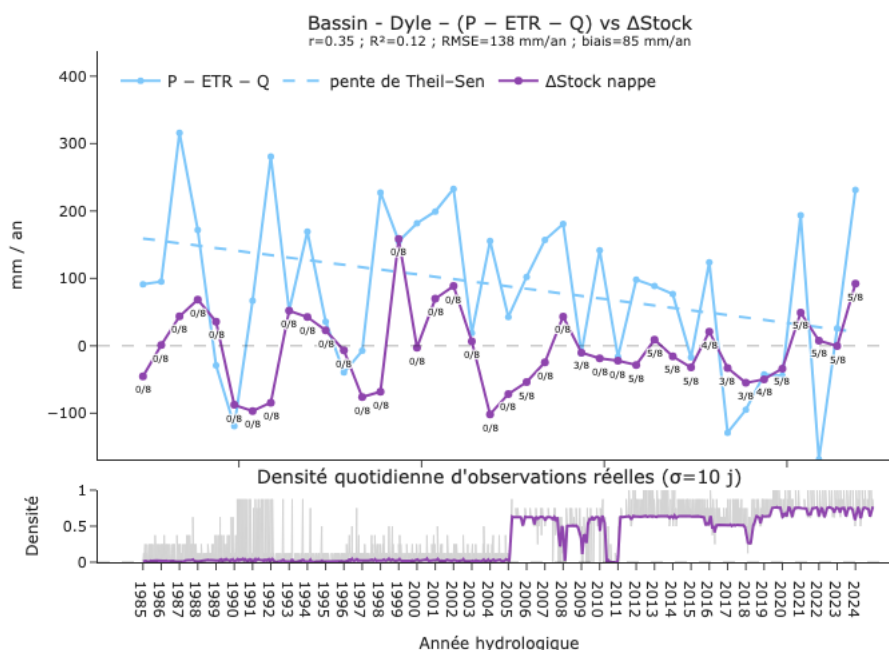


Figure 5-28 : Comparaison entre le bilan hydrologique annuel (P - ETR - Q) et la variation de stock souterrain (Δ S) pour le bassin de la Dendre. Le sous-graphe inférieur présente la densité d'observations piézométriques réelles (fraction quotidienne lissée, $\sigma = 10$ jours). Les annotations indiquent le nombre de piézomètres valides par rapport au total.

5.4.3 Performance du modèle

Il apparaît assez clairement sur les bilans que les données complétées par machine learning, pour des lacunes temporelles longues, ne permettent pas d'établir des hypothèses concernant la variation des nappes à long terme. Cependant, cela a du moins permis de compléter certaines lacunes temporelles de manière satisfaisante à des périodes où seulement peu de piézomètres manquaient de données.

Pour ce qui est de la performance des bilans, des indicateurs de performances ont pu être calculés pour la période entière ainsi que pour les années où la densité d'observations piézométriques réelles dépasse 50%. Le Tableau 9 résume ces indicateurs. On remarque d'emblée que le modèle performe mieux lorsqu'on se cantonne à un seuil d'observations réelles. C'est valable pour l'entièreté des BV à l'exception de la Semois qui affiche une corrélation négative dans ce cas-là. Autrement dit, quand P-ETR-Q augmente, le stock diminue et inversement. Quand P-ETR-Q diminue, en fait P augmente, et le stock augmente.

Malgré le danger de ruissellement sur une pente accrue, la nappe se recharge bien. Cela est possiblement dû à la quantité nettement supérieure de précipitations qui tombent sur ce bassin ainsi qu'à des sols favorisant l'infiltration (forêts + sols caillouteux + sols sablo-limoneux). La Demer et la Dendre ont la meilleure performance pour les valeurs réelles avec les meilleurs coefficients de corrélation et R^2 , ainsi qu'un biais minimal. Comme expliqué dans les bilans, un biais systématique de sous-estimation est observé pour tous les bassins du district de la Meuse. Ce biais résulte probablement d'un débit qui reflète plus directement les précipitations efficaces. En raison de la pente plus élevée de ces bassins versants, l'eau parvient plus rapidement à l'exutoire. Une autre explication possible serait une surestimation de l'ETR comme exposé plus tôt. À l'inverse, pour les bassins de l'Escaut, des pentes plus faibles favoriseraient l'infiltration et limiterait le ruissellement, ce qui pourrait conduire à une sous-estimation du débit observé. Encore une fois, ici une autre explication possible serait une sous-estimation de l'ETR. Hypothèse qui peut également faire sens dans une région très cultivée où l'irrigation des cultures en période sèche par exemple aurait un effet notable sur l'évapotranspiration.

Tableau 9 : Performance des bilans

Indicateurs de performance sur toute la période						
	r	R²	Biais	Balance cumulée[mm]	deltaS cumulé[mm]	Nombre d'année tot
Demer	0,75	0,56	21,97	1010,05	131,28	40
dendre	0,71	0,50	40,06	1571,97	-30,46	40
Dyle	0,35	0,12	85,01	3197,09	-203,46	40
Vesdre	0,32	0,10	30,98	1194,12	-44,92	40
Viroin	0,40	0,16	-4,52	-51,25	129,72	40
Lesse	0,34	0,11	-21,57	-784,73	78,01	40
Semois	0,17	0,03	-64,44	-2560,35	17,18	40
Indicateurs de performance sur les années où la densité d'observation réelle > 0,5						
	r	R²	Biais	Balance cumulée[mm]	deltaS cumulé[mm]	Nombre d'années
Demer	0,78	0,61	19,01	627,05	75,83	29
dendre	0,74	0,55	-2,65	40,71	77,86	14
Dyle	0,49	0,24	53,36	712,15	-195,03	17
Vesdre	0,52	0,28	-44,48	-471,79	150,99	14
Viroin	0,63	0,40	-61,32	-846,36	12,15	14
Lesse	0,49	0,24	-103,19	-1310,46	134,22	14
Semois	-0,41	0,17	-129,05	-1478,56	70,02	12

5.4.4 Considérations des flux souterrains sortant

Dans la section précédente, une hypothèse a été établie concernant la valeur des débits pour les bassins de l'Escaut, faibles en comparaison aux précipitations efficaces et, inversement, la valeur élevée des débits pour les bassins de la Meuse. Cela peut s'expliquer par une sous-estimation de l'ETR sur les bassins de l'Escaut. Cependant, même s'il est fort probable que cette affirmation soit vraie, il semble peu probable que la magnitude de sous-estimation soit aussi élevée (surtout pour le bassin de la Dyle). Autrement dit, il est possible que d'autres processus, en plus de l'incertitude liée à l'ETR, entrent en jeu.

Dans son article de 1963, József Tóth explique qu'en hydrologie on attribue souvent un phénomène observé à une seule composante du système de flux ce qui n'est pas forcément le cas (Tóth, 1963). Un exemple donné est la présence d'une eau de surface persistante qui peut résulter soit d'un drainage souterrain déficient lié aux conditions géologiques, soit d'une décharge constante induite par la dynamique du système de flux du bassin. Un autre exemple concerne les causes d'un débit faible, qui peut être le résultat d'une faible perméabilité à l'échelle du bassin, d'un drainage de surface efficace, d'une augmentation de l'ETR ou du fait que l'écoulement à l'exutoire ne constitue pas l'unique flux sortant. Selon Tóth, l'examen d'une large variété de causes permet de mieux appréhender les caractéristiques des flux.

Dans ce contexte, il a théorisé l'existence de flux souterrains interbassins évitant l'exutoire pour des bassins versants de petite taille. Selon sa théorie, l'augmentation du relief des flancs de vallée intensifie la profondeur et l'ampleur des flux souterrains régionaux. L'augmentation de la topographie en général aura par contre tendance à augmenter les flux locaux. Cette relation concorde avec la situation des bassins étudiés : la topographie élevée du district de la Meuse favorise les flux locaux, tandis que la topographie (mais gardant des flancs de vallée quand même présents) plus faible du district de l'Escaut favoriserait un écoulement régional.

Des études menées sur 1555 bassins aux États-Unis ont proposé une classification basée sur le rapport $Q/(P-ET)$ (Schaller & Fan, 2009). Les bassins présentant $Q/(P-ET) > 1$ sont qualifiés d'importateurs (des flux entrants provenant d'autres bassins augmentent leur débit). Ceux présentant $Q/(P-ET) < 1$ sont considérés comme exportateurs (des flux sortants

régionaux ne sont pas comptabilisés dans l'écoulement à l'exutoire). Enfin lorsque $Q/(P-ET) = 1$, le bassin est à l'équilibre les flux importés sont égaux aux flux exportés le cas hypothétique des bassins de la Meuse

Bien que cette approche ne puisse expliquer à elle seule les déficits observés, une partie des flux de ces bassins pourrait s'échapper par voie souterraine, réduisant ainsi le débit par rapport aux précipitations efficaces. Cette hypothèse s'appuie sur plusieurs éléments: la topographie moyenne de ces bassins, la perméabilité moyenne de leurs sols (sablo-limoneux, limoneux) et la non-concordance possible entre le bassin hydrogéologique et le bassin versant topographique (voir carte des masses d'eau page 25).

Une étude menée en Wallonie a tenté de quantifier ces flux interbassins en comparant les débits de sous-bassins issus de plus grands BV (Semois, Lesse) (Bouaziz et al., 2018). Plusieurs conclusions en ont été tirées : ces flux demeurent négligeables lorsque les stations de mesure sont situées loin en aval dans la vallée, car la plupart des écoulements souterrains sont alors récupérés par le réseau hydrographique. Les bassins présentant des transferts significatifs sont ceux de superficie inférieure à 500 km², les plus affectés étant ceux de moins de 100 km². Les caractéristiques hydrogéologiques locales peuvent dévier ces flux, et rendre le déficit plus significatif. Ces résultats ne concordent pas tous avec les hypothèses formulées dans l'article de Tóth.

Ceci étant dit, l'hypothèse d'une sous-estimation de l'ETR demeure l'explication la plus plausible à considérer.

5.5 Conclusion générale

Les ressources en eau sont un enjeu majeur du 21^e siècle. Dans le contexte du changement climatique, on observe des changements des cycles hydrologiques à l'échelle globale. Ce travail avait pour but d'étoffer la compréhension de l'évolution des variables hydrologiques sur une période étendue (1984-2024). Cette compréhension est essentielle pour pouvoir anticiper les diminutions de ressources et formuler des stratégies pour les mitiger.

L'analyse a identifié plusieurs tendances générales : une diminution des précipitations au printemps, particulièrement marquée en avril avec une baisse d'environ 40% en 40 ans

pour tous les bassins excepté la Vesdre et la Dendre. Cette diminution s'accompagne d'une baisse proportionnelle des débits.

La variabilité des précipitations diminue fortement en automne. Ceci se caractérise des deux côtés de la variance par une augmentation des faibles précipitations et une diminution des précipitations intenses. Il pleut donc plus constamment en automne (et plus particulièrement en octobre). Cette diminution de la variabilité se traduit également sur les débits.

L'ETR ainsi que l'ETP augmentent dans tous les bassins mais l'intensité d'augmentation reste difficile à quantifier (en raison des incertitudes liées aux produits de réanalyse et de télédétection). Un biais de surestimation de l'ETR estimée par GLEAM4 sur les bassins du district de la Meuse (caractérisés par des forêts plus abondantes) semblerait avoir été mis en évidence en comparant les bilans hydrologiques des différents bassins. Il a également été mis en évidence que GLEAM4 sous-estime l'ETP sur les bassins de l'Escaut, biaisant ainsi le stress hydrique en été. L'article fondateur de GLEAM4 a également identifié des biais saisonniers dans l'estimation de l'ETR : pour les forêts, une sous-estimation hivernale et une surestimation en été et au printemps. Enfin, pour les cultures, une surestimation modérée en hiver et une sous-estimation marquée en été (voir page 9). Cette sous-estimation marquée de l'ETR en été semblerait logique au vu du déficit de débit par rapport aux précipitations efficaces présent dans les BV du district de l'Escaut caractérisés par une plus grande proportion de terres arables. Le constat semblerait logique pour les bassins du district de la Meuse également, vu que le biais hivernal compense en partie le biais estival. Cela se traduisant en un biais diminué au niveau annuel, qui permet d'obtenir un bilan P-ETR très fidèle au débit.

Une autre théorie moins plausible est avancée traitant d'un caractère potentiellement « exportateur » des bassins de l'Escaut (principalement la Dyle et la Dendre). Une partie des flux sortant de ces bassins ne serait pas comptabilisée (contribuant donc à générer un faible débit annuel par rapport aux précipitations efficaces). Des flux sortant passeraient alors peut-être par des nappes connectées à d'autres bassins par exemple.

Une diminution généralisée des niveaux piézométriques moyens est observée dans le district de l'Escaut (Dendre, Dyle et Demer). Deux nappes sont en baisse significative pour la Semois également. Le déficit hydrique sur les dernières années des bilans tend à confirmer le

futur de ces tendances. La littérature a montré que cela n'était pas uniquement attribuable au changement climatique mais aussi à l'affectation des sols, mettant ainsi en évidence la nécessité d'élaborer des plans de gestion de l'affectation des sols pour la préservation des nappes.

Bien que les bilans effectués dans ce travail soient une simplification de la réalité, ils présentent tout de même une dégradation tangible de l'équilibre hydrologique conséquence du changement climatique. Ces bilans ont permis de mettre en évidence le risque accru de déficit hydrique généralisé pour tous les bassins du District de l'Escaut et également mais dans une moindre mesure du District de la Meuse.

5.6 Perspectives

Quelques pistes de recherche émanent de l'écriture de ce mémoire. Tout d'abord, il semble qu'étudier l'impact de l'intensification agricole et de l'évolution de l'occupation du sol sur les bilans hydriques des bassins versants soit nécessaire afin de mieux comprendre l'évolution des variables et la part de cette évolution attribuable aux changements climatiques.

Ensuite, une évaluation approfondie des produits d'ET à l'échelle régionale serait pertinente afin de diminuer les incertitudes liées à leur utilisations. Le produit d'ET GLEAM4 a montré certains biais qui sont difficiles à quantifier exactement. ERA5-Land surestime systématiquement l'ET.

Bien qu'étant une hypothèse secondaire, investiguer la présence de flux souterrains secondaires pouvant influencer négativement le débit à l'exutoire dans les bassins du district de l'Escaut pourrait être intéressant comme l'ont fait Bouaziz et al. (2018) dans leur étude du bassin de la Meuse.

L'imputation des données piézométriques a produit des résultats intéressants. Une étude approfondie visant à optimiser la sélection des modèles, le paramétrage et l'impact du choix des données d'apprentissage en Belgique présenterait un intérêt notable pour améliorer la représentativité des études hydrologiques de longue durée.

D'autres bassins non pris en compte dans cette étude pourraient faire l'objet d'une recherche complémentaire, comme le bassin de la Senne par exemple, traversant Bruxelles, zone à forte pression anthropique. Des petits bassins du district de la Meuse comme le BV de

l'Hermeuton, le BV de la Molinee. Le BV de l'Eau d'heure pourrait également être investigué. Une étude sur l'entièreté du bassin de la Meuse en considérant comme exutoire une station proche de Liège pourrait également être effectuée, nécessitant une collecte de données en France également.

Chapitre 6 : Bibliographie

- Alexander. (2016, mai 26). Sen's Slope / Theil–Sen estimator. *Statistics How To*.
<https://www.statisticshowto.com/sens-slope-theil-sen-estimator/>
- Allen, R. G. (1998). *Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements* (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Éd.). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ASBL Contrat de Rivière Semois-Chiers. (2014). *Contrat de Rivière Semois-Chiers - Protocole d'accord II*.
- Baldocchi, D. D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems : Past, present and future. *Global Change Biology*, 9(4), 479-492. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x>
- Barnard, J., Schenker, N., & Rubin, D. B. (2001). Multiple Imputation. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (p. 10204-10210). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/04680-5>
- Bauwens, A., Sohler, C., & Degré, A. (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.
<https://doi.org/10.5194/hess-15-1745-2011>
- Bauwens, A., Sohler, C., & Degré, A. (2013). Impacts du changement climatique sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau du bassin de la Meuse (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*
- Bekesi, G., McGuire, M., & Moiler, D. (2009). Groundwater Allocation Using a Groundwater Level Response Management Method—Gnangara Groundwater System, Western Australia. *Water Resources Management*, 23(9), 1665-1683.
<https://doi.org/10.1007/s11269-008-9346-5>
- Belgium—European Commission. (2023).
https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-wise-eu/belgium_en
- Bikše, J., Retike, I., Haaf, E., & Kalvāns, A. (2023). Assessing automated gap imputation of regional scale groundwater level data sets with typical gap patterns. *Journal of Hydrology*, 620, 129424. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129424>
- Blauhut, V., Stoelzle, M., Ahopelto, L., Brunner, M. I., Teutschbein, C., Wendt, D. E., Akstinis, V., Bakke, S. J., Barker, L. J., Bartošová, L., Briede, A., Cammalleri, C., Kalin, K. C., De Stefano, L., Fendeková, M., Finger, D. C., Huysmans, M., Ivanov, M., Jaagus, J., ... Živković, N. (2022). Lessons from the 2018–2019 European droughts : A collective need for unifying drought risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(6), 2201-2217. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2201-2022>
- Bouaziz, L., Weerts, A., Schellekens, J., Sprokkereef, E., Stam, J., Savenije, H., & Hrachowitz, M. (2018). Redressing the balance : Quantifying net intercatchment groundwater flows. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6415-6434.
<https://doi.org/10.5194/hess-22-6415-2018>
- Bruno, G., & Duethmann, D. (2024). Increases in Water Balance-Derived Catchment Evapotranspiration in Germany During 1970s–2000s Turning Into Decreases Over the Last Two Decades, Despite Uncertainties. *Geophysical Research Letters*, 51(6), e2023GL107753.
<https://doi.org/10.1029/2023GL107753>

- Bruno, G., Strohmenger, L., & Duethmann, D. (2024). *Imprints of Increases in Evapotranspiration on Decreases in Streamflow during dry Periods, a large-sample Analysis in Germany*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2678>
- Budyko, M. I. (1961). The Heat Balance of the Earth's Surface. *Soviet Geography*, 2(4), 3-13. <https://doi.org/10.1080/00385417.1961.10770761>
- Can, M., Vaheddoost, B., & Safari, M. J. S. (2025). Data Reconstruction for Groundwater Wells Proximal to Lakes : A Quantitative Assessment for Hydrological Data Imputation. *Water*, 17(5), 718. <https://doi.org/10.3390/w17050718>
- Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid. (2022a). *Demerbekken*. Stroomgebiedbeheerplannen 2022-2027. <https://sgbp.integraalwaterbeleid.be/bekkens/demberbekken>
- Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid. (2022b). *Denderbekken*. Stroomgebiedbeheerplannen 2022-2027. <https://sgbp.integraalwaterbeleid.be/bekkens/denderbekken>
- Copernicus Climate Change Service. (2019). *ERA5-Land Daily Aggregated—ECMWF Climate Reanalysis* [Jeu de données]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/CDS.68D2BB30>
- CR Dendre. (2017). *Contrat Rivière Dendre, Programme d'actions 2017—2019*.
- CRV asbl. (2017). *CONTRAT de RIVIÈRE du sous-bassin hydrographique de la VESDRE*.
- Databank Ondergrond Vlaanderen. (s. d.). *Bepalen gemiddelde grondwaterstand op een plaats | DOV*. Consulté 13 août 2025, à l'adresse <https://www.dov.vlaanderen.be/page/bepalen-gemiddelde-grondwaterstand-op-een-plaats>
- De Niel, J., & Willems, P. (2019). Climate or land cover variations : What is driving observed changes in river peak flows? A data-based attribution study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2), 871-882. <https://doi.org/10.5194/hess-23-871-2019>
- Degré, A., & Grandry, M. (2021). Rain, floods, droughts : Are extremes becoming the norm? *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 1-10. <https://doi.org/10.25518/0037-9565.10623>
- de Wit, M. J. M., van den Hurk, B. J. J. M., Warmerdam, P. M. M., Torfs, P. J. J. F., Roulin, E., van Deursen, W. P. A., W. P. A. van Deursen, & van Deursen, W. P. A. (2007). Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. *Climatic Change*, 82(3), 351-372. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9195-2>
- Direction de la Gestion Hydrologique. (s. d.). *Réseau de stations de mesures de débit en Wallonie* [Jeu de données]. <https://hydrometrie.wallonie.be/home/observations/debit.html?>
- Du, W., Cote, D., & Liu, Y. (2023). SAITS : Self-Attention-based Imputation for Time Series. *Expert Systems with Applications*, 219, 119619. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119619>
- Du, W., Yang, Y., Qian, L., Wang, J., & Wen, Q. (2023). *PyPOTS : A Python Toolkit for Machine Learning on Partially-Observed Time Series* (arXiv:2305.18811). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.18811>
- EDIWALL - Service Public de Wallonie. (2021). *Fiches technique des barrage de la Gileppe, de la Vesdre*.
- European Space Agency. (2024). *Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model(COP30)* [Jeu de données]. Distributed by OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>

- Folton, N., Martin, E., Arnaud, P., L'Hermite, P., & Tolsa, M. (2019). A 50-year analysis of hydrological trends and processes in a Mediterranean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(6), 2699-2714. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2699-2019>
- GIEC. (2023). *IPCC, 2023 : Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Grandry, M., Gailliez, S., Brostaux, Y., & Degré, A. (2020). Looking at trends in high flows at a local scale : The case study of Wallonia (Belgium). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31, 100729. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100729>
- Hydrologisch Informatie Centrum. (s. d.). *Data ondergrond vlaanderen—Grondwatermeetnetten, Grondwaterlichaamen map* [Jeu de données]. <https://waterinfo.vlaanderen.be/Meetreeksen>
- Hydrométrie Wallonie. (s. d.). *Réseaux de mesure*. Consulté 13 août 2025, à l'adresse <https://hydrometrie.wallonie.be/home/en-savoir-plus/reseaux-de-mesure.html>
- INRA. (2025a). *Bilan hydrique*. [http://wikibardig.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Bilan_hydrique_\(HU\)](http://wikibardig.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Bilan_hydrique_(HU))
- INRA. (2025b). *Bilan hydrologique*. [http://wikibardig.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Bilan_hydrologique_\(HU\)](http://wikibardig.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Bilan_hydrologique_(HU))
- Institut wallon Evaluation, Prospective et Statistique. (2025, juin 1). Consommation d'eau de distribution. *Iweeps*. <https://www.iweeps.be/indicateur-statistique/consommation-deau-de-distribution/>
- IRM. (2020a). *Atlas climatique*. KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/atlas-climatique/cartes-climatiques/temperature-de-lair/moyenne/annuel>
- IRM. (2020b). *Rapport climatique 2020—Institut Royal Météorologique*. https://www.meteo.be/resources/misc/climate_report/RapportClimatique-2020.pdf
- IRM - Avril. (s. d.). KMI. Consulté 17 août 2025, à l'adresse <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2024/avril>
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Fallatah, O., & Kirchner, J. W. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, 625(7996), 715-721. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>
- Journée, M., Goudenhoofdt, E., Vannitsem, S., & Delobbe, L. (2023). *Quantitative rainfall analysis of the 2021 mid-July flood event in Belgium*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-542>
- Kendall, M.G. (1948). *Rank correlation methods*. Griffin.
- Khan, M. S., Liaqat, U. W., Baik, J., & Choi, M. (2018). Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 256-268. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.022>
- Kuzma, S., Saccoccia, L., & Chertock, M. (2023, août 16). *25 Countries, Housing One-Quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress—WRI*.
- Mianabadi, A., Davary, K., Pourreza-Bilondi, M., & Coenders-Gerrits, A. M. J. (2020). Budyko framework; towards non-steady state conditions. *Journal of Hydrology*, 588, 125089. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125089>

- Miralles, D. G., Bonte, O., Koppa, A., Baez-Villanueva, O. M., Tronquo, E., Zhong, F., Beck, H. E., Hulsman, P., Dorigo, W., Verhoest, N. E. C., & Haghdoust, S. (2025). GLEAM4 : Global land evaporation and soil moisture dataset at 0.1° resolution from 1980 to near present. *Scientific Data*, 12, 416. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04610-y>
- Miralles, D., Koppa, A., & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2023). *The Climate Data Guide : Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM)*. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/global-land-evaporation-amsterdam-model-gleam>
- Ntegeka, V., & Willems, P. (2008). Trends and multidecadal oscillations in rainfall extremes, based on a more than 100-year time series of 10 min rainfall intensities at Uccle, Belgium. *Water Resources Research*, 44(7). <https://doi.org/10.1029/2007wr006471>
- Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Piézométrie Wallonie. (s. d.). *Notions de piézométrie*. Consulté 13 août 2025, à l'adresse <https://piezometrie.wallonie.be/home/en-savoir-plus/notions-de-piezometrie.html>
- Royal Meteorological Institute catalogue. (s. d.). *Gridded observational data* [Jeu de données]. Consulté 29 juin 2025, à l'adresse https://opendata.meteo.be/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/RMI_DATASET_GRIDDEDOBS
- Running, S., Mu, Q., & Zhao, M. (2021). *MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061* [Jeu de données]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.061>
- Running, S., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2019, juin). *User's 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)*. https://lpdaac.usgs.gov/documents/494/MOD16_User_Guide_V6.pdf
- Schaller, M. F., & Fan, Y. (2009). River basins as groundwater exporters and importers : Implications for water cycle and climate modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4), 2008JD010636. <https://doi.org/10.1029/2008JD010636>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Service Public de Wallonie. (2021). *Plans de Gestion des Risques d'Inondation 2022-2027. Districts hydrographiques internationaux de la Meuse, de l'Escaut, du Rhin et de la Seine*.
- Service Public de Wallonie - Portail Infrastructures. (s. d.). *Une gestion de l'eau efficace face à la sécheresse*. Consulté 15 août 2025, à l'adresse <https://infrastructures.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/routes/home/infrastructures-et-vous/publications/rapport-dactivites-2022/je-suis-un-utilisateur-des-voies-deau/une-gestion-de-leau-efficace-face-a-la-secheresse.html>
- Service Public Fédéral Belge. (2025, juin 12). *Densité de la population* | Statbel. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/population/structure-de-la-population/densite-de-la-population>
- SPW. (2005a). *État des lieux des sous-bassins hydrographiques Tome I : État des lieux Sous-bassin de la Dendre*.
- SPW. (2005b). *État des lieux des sous-bassins hydrographiques Tome I : État des lieux Sous-bassin de la Lesse*.

- SPW. (2005c). *État des lieux des sous-bassins hydrographiques Tome I : État des lieux Sous-bassin de la Vesdre*.
- SPW. (2005d). *État des lieux des sous-bassins hydrographiques Tome I : État des lieux Sous-bassin Dyle—Gette*.
- SPW. (2005e). *État des lieux des sous-bassins hydrographiques Tome I : État des lieux Sous-bassin Semois—Chiers*.
- SPW. (2018). *Pluviométrie—État de l’environnement wallon*. Etat de l’environnement wallon. <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/PHYS 1.html>
- SPW. (2024, mai 27). *Prélèvements en eau—État de l’environnement wallon*. Etat de l’environnement wallon. <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/RESS 2.html>
- Staudinger, M., Stoelzle, M., Seeger, S., Seibert, J., Weiler, M., & Stahl, K. (2017). Catchment water storage variation with elevation. *Hydrological Processes*, 31(11), 2000-2015. <https://doi.org/10.1002/hyp.11158>
- Tabari, H., Taye, M. T., & Willems, P. (2015). Water availability change in central Belgium for the late 21st century. *Global and Planetary Change*, 131, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.05.012>
- Thomas, C., Dollé, F., Orban, P., Dassargues, A., & Brouyère, S. (2019). *Développement d’un module SIG de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines et de risques et application aux principales masses d’eau souterraine de Wallonie. Délivrable D03 : Description des applications réalisées et cartes de vulnérabilité produites avec l’outil SIG*.
- Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16), 4795-4812. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>
- Unnisa, Z., Govind, A., Lasserre, B., & Marchetti, M. (2023). Water Balance Trends along Climatic Variations in the Mediterranean Basin over the Past Decades. *Water*, 15(10), 1889. <https://doi.org/10.3390/w15101889>
- Venegas-Cordero, N., Marcinkowski, P., Stachowicz, M., & Grygoruk, M. (2024). On the role of water balance as a prerequisite for aquatic and wetland ecosystems management : A case study of the Biebrza catchment, Poland. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 24(4), 808-819. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2024.08.001>
- Vermeiren, P. (2023). *Évaluation de la sensibilité des ressources en eau du bassin versant de l’Amblève et de l’Ourthe aux changements climatiques* [Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain]. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:43454>
- Vlaamse Milieu Maatschappij. (2023). *Geografische indeling van watersystemen* [Jeu de données]. <https://www.vlaanderen.be/datavindplaats/catalogus/geografische-indeling-van-watersystemen-28-04-2023>
- Vu, M. T., Jardani, A., Massei, N., & Fournier, M. (2021). Reconstruction of missing groundwater level data by using Long Short-Term Memory (LSTM) deep neural network. *Journal of Hydrology*, 597, 125776. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125776>
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236-244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- WATERINFO - Woordenlijst. (s. d.). Consulté 13 août 2025, à l’adresse https://waterinfo.vlaanderen.be/default.aspx?path=NL/Algemene_Info/Woordenlijst&KL=fr
- Xie, Z., Yao, Y., Tang, Q., Liu, M., Fisher, J. B., Chen, J., Zhang, X., Jia, K., Li, Y., Shang,

K., Jiang, B., Yang, J., Yu, R., Zhang, X., Guo, X., Liu, L., Ning, J., Fan, J., & Zhang, L. (2024). Evaluation of seven satellite-based and two reanalysis global terrestrial evapotranspiration products. *Journal of Hydrology*, 630, 130649. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130649>

Zhu, W., Tian, S., Wei, J., Jia, S., & Song, Z. (2022). Multi-scale evaluation of global evapotranspiration products derived from remote sensing images : Accuracy and uncertainty. *Journal of Hydrology*, 611, 127982. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127982>

Chapitre 7 : Annexes

Annexe A : Evaluation de la performance de différents produits d'ETR

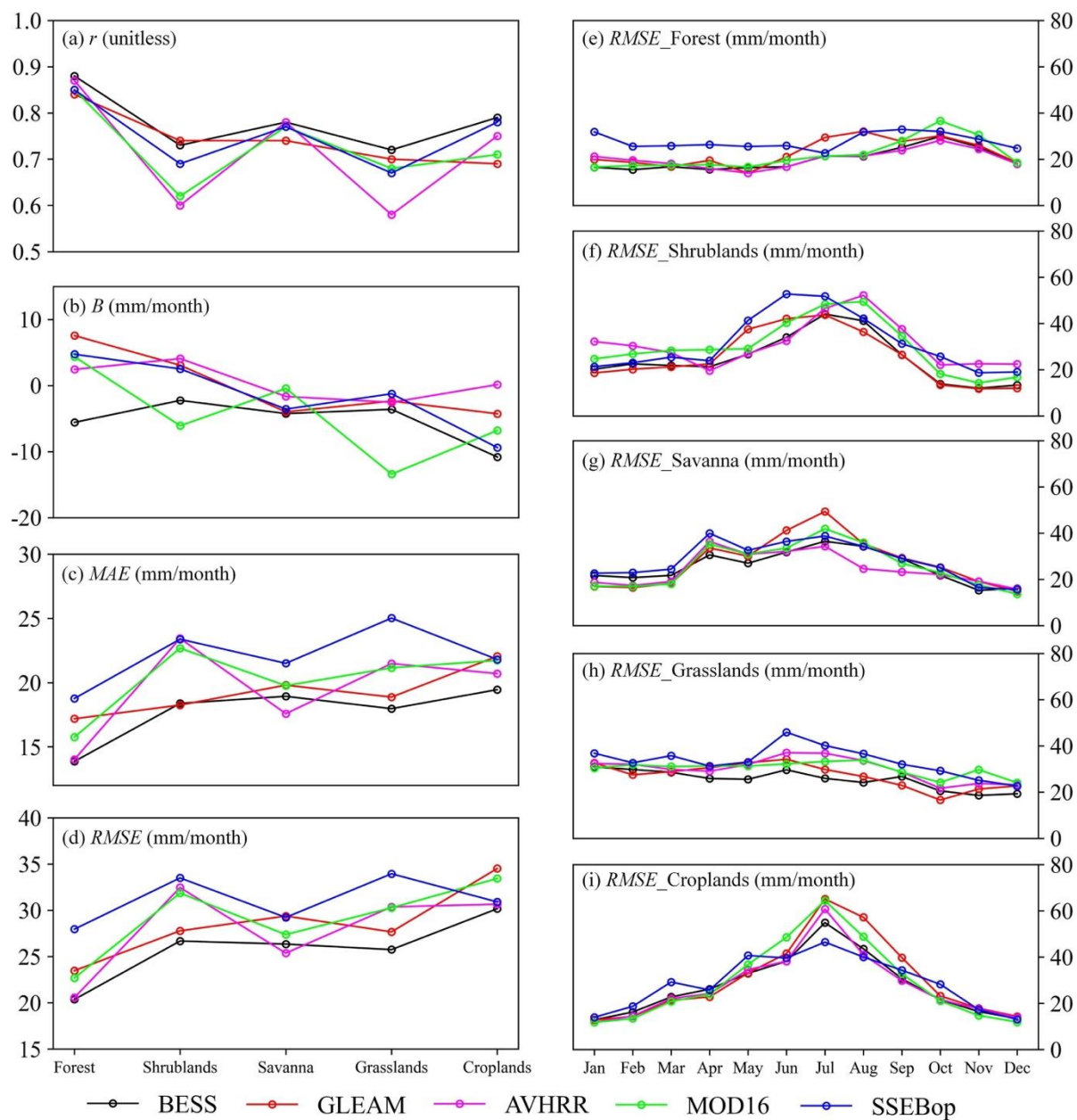


Figure 7-1 : Comparaison de 5 produits d'ET sur différents sols et saisons (Zhu et al., 2022)

Annexe B : Carte des types de sols de Wallonie, mise en évidence de la zone du BV du Viroin et carte des type de sols Demer, Dendre et résumé des sols rencontrés pour chacun des BV

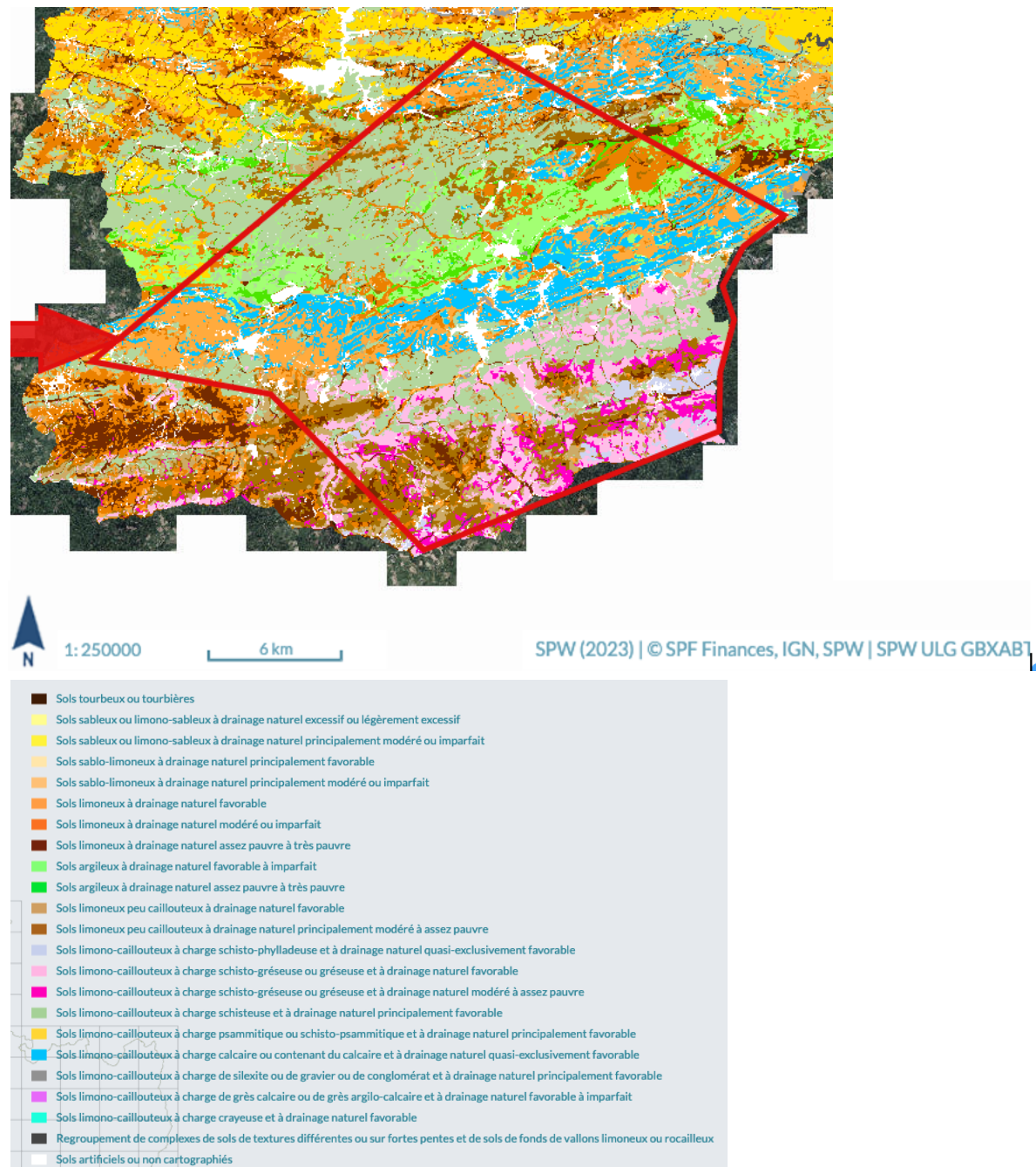


Figure 7-2 : Carte des sols de Wallonie, zoom sur le bassin du Viroin

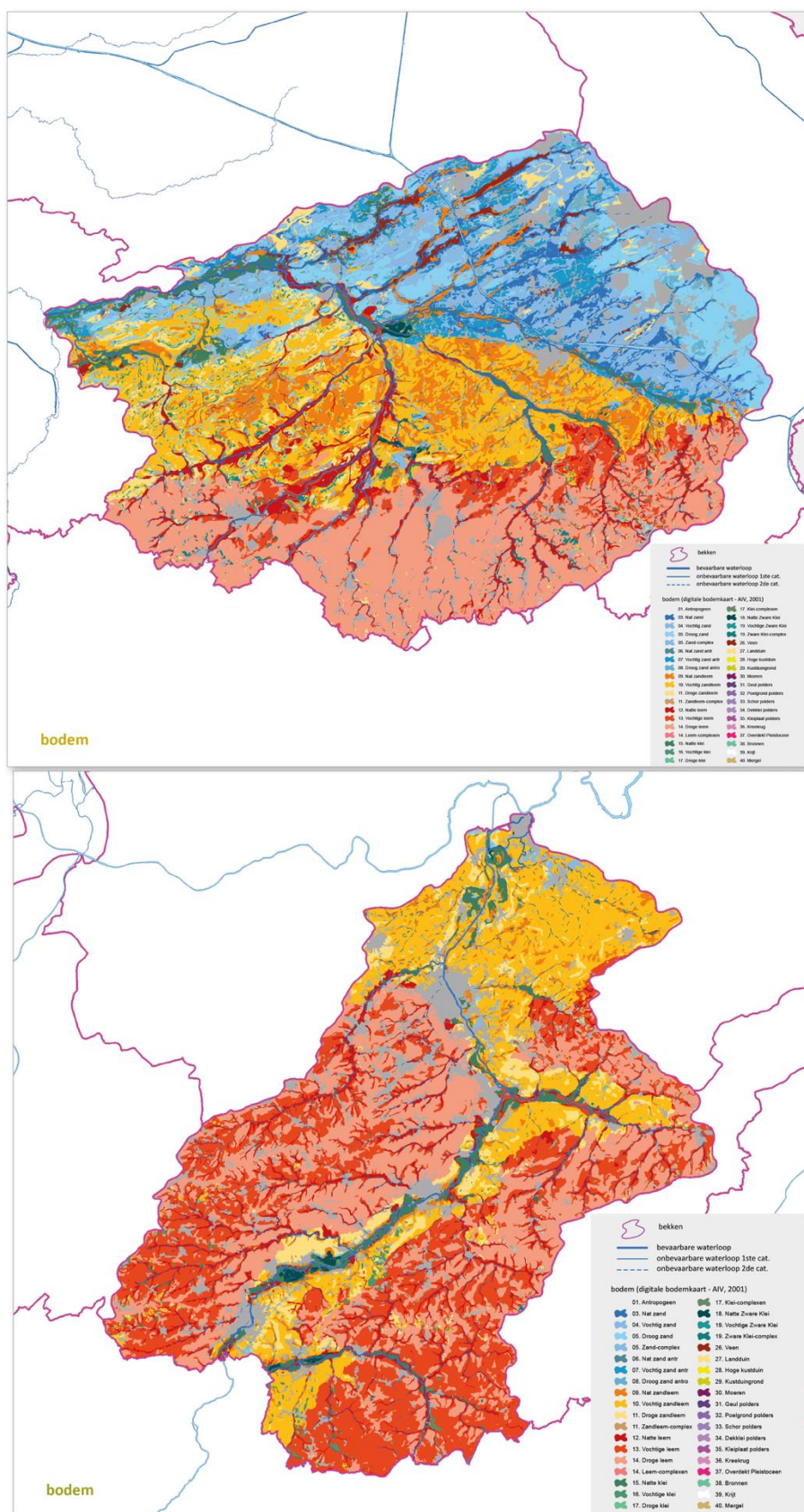


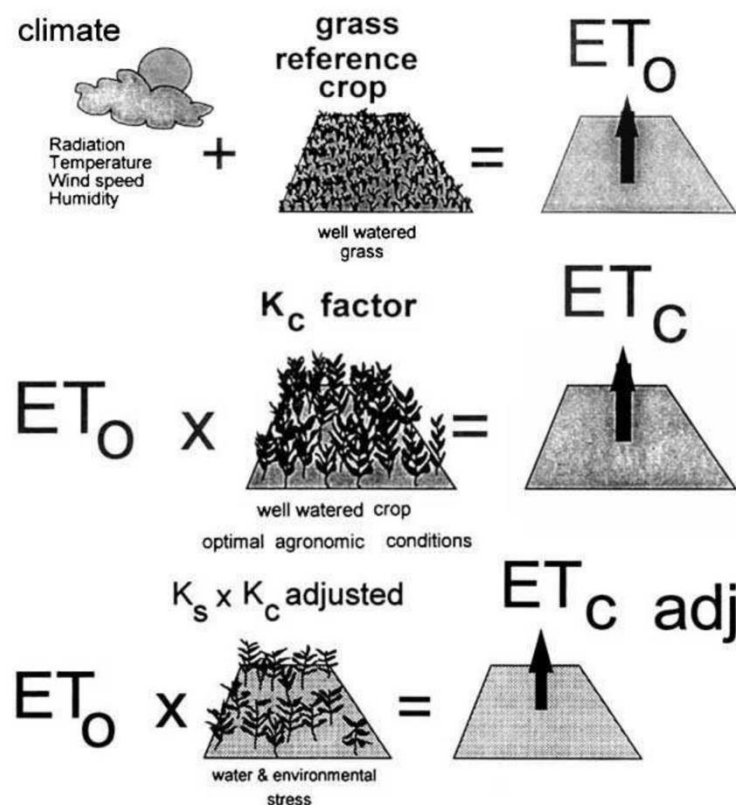
Figure 7-3 : Sols rencontrés pour le bassin de la Demer (au-dessus) et de la Dendre (en dessous). Source : Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid



Figure 7-4 : Diagrammes camemberts des types de sols rencontrés pour les BV. Certains bassins (hachuré) ne disposent pas de données quantitatives dans les sources alors des informations qualitatives sont données

Annexe C : Méthodologie de calcul du Stress Hydrique

FIGURE 4. Reference (ET_0), crop evapotranspiration under standard (ET_c) and non-standard conditions ($ET_{c\ adj}$)



Where field conditions differ from the standard conditions, correction factors are required to adjust ET_c . The adjustment reflects the effect on crop evapotranspiration of the environmental and management conditions in the field.

Figure 7-5 : Méthodologie de calcul du facteur de stress hydrique. K_c est le coefficient cultural, ET_c correspond à l'ETP, ET_{cadj} correspond à l'évapotranspiration réelle et K_s au facteur de stress hydrique. Source: FAO

Annexe D : Tableaux récapitulatifs des piézomètres et lithologie, unités hydrologiques et porosités associées

Tableau 10 : Récapitulatif des piézomètres du bassin de la Lesse.

Code puit	Code masse d'eau	Lithologie	UH principales de la ME	Porosité des UH	Porosité effective considérée
PZ4204	RWM100	Schiste, Grès	aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien inférieur	0.05	0.05
PZ39719	RWM023	Très variable (Limon, argile,	Aquifère - aquitard - aquiclude de l'Hastarien Aquifère des grès du Famennien	0.05 0.05 0.05	0.05

		calcaire, schiste, grès)	Aquifère des calcaires du Givetien - Frasnien Aquifère de L'Eifelien Aquitard à niveau aquicludes du dévonien inférieur	0.05 0.05	
PZ34038	RWM023				0.05
PZ34047	RWM023				0.05
PZ34252	RWM021		Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller Aquifère des calcaires du Carbonifère Aquifère - Aquitard - Aquiclude de l'Hastarien Aquifère des grès du Famennien Aquiclude du Famennien - Frasnien Aquifère des calcaires du Givetien - Frasnien Aquitard de l'Eifelien Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur Aquitard à niveaux aquifères du socle cambro-silurien	0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05 0.05	0.05
PZ34206	RWM021				0.05

Tableau 11 : Récapitulatif des piézomètres du bassin de la Semois

Code puit	Code masse d'eau	Lithologie	UH principales de la ME	Porosité des UH	Porosité effective considérée
PZ1679	RWM092	Marne, grès	Aquifère de Florenville Aquitard d'Arlon - Hondelange Aquiclude à niveaux aquifères de Jamoigne	0.1 0.2 0.4	0.1
PZ7134	RWM092				0.1
PZ5106	RWM092				0.1
PZ4544	RWM092				0.1
PZ6895	RWM092				0.1
PZ716	RWM092				0.1
PZ6963	RWM092				0.1
PZ55293	RWM092				0.05
PZ140	RWM103	schistes, grès, quartzite	Pas d'informations	/	0.03*
PZ7993	RWM103				0.03*

Tableau 12 : Récapitulatif des piézomètres du bassin de la Dyle

Code puit	Code masse d'eau	Lithologie	UH principales de la ME	Porosité des UH	Porosité effective considérée
PZ83	RWE051	Sables, Grès	Aquifère des sables	0.15	0.15
PZ3377	RWE051				0.15
PZ2835	RWE051				0.15
PZ1099	RWE051				0.15
PZ6565	RWE051				0.15
PZ5033	RWE051				0.15
PZ4213	RWE160	Grès, quartz, schiste	Aquifère du socle cambro-silurien	0.05	0.05
PZ7214	RWE160				0.05

Tableau 13 : Récapitulatif des piézomètres du bassin de la Vesdre

Code puit	Code masse d'eau	Lithologie	UH principales de la ME	Porosité des UH	Porosité effective considérée
PZ8126	RWM141	Calcaire, grès	Aquifère des calcaires dévono-carbonifères Aquifère des grès du Fammennien	0.02 0.05	0.02
PZ35416	RWM141				0.02
PZ6809	RWM151	Calcaire, grès Schiste	Aquifère des sables du Santonien Aquifère - Aquitard de Vaals Aquifère des craies du Crétacé	0.15 0.15 0.15	0.15
PZ7100	RWM151				0.15
PZ35576	RWM142	Calcaire, grès	Aquifère des calcaires dévono-carbonifères Aquifère des grès du Famennien Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller	0.02 0.05 0.05	0.04
PZ35656	RWM142				0.04
PZ35675	RWM142				0.04

Tableau 14 : Récapitulatif des piézomètres du bassin du Viroin

Code puit	Code masse d'eau	Lithologie	UH principales de la ME	Porosité des UH	Porosité effective considérée
PZ34043	M023	Très variable (Limon, argile, calcaire, schiste, grès)	Aquifère - aquitard - aquiclude de l'Hastarien Aquifère des grès du Famennien Aquifère des calcaires du Givetien - Frasnien Aquifère de L'Eifelien Aquitard à niveau aquicludes du dévonien inférieur	0.05 0.05 0.05 0.05 0.05	0.05
PZ30638	M023				0.05
PZ8009	M023				0.05
PZ34033	M023				0.05

Tableau 15 : Récapitulatif des piézomètres du bassin de la Dendre

Code puit		Code masse d'eau	Lithologie	UH principales de la ME	Porosité des UH	Porosité effective considérée
PZ1964		RWE013	Calcaire, Grès	Aquifère des sables du Paléocène Aquifère des calcaires dévono-carbonifères	0.15 0.02	0.05
PZ1185		RWE013				0.05
PZ25001		RWE013				0.05
PZ7117		RWE013				0.05
PZ6015		RWE013				0.05
PZ25741		RWE013				0.05
PZ4217		RWE013				0.05
PZ1485		RWE013				0.05
PZ93502		RWE160	Grès, quartz, schiste	Aquifère du socle cambro-silurien	0.05	0.05
PZ93525		RWE160				0.05
2-0433	58,48	CVS_0800_GWL_3 (BEVL028)	Sables	Aquifère yprésien	/	0.2

Tableau 16 : Récapitulatif des piézomètres du bassin de la Demer

Code puit		Code masse d'eau	Lithologie	UH principales de la ME	Porosité des UH	Porosité effective considérée
PZ33852	/	RWE053	Sable, argile	Aquifère des sables du Paléocène	0.15	0.15
7-0210	73,31	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Quartaire aquifersystemen		0.15
7-0546c	78,95	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Zand van Diest		0.15
7-0141	89,46	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Quartaire aquifersystemen		0.15
7-0545b	49,18	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Zand van Bolderberg		0.15
7-0198	99,65	BLKS_0400_GWL_1S (BEVL004)	Sable (argileux)	Zand van Neerrepn		0.15
7-0556	41,21	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Zand van Bolderberg		0.15
7-0559c	35,84	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Zand van Bolderberg		0.15
7-0211	35,68	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Kempens Aquifersysteem		0.15
7-0553a	25,56	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Zand van Diest		0.15
2-0105	23,45	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Centrale zanden van de Kempen		0.15
2-0436b	17,75	CKS_0200_GWL_1 (BEVL031)	Sable, argile	Zand van Diest		0.15
2-0110	19,59	CKS_0250_GWL_1 (BEVL034)	Sable	Zand van Diest		0.2
2-0215	18,67	CKS_0250_GWL_1 (BEVL034)	Sable	Quartaire aquifersystemen		0.2
2-0027	47,87	CKS_0250_GWL_1 (BEVL034)	Sable	Zand van Diest		0.2
2-0118	33,60	BLKS_0160_GWL_1S (BEVL002)	Sable, gravier, limon et argile	Quartaire aquifersystemen		0.15
2-0423	39,52	BLKS_0400_GWL_1S (BEVL004)	Sable (argileux)	Onder-Oligoceen Aquifersysteem		0.15
2-0439b	52,87	BLKS_0600_GWL_1 (BEVL007)	Sable	Ledo Paniseliaan Brusseliaan Aquifersysteem		0.2

7-0541b	40,37	BLKS_1000_GWL_1S (BEVL010)	Sable fin, argile-tuf, marne	Landeniaan Aquifersysteem		0.15
2-0425	42,46	BLKS_1000_GWL_1S (BEVL010)	Sable fin, argile-tuf, marne	Landeniaan Aquifersysteem		0.15
2-0113	70,24	BLKS_0600_GWL_1 (BEVL007)	Sable	Zand van Brussel		0.2
7-0550	120,90	BLKS_1000_GWL_1S (BEVL010)	Sable fin, argile-tuf, marne	Versteend deel van Lincet		0.1

Annexe E : Corrélations entre piézomètres (Viroin et Lesse)

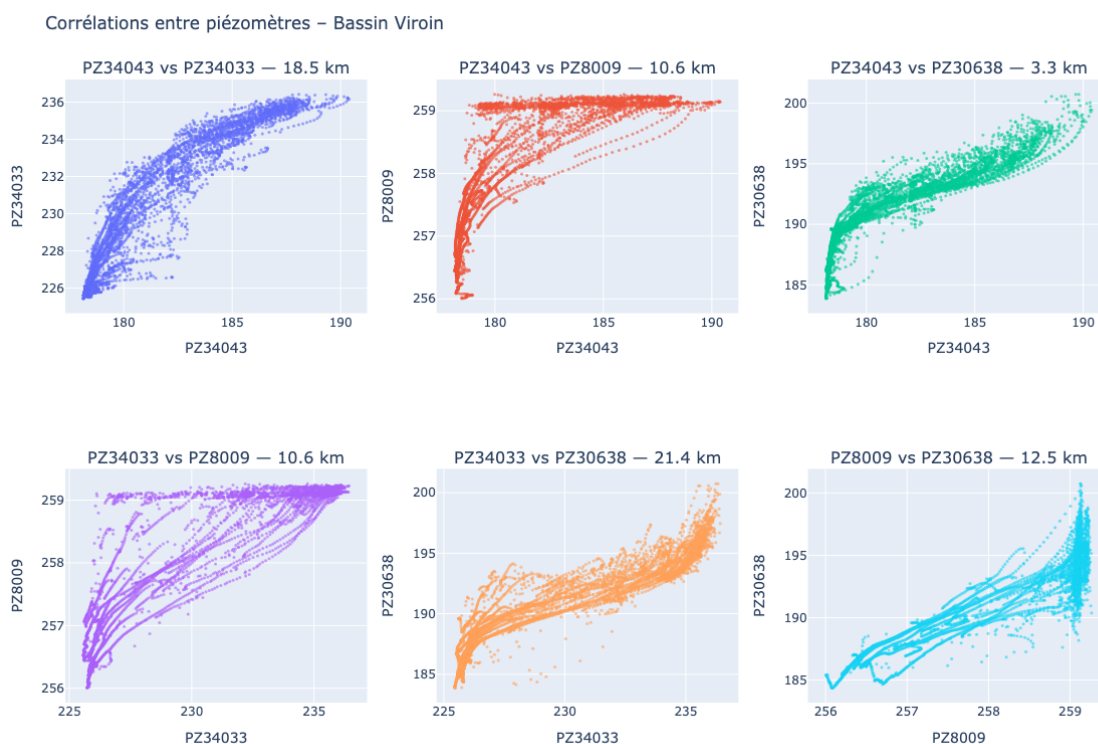


Figure 7-6 – Analyse de corrélation des niveaux piézométriques (en m) entre les piézomètres du bassin du Viroin. Chaque sous-graphique présente la relation entre une paire de piézomètres avec un piézomètre représenté en abscisse et l'autre en ordonnée. La distance entre les piézomètres est indiquée dans le titre. Cette analyse permet d'évaluer la capacité d'estimation des niveaux d'un piézomètre par un autre piézomètre

Corrélations entre piézomètres – Bassin Lesse

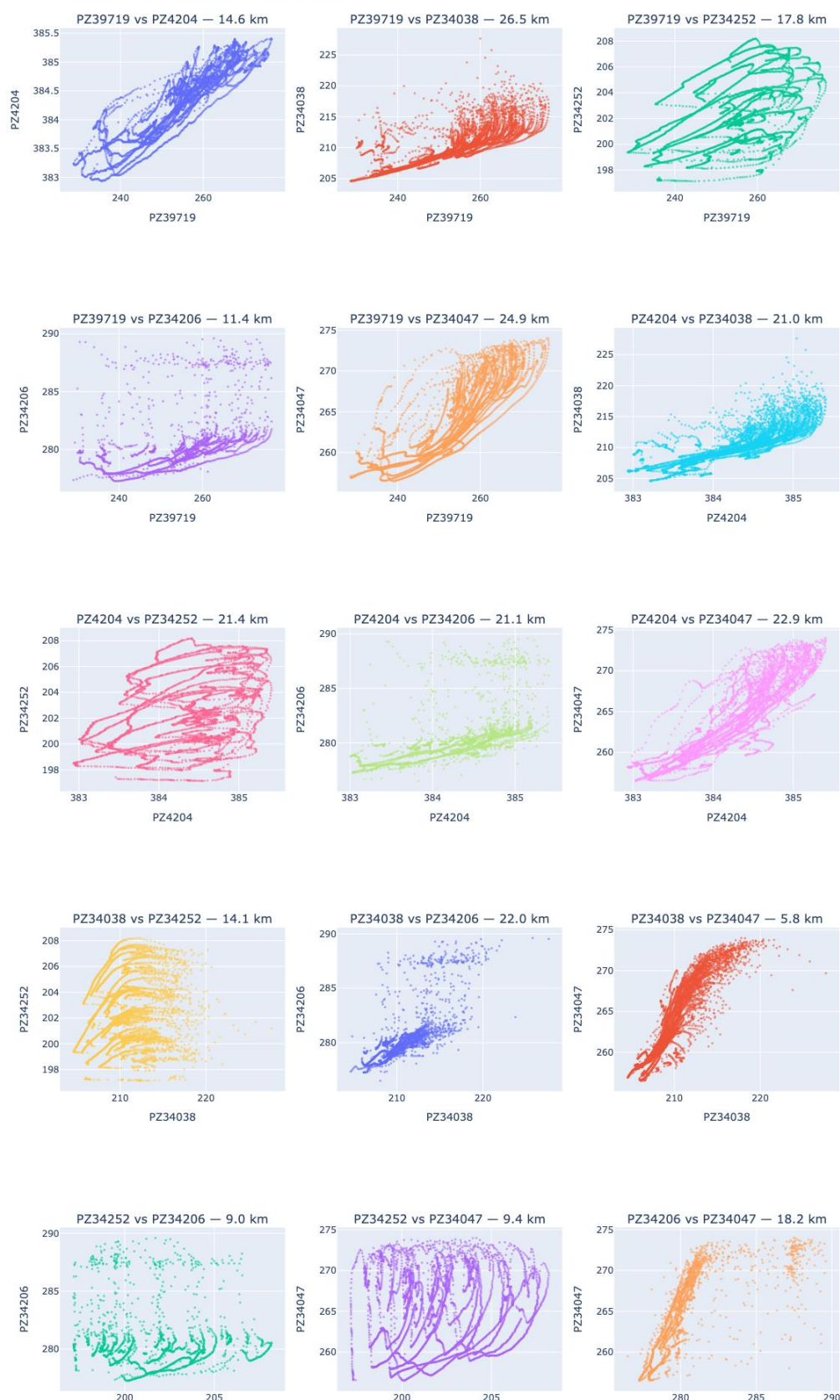


Figure 7-7 – Analyse de corrélation des niveaux piézométriques (en m) entre les piézomètres du bassin de la Lesse. Chaque sous-graphique présente la relation entre une paire de piézomètres avec un piézomètre représenté en abscisse et l'autre en ordonnée. La distance entre les piézomètres est indiquée dans le titre. Cette analyse permet d'évaluer la capacité d'estimation des niveaux d'un piézomètre par un autre piézomètre

Annexe F : Jeu de données de contrôle pour l'imputation

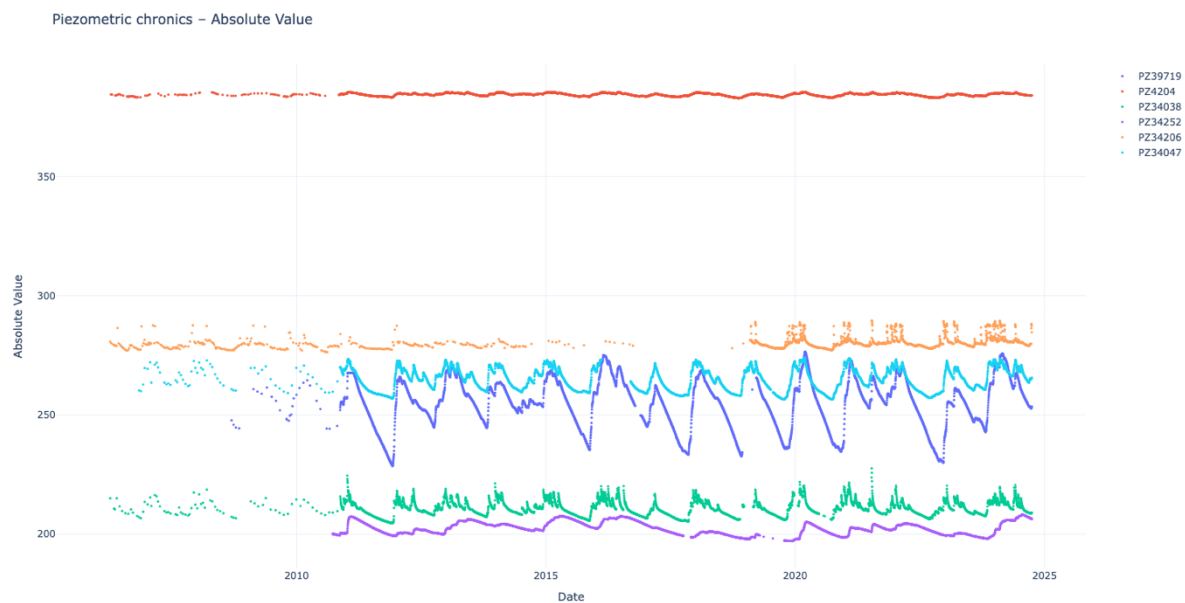


Figure 7-8 : Dataset "Filtered Period" - Chroniques piézométriques de référence du bassin de la Lesse (2006-2024) Présentation des séries piézométriques complètes du bassin de la Lesse sur la période d'étude filtrée. Ces chroniques, caractérisées par une continuité temporelle satisfaisante pour permettre l'évaluation des performances d'imputation du modèle SAITS.

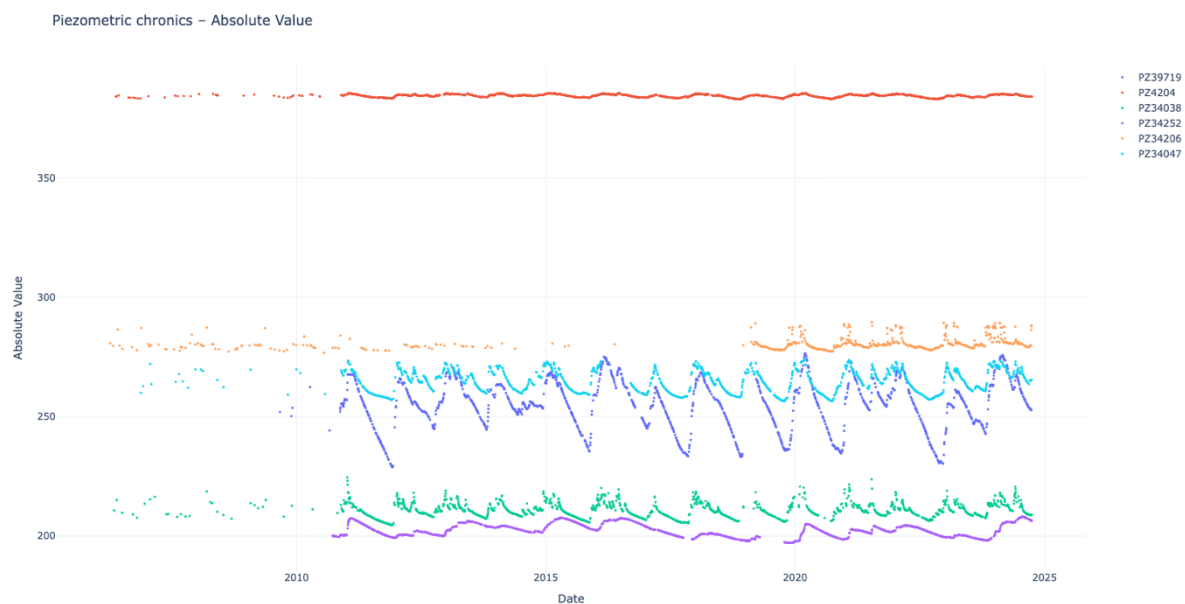


Figure 7-9 : Dataset "Creamed Full" - Chroniques piézométriques avec écrémage aléatoire (70% de données supprimées) Visualisation des chroniques piézométriques après suppression aléatoire de 70% des valeurs sur l'ensemble de la période 2006-2024.

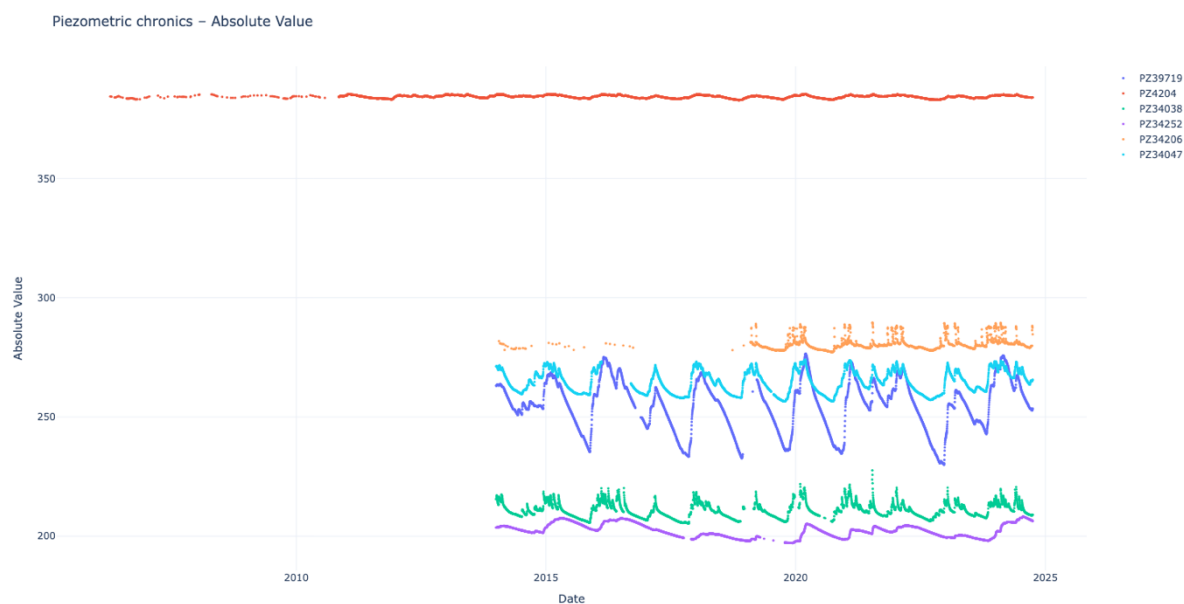


Figure 7-10 : Dataset "Gap All But 1" - Chroniques avec suppression de période complète (2006-2014)
Représentation des chroniques piézométriques où les données antérieures à 2014 ont été supprimées pour tous les piézomètres à l'exception d'un

Annexe G : Jeu de données de contrôle (gap_all_but1) imputés

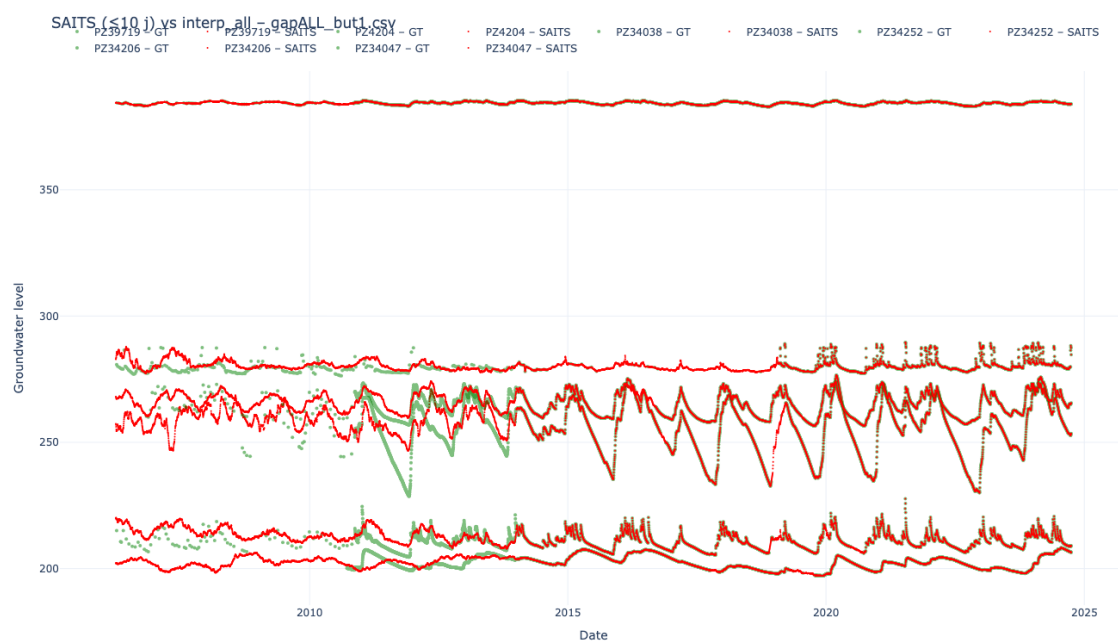


Figure 7-11 : Imputation du dataset gap_all_but_1 utilisant uniquement les piézomètres comme variables d'entrée. Les valeurs en vert correspondent aux observations réelles

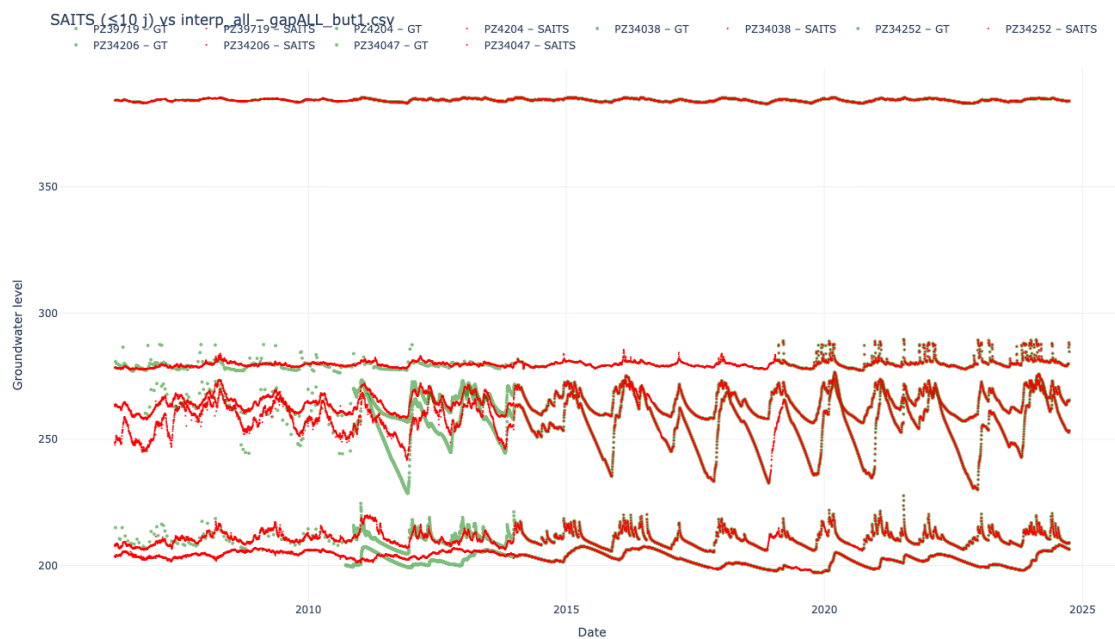


Figure 7-12 : Imputation du dataset gap_all_but_1 utilisant les piézomètres et les précipitations comme variables d'entrée. Les valeurs en vert correspondent aux observations réelles

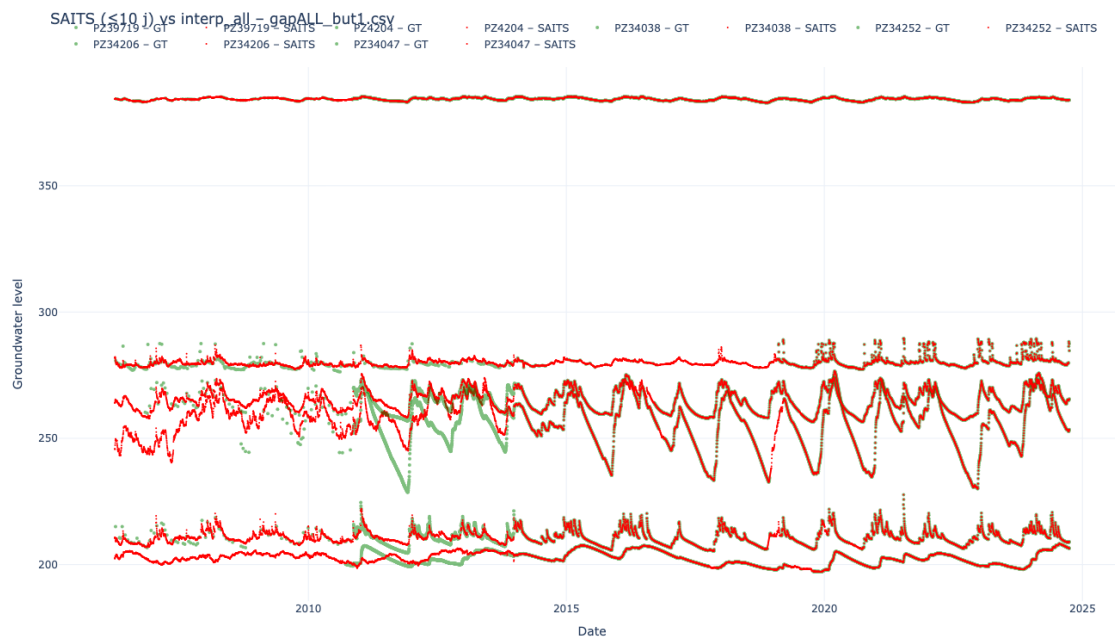


Figure 7-13 : Imputation du dataset gap_all_but_1 utilisant les piézomètres et le débit comme variables d'entrée. Les valeurs en vert correspondent aux observations réelles

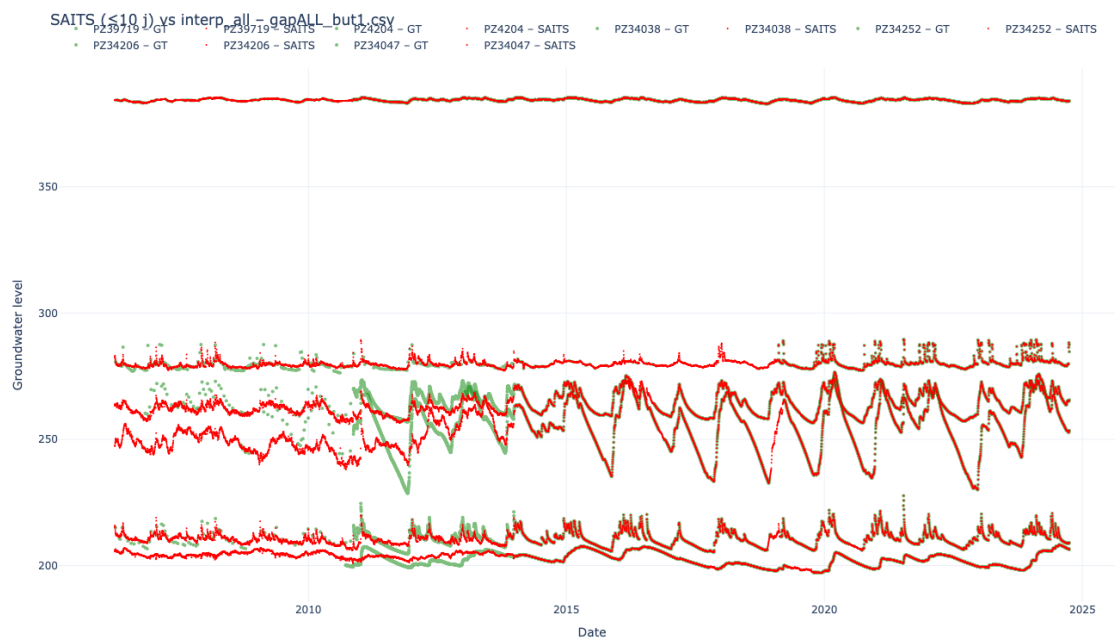


Figure 7-14: Imputation du dataset *gap_all_but_1* utilisant uniquement les piézomètres, les précipitations et le débit comme variables d'entrée. Les valeurs en vert correspondent aux observations réelles

Annexe H : Séries chronologiques des piézomètres de chaque bassin avec valeurs imputée en gris

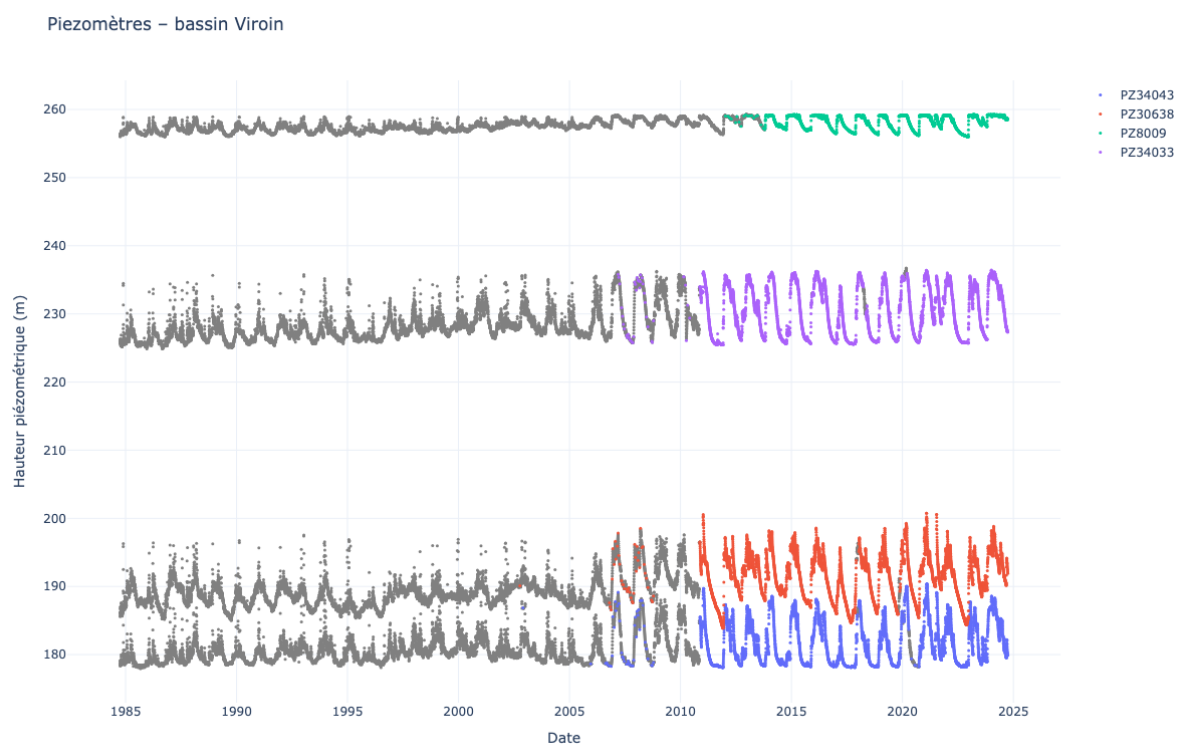


Figure 7-15 : Chroniques piézométriques du bassin du Viroin. Les données imputées sont en gris

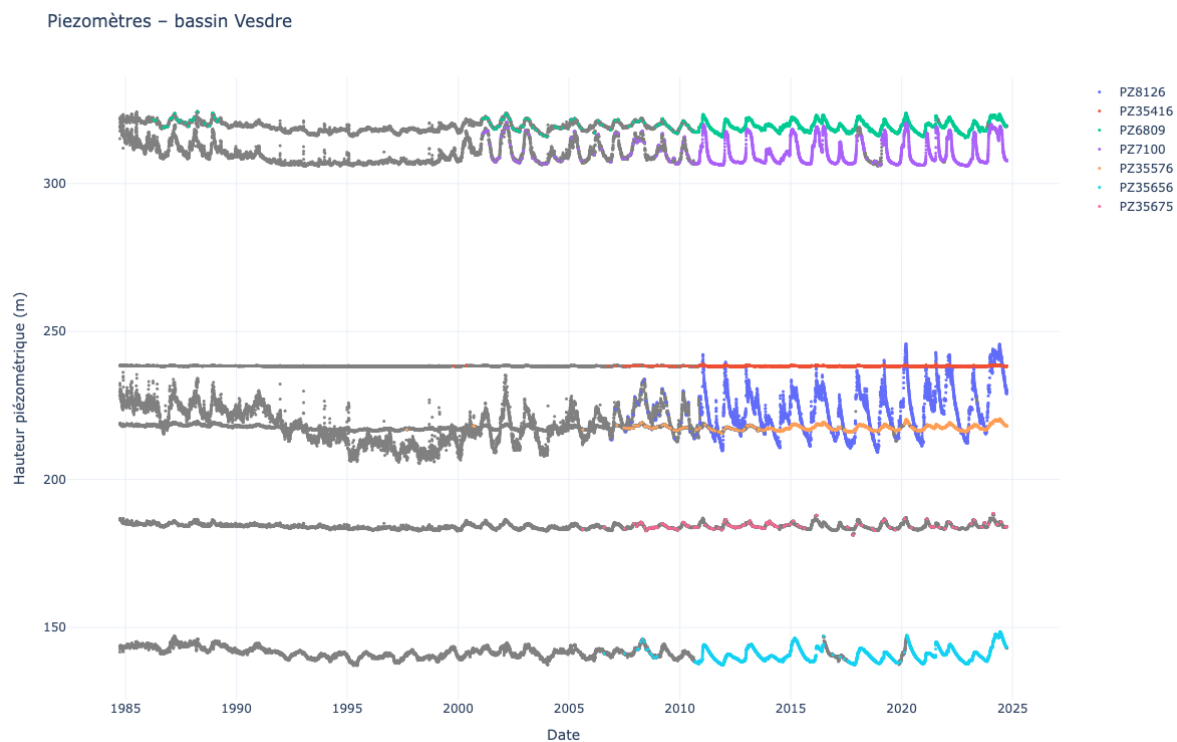


Figure 7-17 : Chroniques piézométriques du bassin de la Vesdre. Les données imputées sont en gris

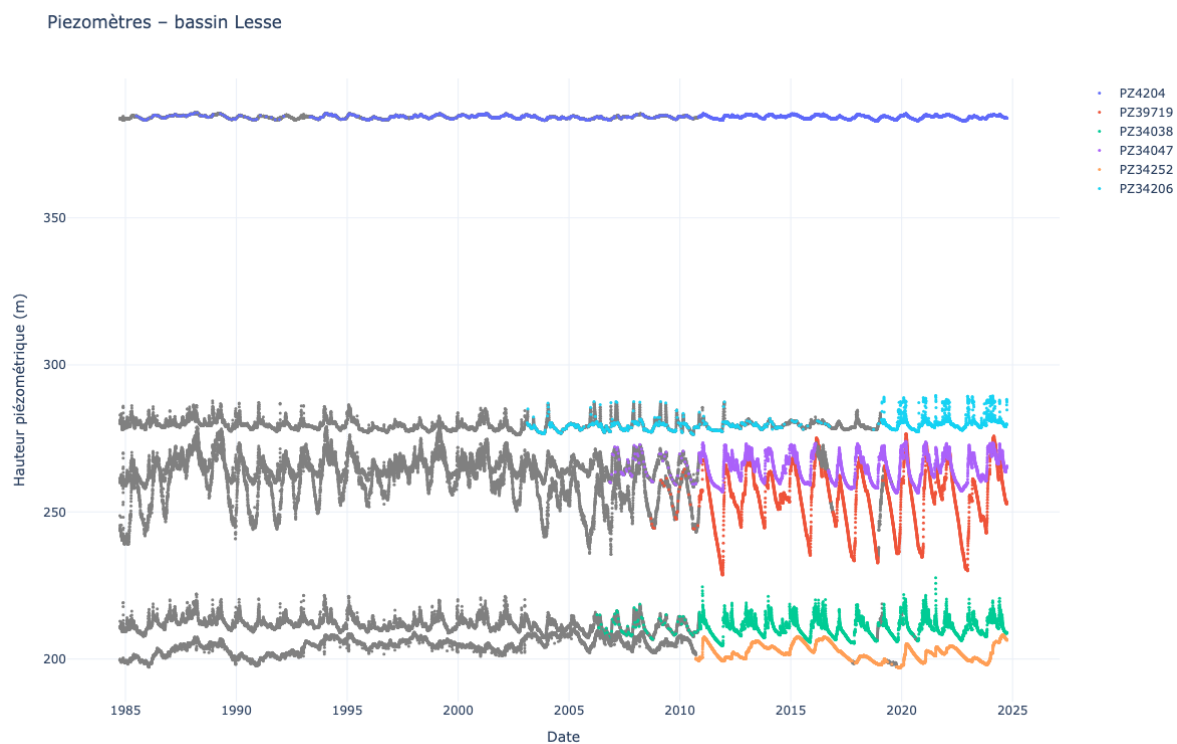


Figure 7-16 : Chroniques piézométriques du bassin de la Lesse. Les données imputées sont en gris

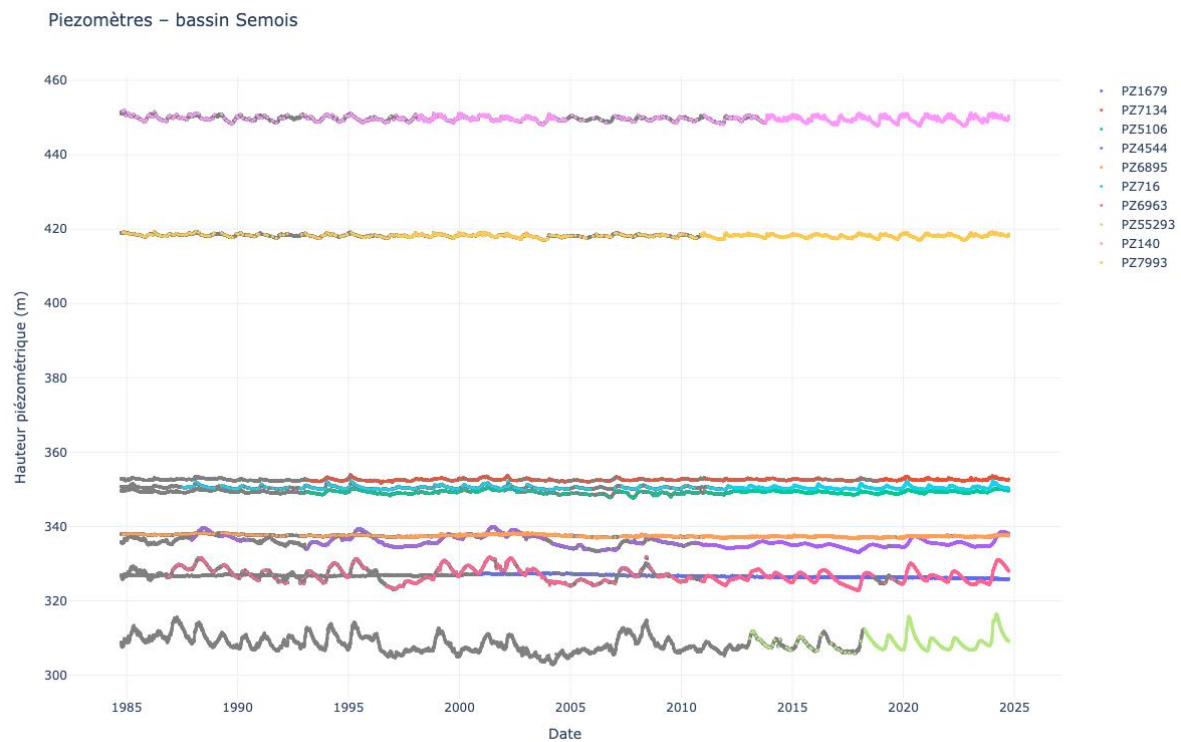


Figure 7-18 : Chroniques piézométriques du bassin de la Semois. Les données imputées sont en gris

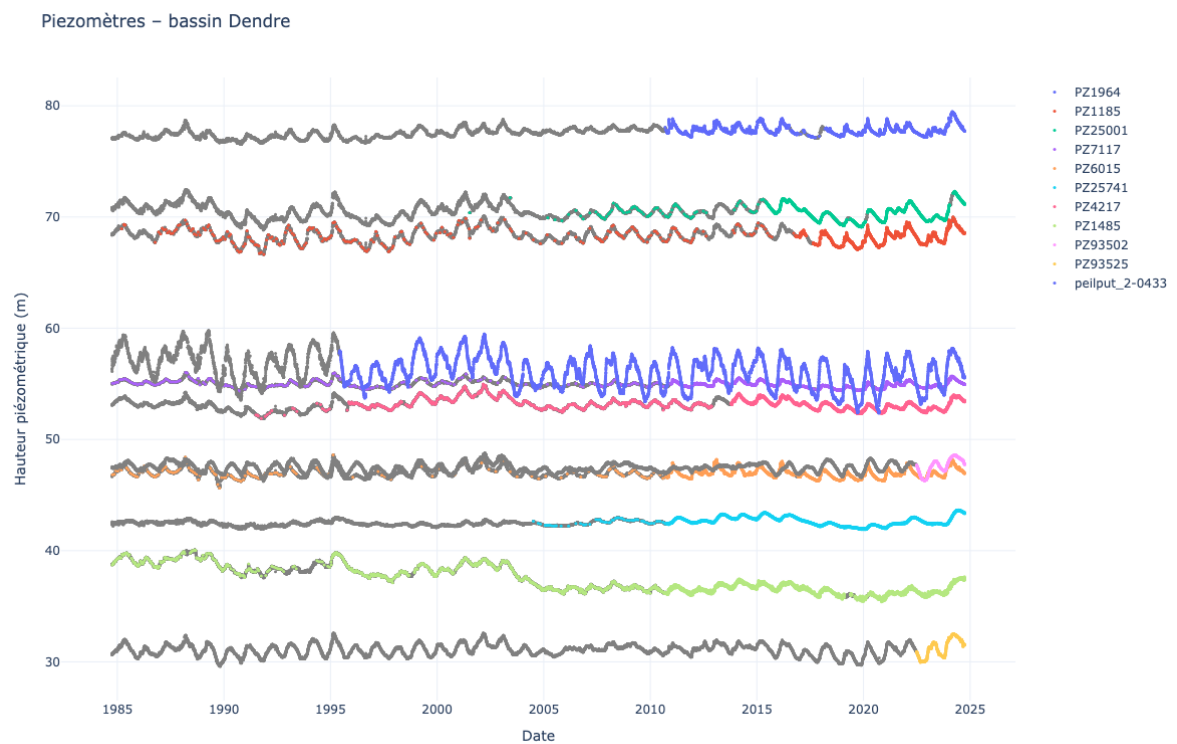


Figure 7-19 : Chroniques piézométriques du bassin de la Dendre. Les données imputées sont en gris

Piezomètres – bassin Dyle

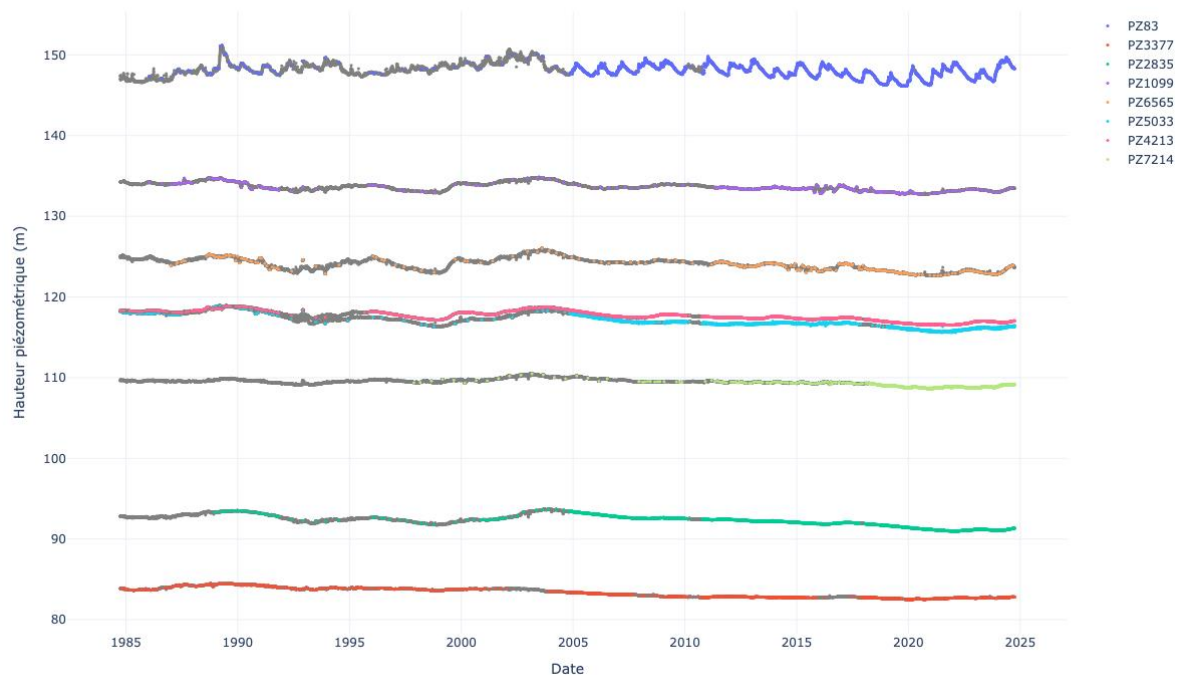


Figure 7-20 : Chroniques piézométriques du bassin de la Dyle. Les données imputées sont en gris

Piezomètres – bassin Demer

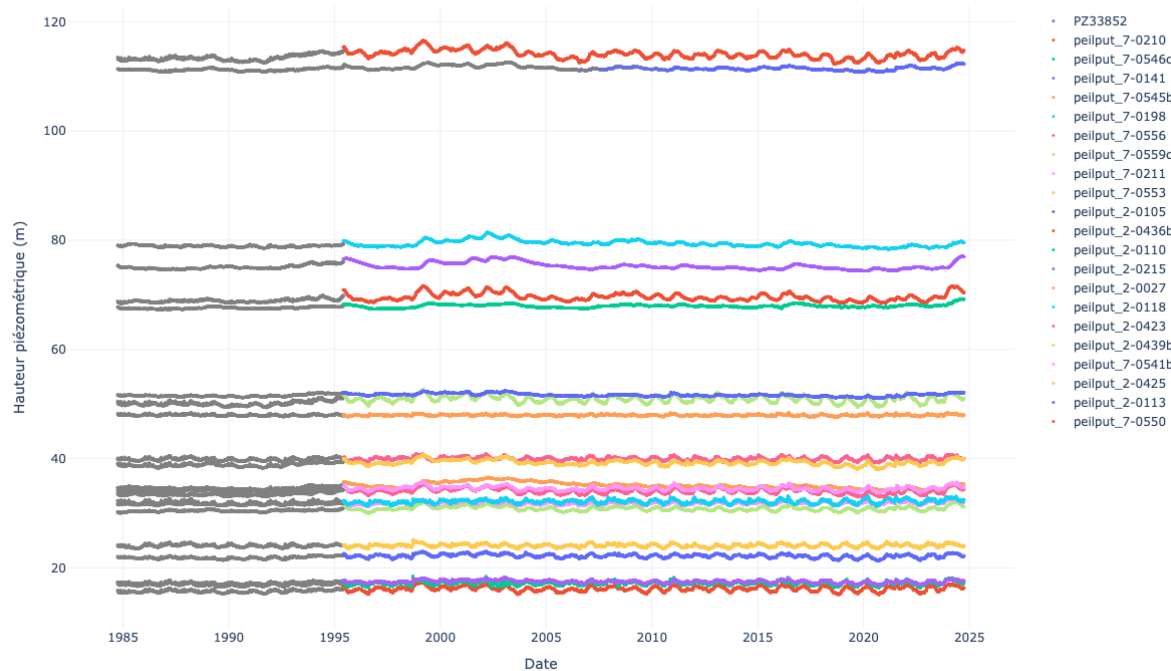


Figure 7-21 : Chroniques piézométriques du bassin de la Demer. Les données imputées sont en gris

Annexe I : Chroniques annuelles d'évapotranspiration pour chacun des bassins non repris dans les résultats

Bassin - Semois – Produits ET annuels (2002-2024)

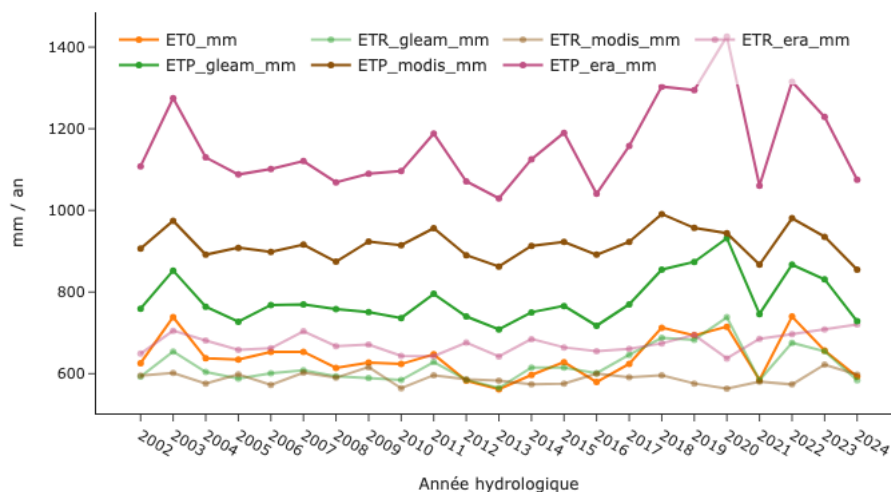


Figure 7-22 : Comparaison des chroniques annuelles pour le bassin de la Semois issues de quatre produits : ETO de référence, GLEAM v4.2a, MODIS16A et ERA5-Land. Les données sont exprimées en lame d'eau annuelle (mm/an) sur la période 2002-2024

Bassin - Demer – Produits ET annuels (2002-2024)

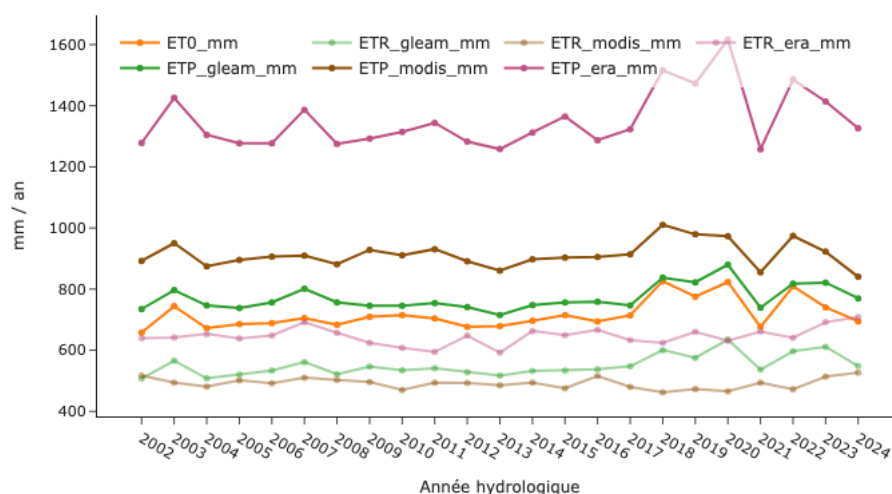


Figure 7-23 : Comparaison des chroniques annuelles pour le bassin de la Demer issues de quatre produits : ETO de référence, GLEAM v4.2a, MODIS16A et ERA5-Land. Les données sont exprimées en lame d'eau annuelle (mm/an) sur la période 2002-2024

Bassin - Dyle – Produits ET annuels (2002–2024)

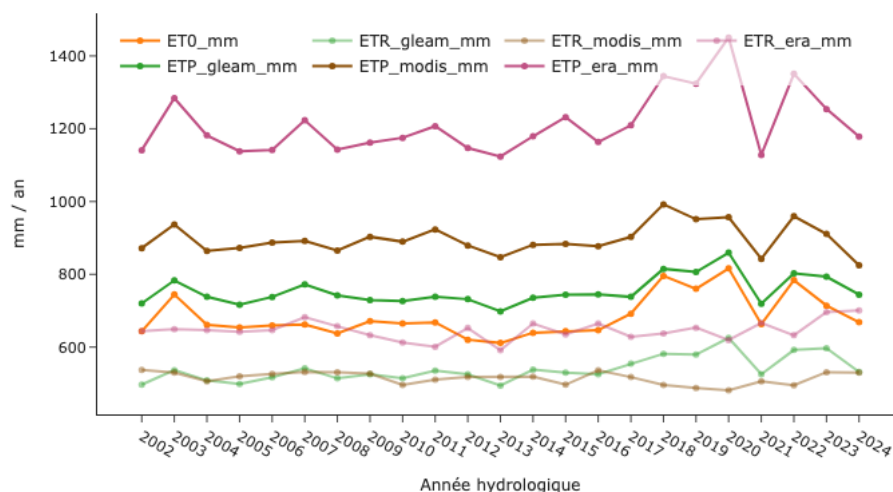


Figure 7-24 : Comparaison des chroniques annuelles pour le bassin de la Dyle issues de quatre produits : ETO de référence, GLEAM v4.2a, MODIS16A et ERA5-Land. Les données sont exprimées en lame d'eau annuelle (mm/an) sur la période 2002-2024

Bassin - Vesdre – Produits ET annuels (2002–2024)

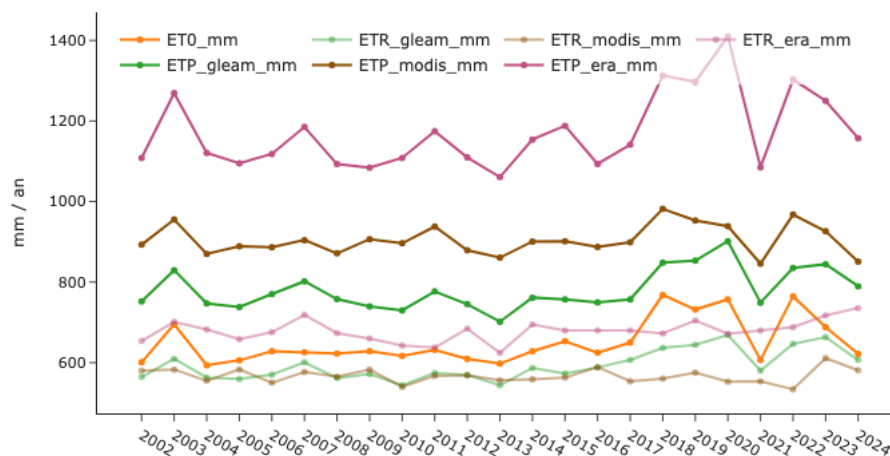


Figure 7-25 : Comparaison des chroniques annuelles pour le bassin de la Vesdre issues de quatre produits : ETO de référence, GLEAM v4.2a, MODIS16A et ERA5-Land. Les données sont exprimées en lame d'eau annuelle (mm/an) sur la période 2002-2024

Bassin - Viroin – Produits ET annuels (2002–2024)

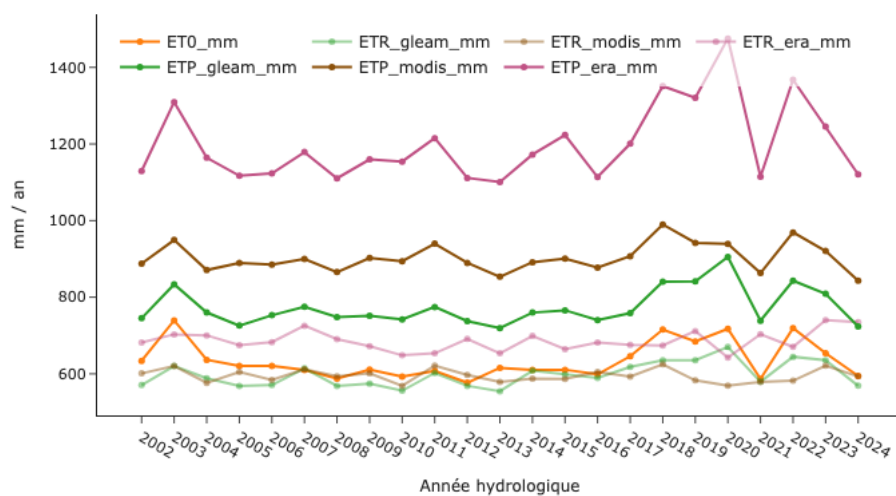


Figure 7-26 : Comparaison des chroniques annuelles pour le bassin du Viroin issues de quatre produits : ET0 de référence, GLEAM v4.2a, MODIS16A et ERA5-Land. Les données sont exprimées en lame d'eau annuelle (mm/an) sur la période 2002-2024

Annexe J : Figures de tendances non reprises dans les résultats

Test Mann-Kendall – ETR_era_mm (agrég. mean)

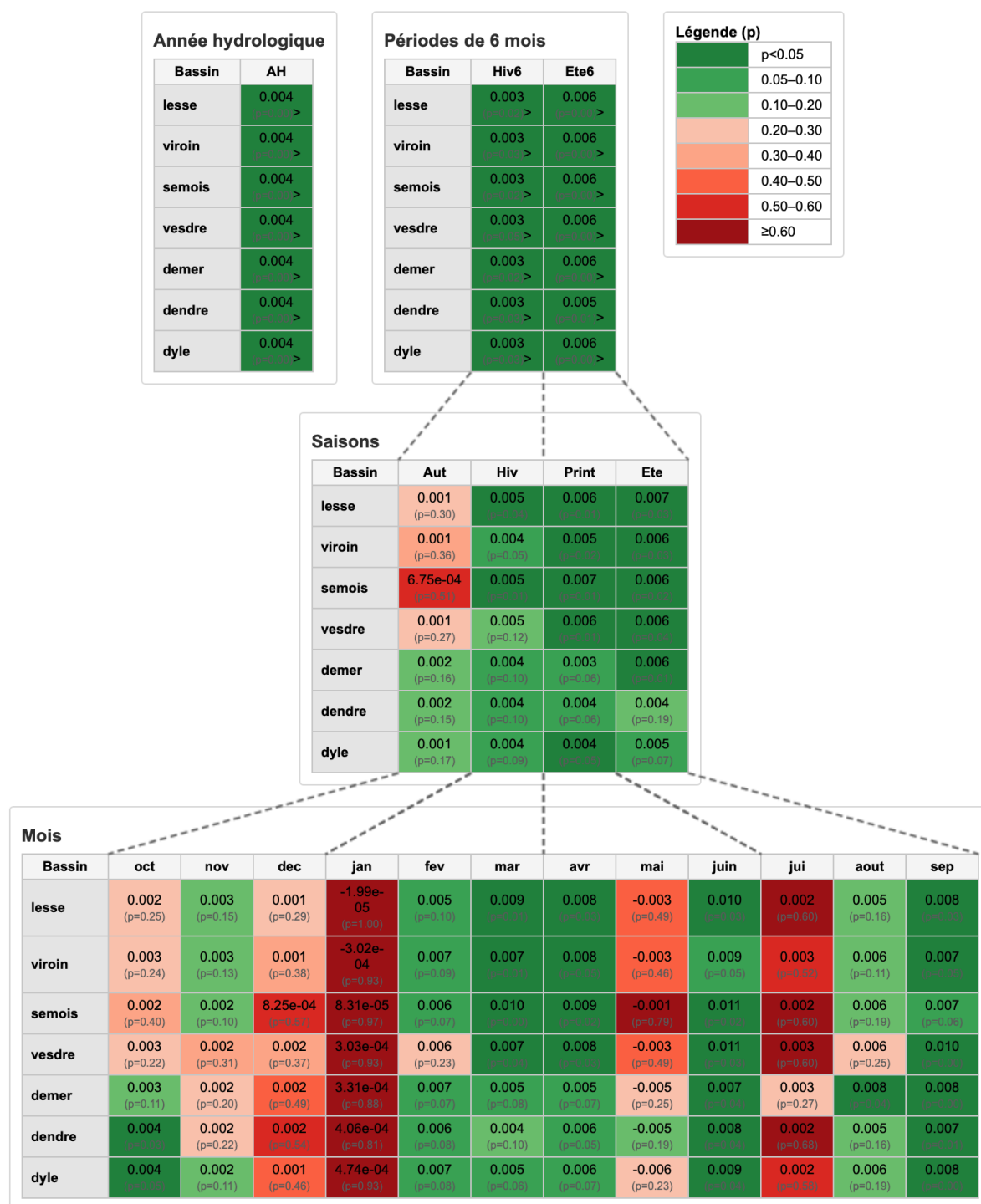


Figure 7-27 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière de l'évapotranspiration réelle (ETR_era_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – ETR_gleam_mm (agrég. var)

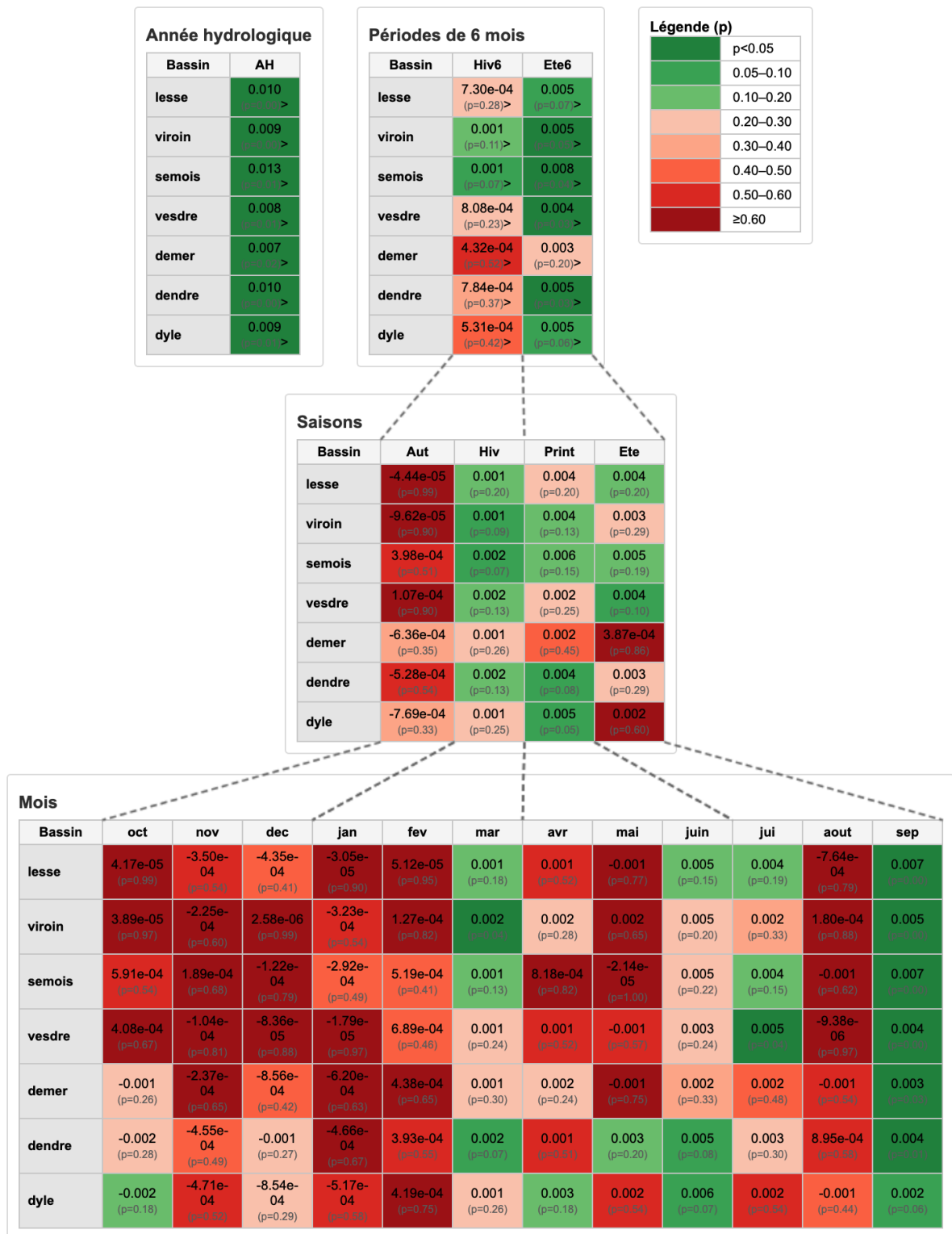


Figure 7-28 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la variance de l'évapotranspiration réelle (ETR_gleam_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur associée.

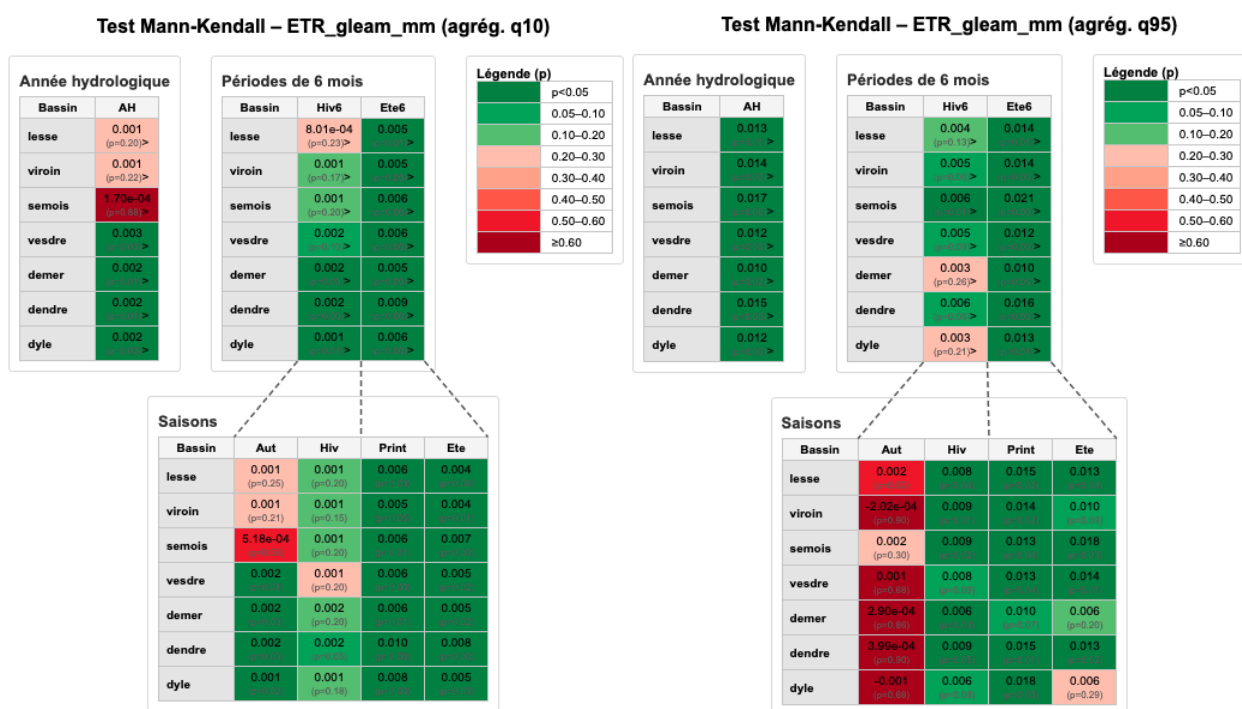


Figure 7-29 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux statistiques quantiles 10 et 95 de l'évapotranspiration réelle (ETR_gleam_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – ETP_era_mm (agrég. mean)

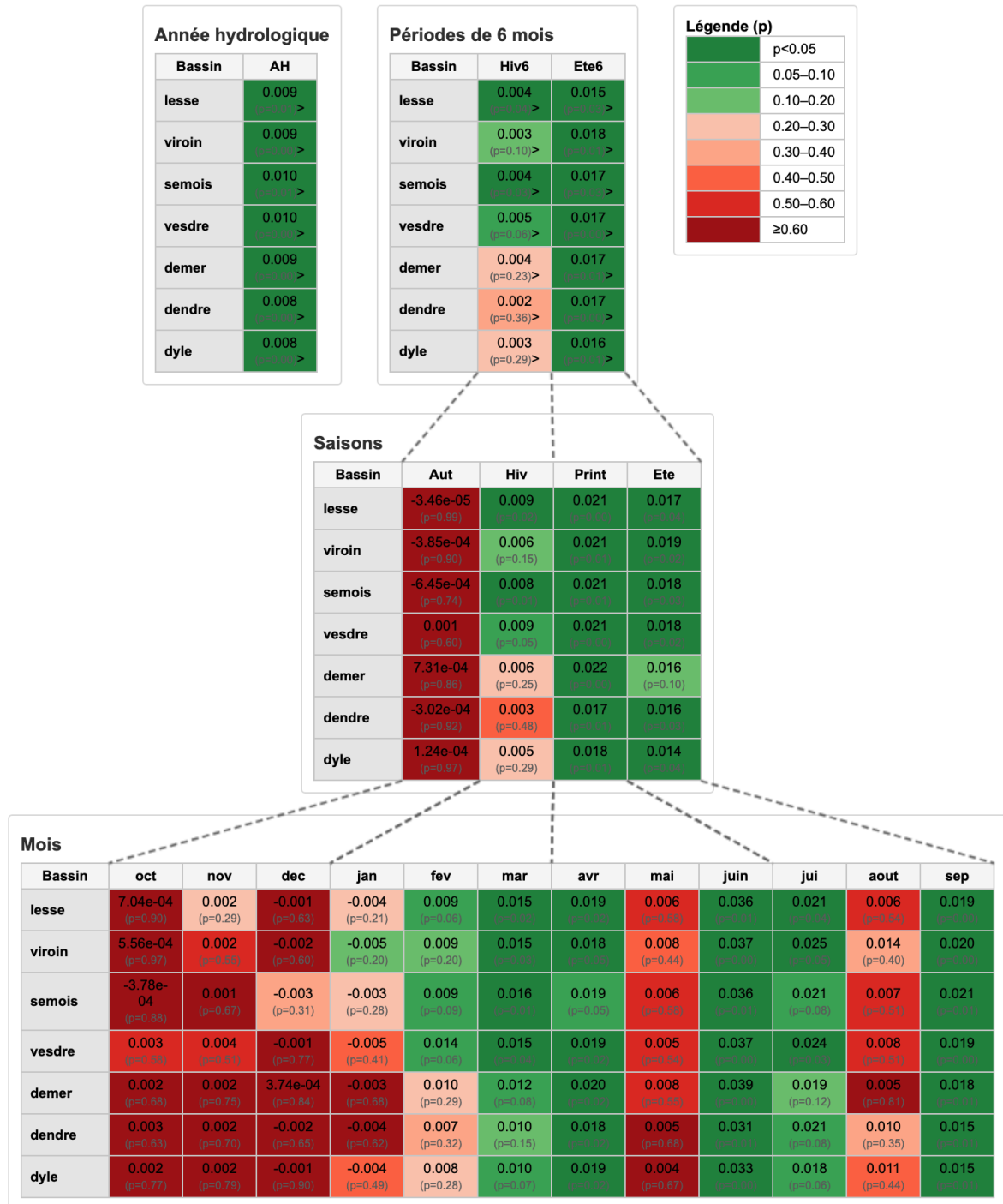


Figure 7-30 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière de l'évapotranspiration potentielle (ETP_era_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – ETP_gleam_mm (agrég. var)

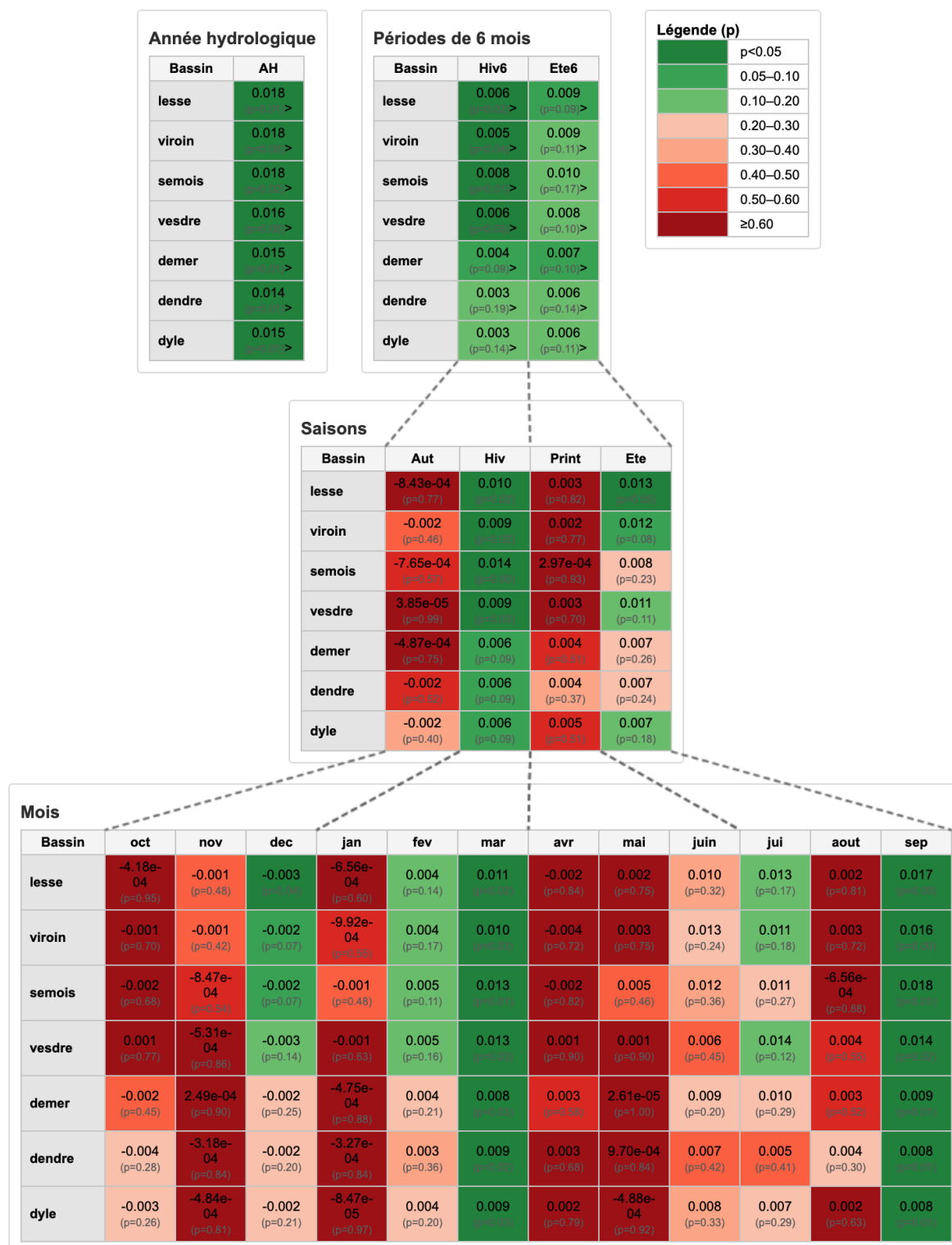


Figure 7-31 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la variance de l'évapotranspiration potentielle (ETP_gleam_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – ETP_era_mm (agrég. var)

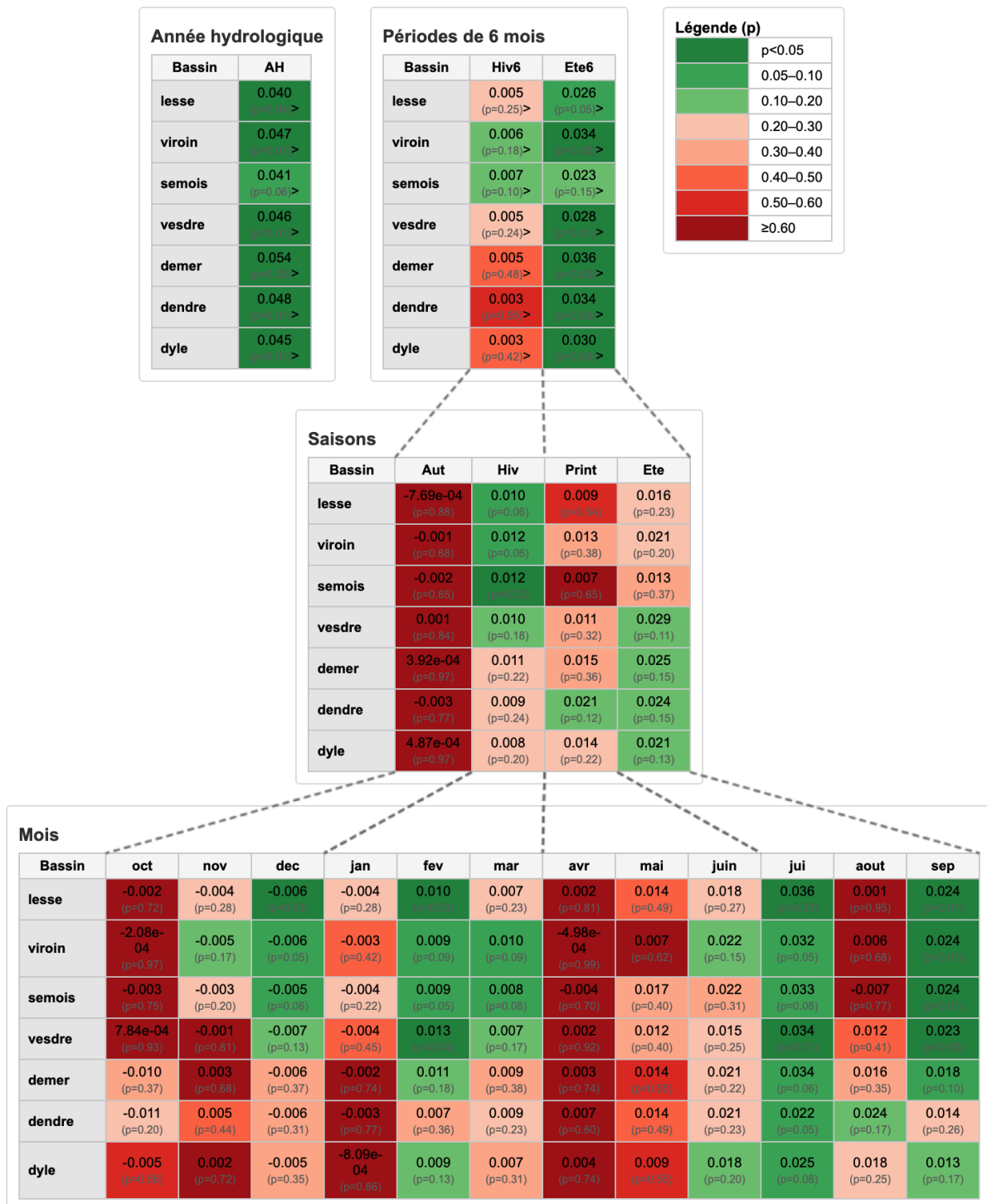


Figure 7-32 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la variance de l'évapotranspiration potentielle (ETP_era_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.



Figure 7-33 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux quantiles q10 et q95 de l'évapotranspiration potentielle (ETP_gleam_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – ET0_mm (agrég. mean)

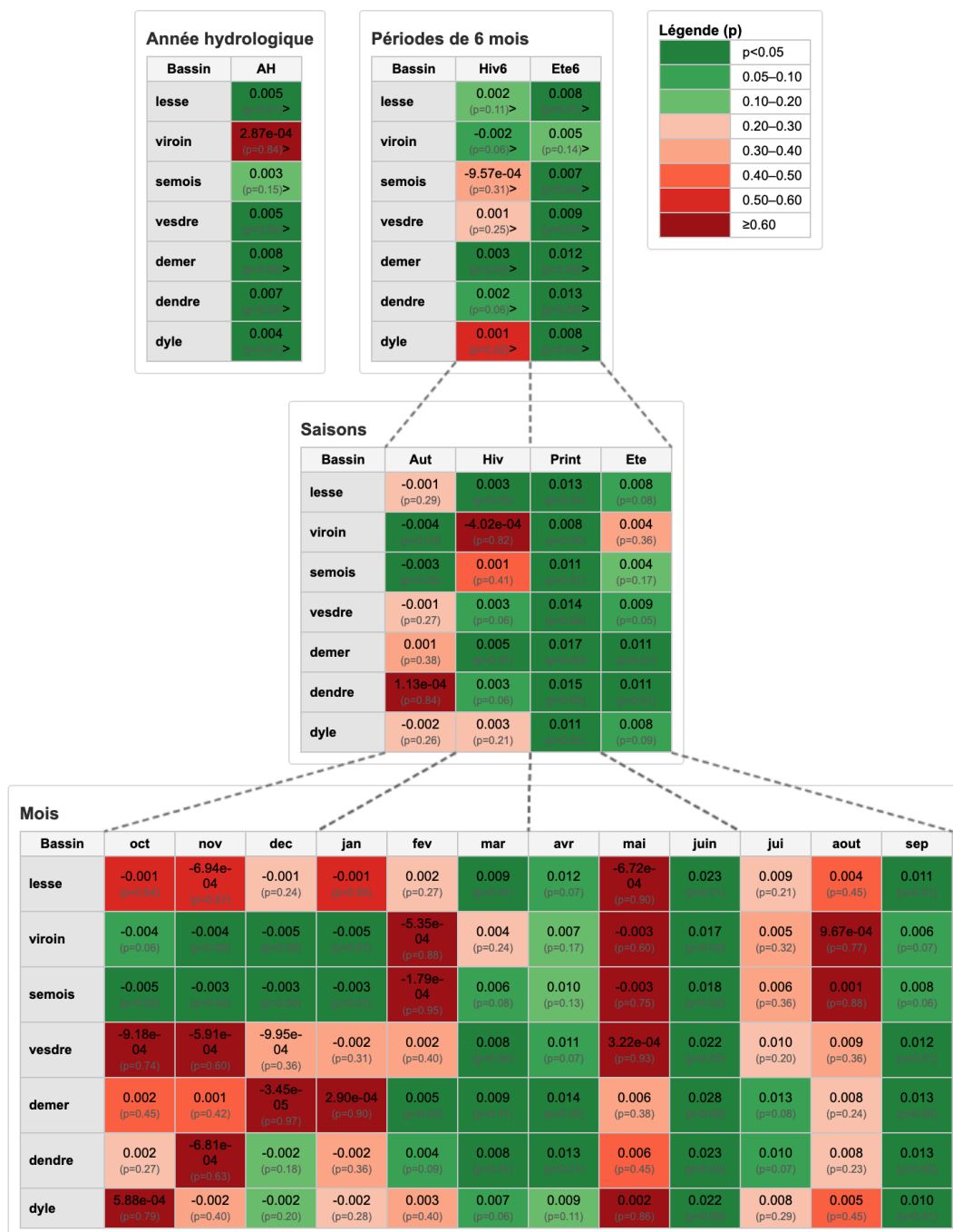


Figure 7-34 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière de l'évapotranspiration de référence (ET0_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – ET₀_mm (agrég. var)

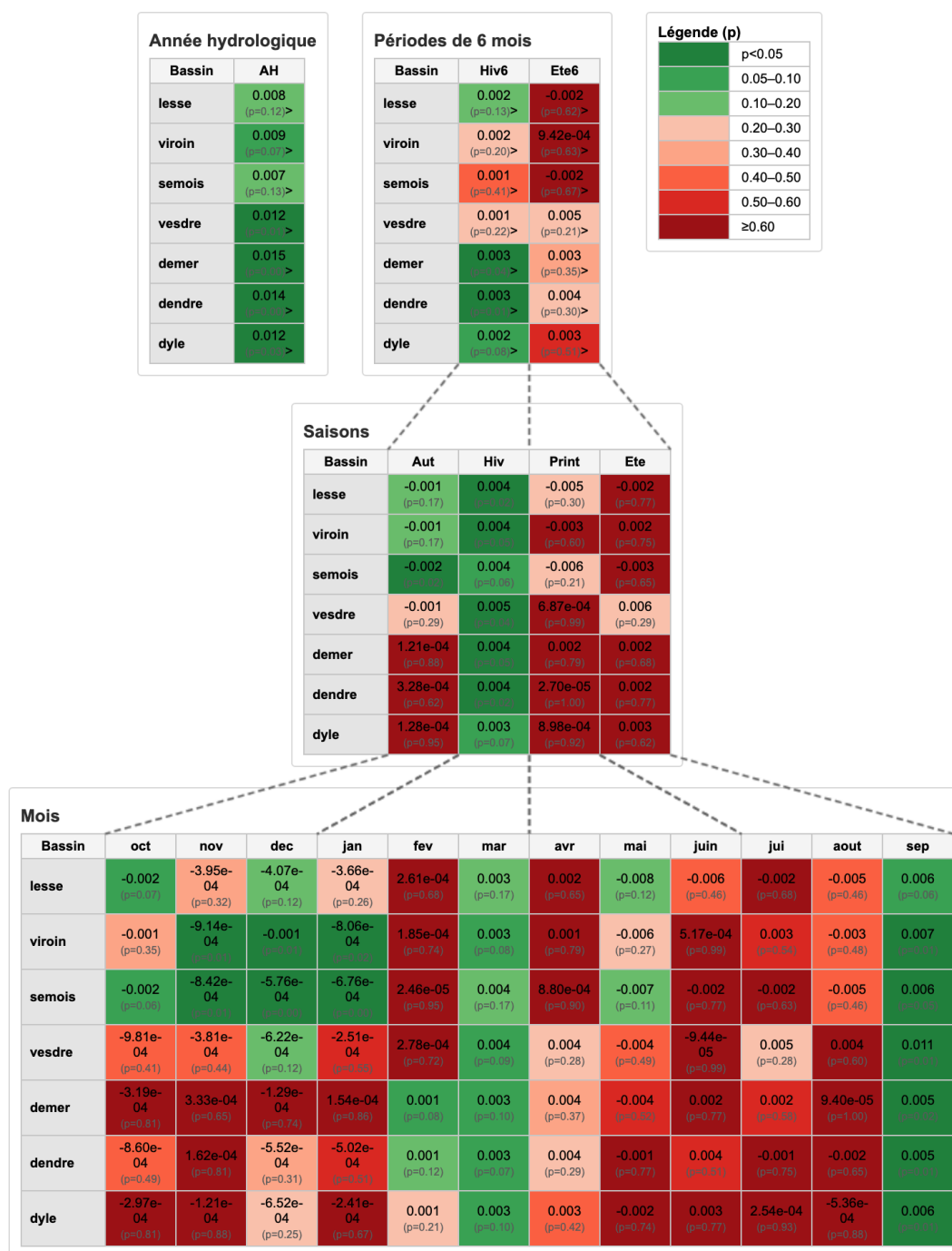
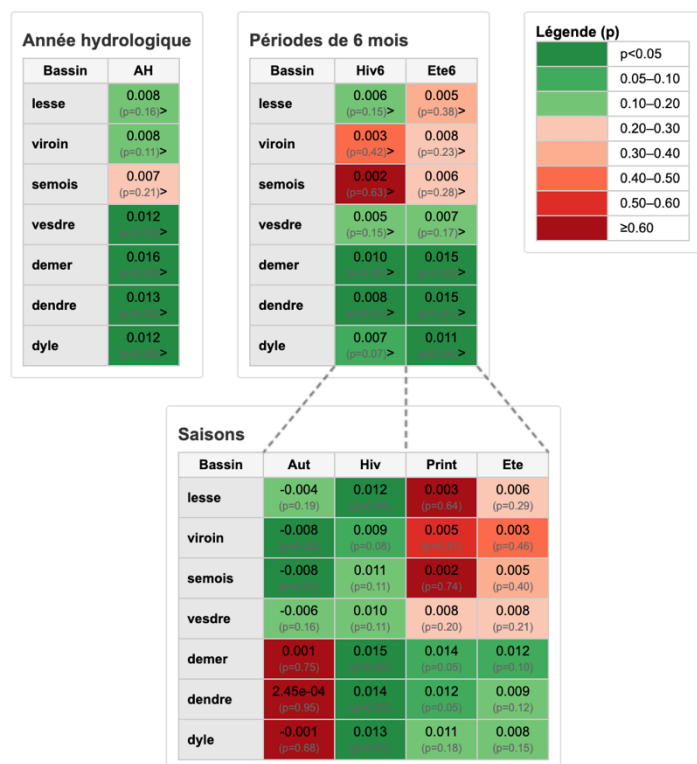


Figure 7-35 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la variance de l'évapotranspiration de référence (ET₀_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – ET0_mm (agrég. q95)



Test Mann-Kendall – ET0_mm (agrég. q10)

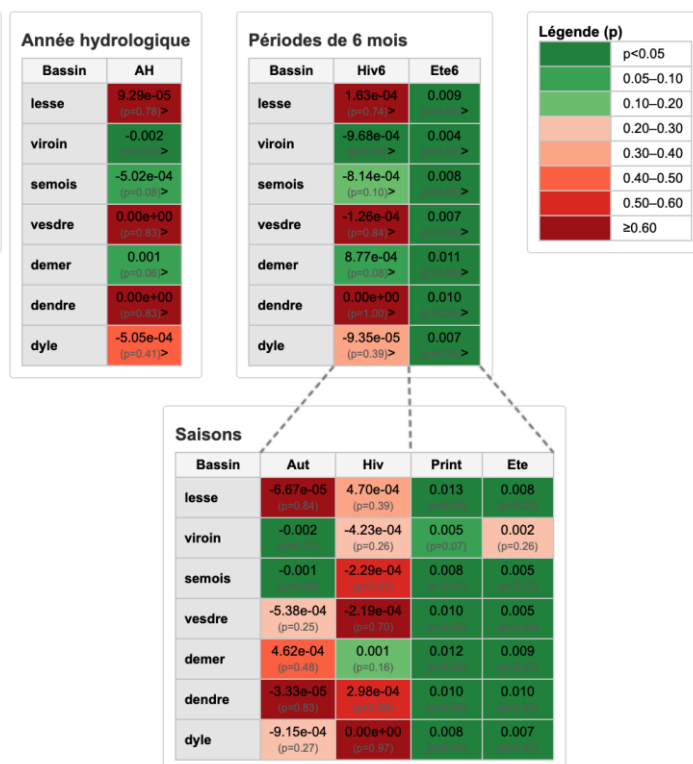


Figure 7-36 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux quantiles de l'évapotranspiration de référence (ET0_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – S_gleam_model (agrég. mean)

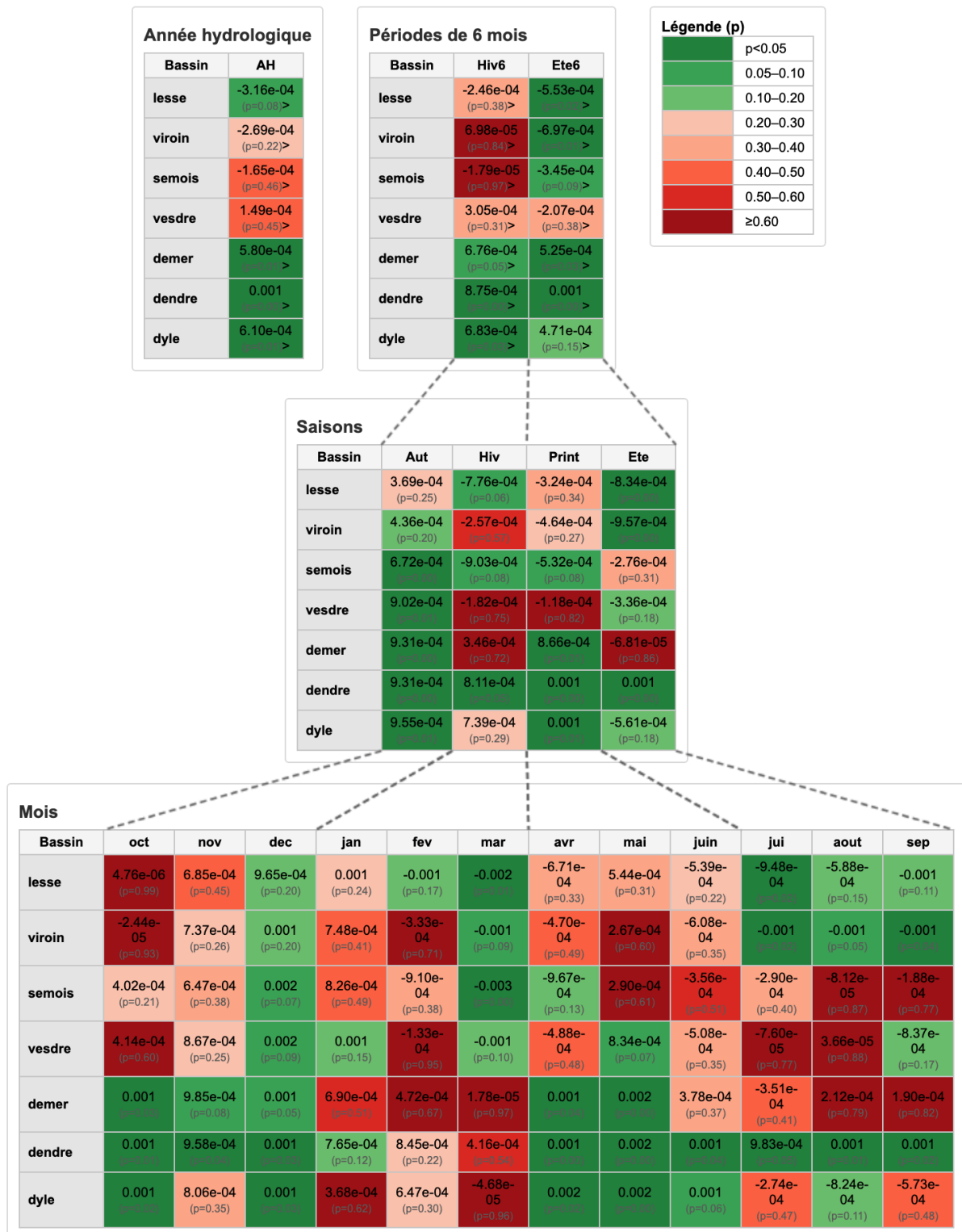


Figure 7-37 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière du stress hydrique (S_gleam_model) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – StressHydrique_era (agrég. mean)

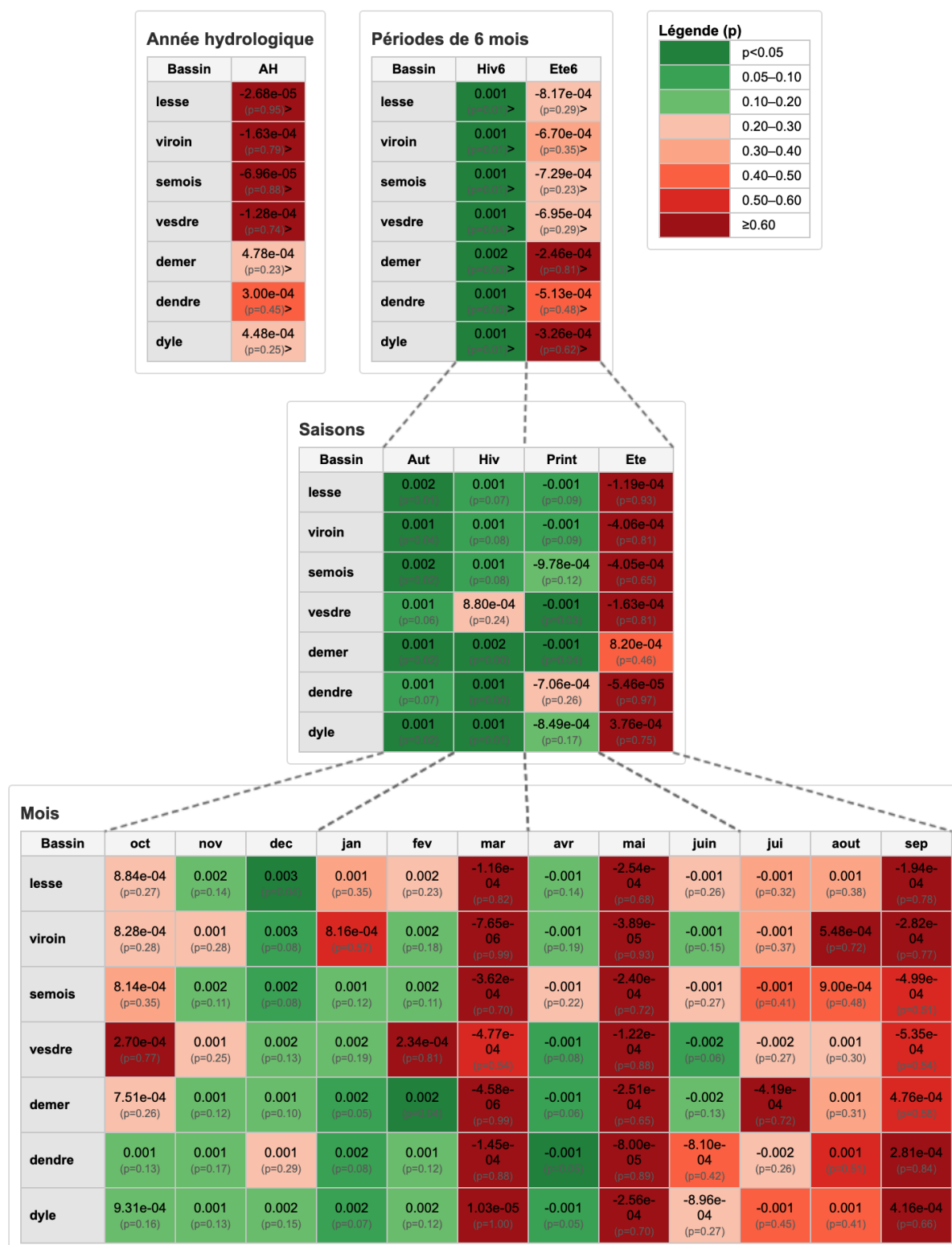


Figure 7-38 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière du stress hydrique (StressHydrique_era) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – P_mm (agrég. q95)



Test Mann-Kendall – P_mm (agrég. q10)

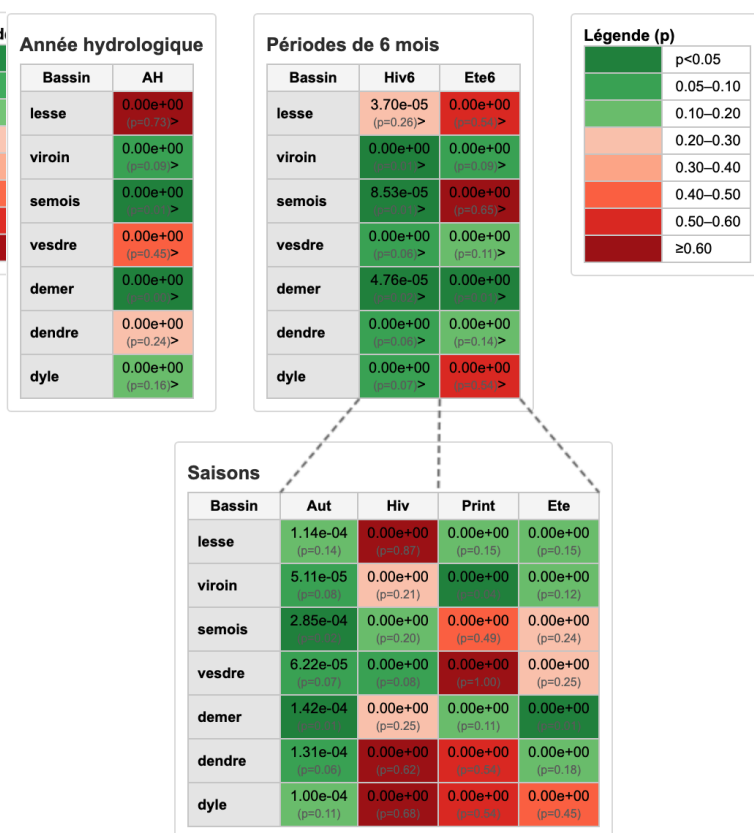


Figure 7-39 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux quantiles q10 et q95 des précipitations (P_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – Q_{mm} (agrég. var)

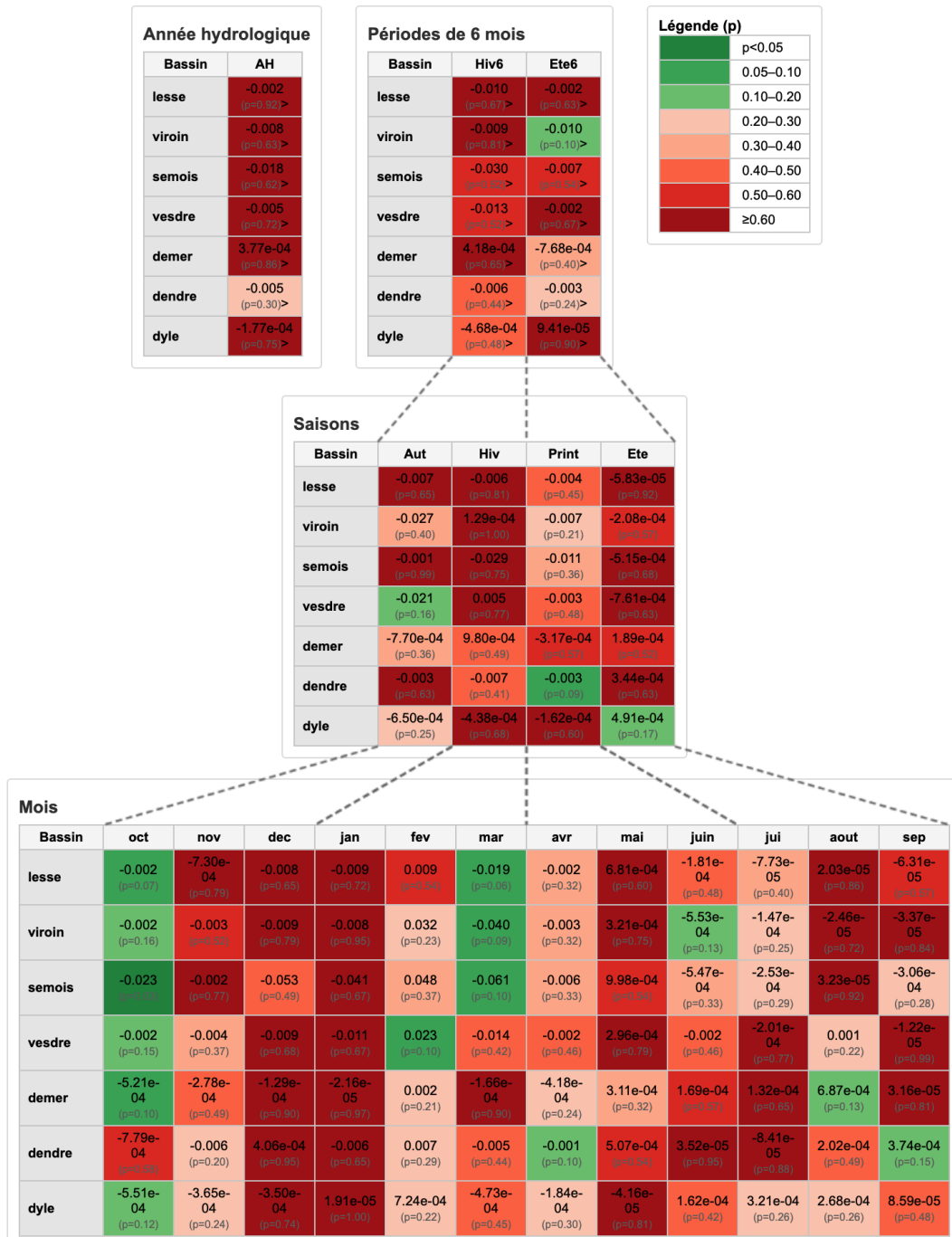
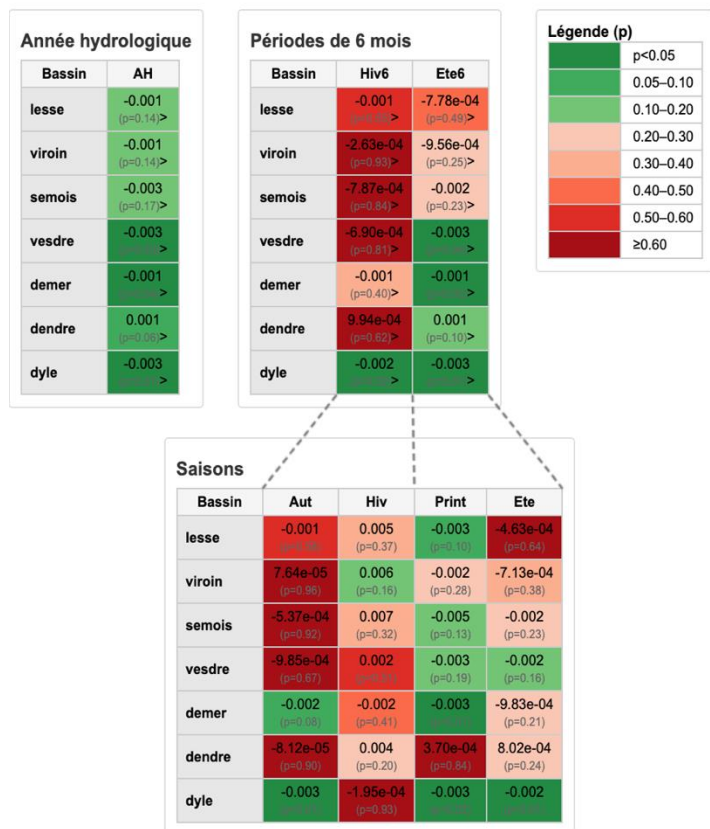


Figure 7-40 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la variance du débit (Q_{mm}) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – Q_mm (agrég. q10)



Test Mann-Kendall – Q_mm (agrég. q95)

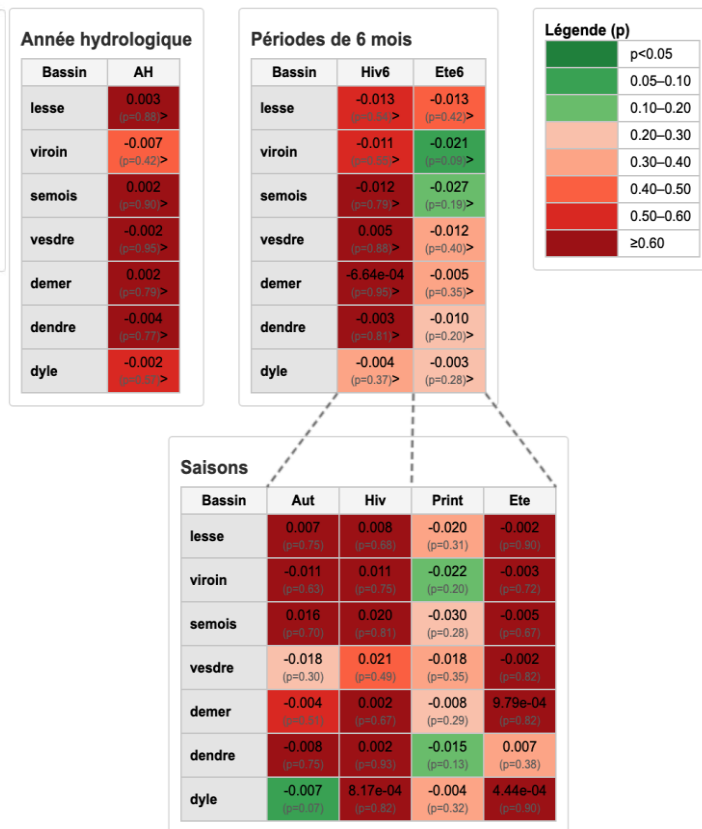


Figure 7-41 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux quantiles du débit (Q_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – P_minus_ETR_gleam (agrég. var)

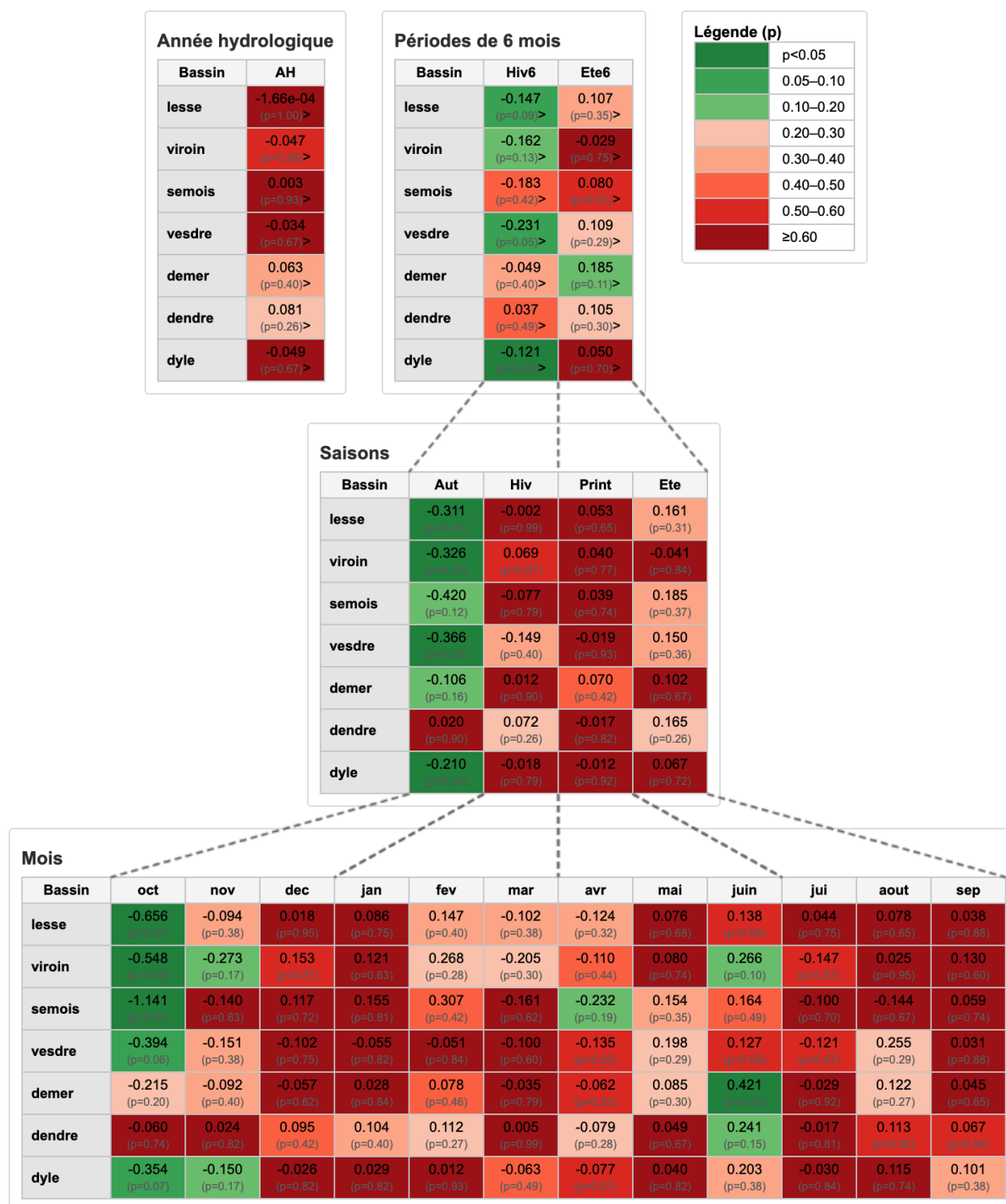


Figure 7-42 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la moyenne journalière des précipitations efficaces ($P_{mm} - ETR_{gleam_mm}$) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – P_minus_ETR_gleam_minus_Q (agrég. var)

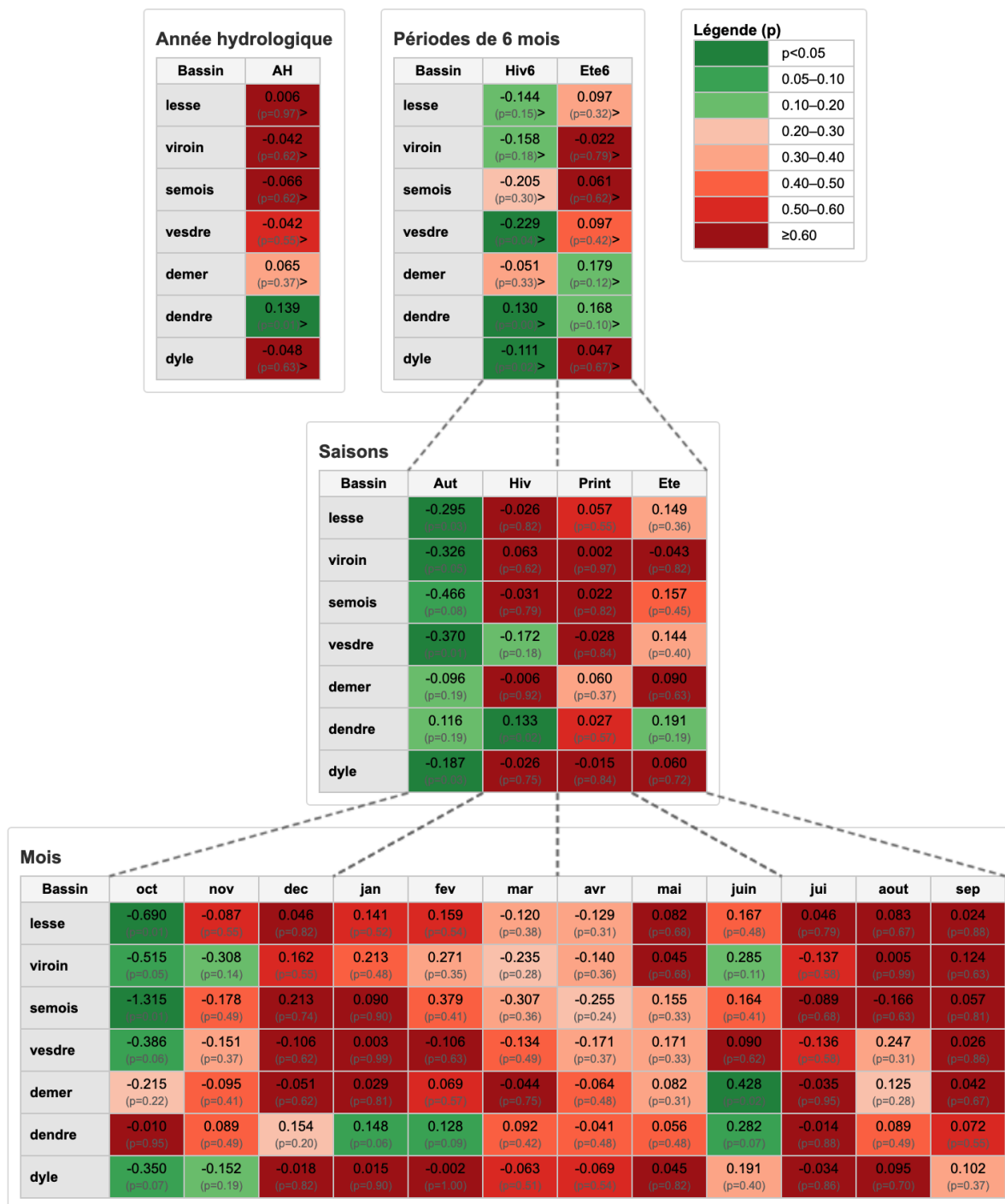


Figure 7-43 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à la variance de P-ETR-Q ($P_{mm} - ETR_{gleam_{mm}} - Q_{mm}$) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Test Mann-Kendall – P_minus_ETR_gleam_minus_Q (agrég. q95)

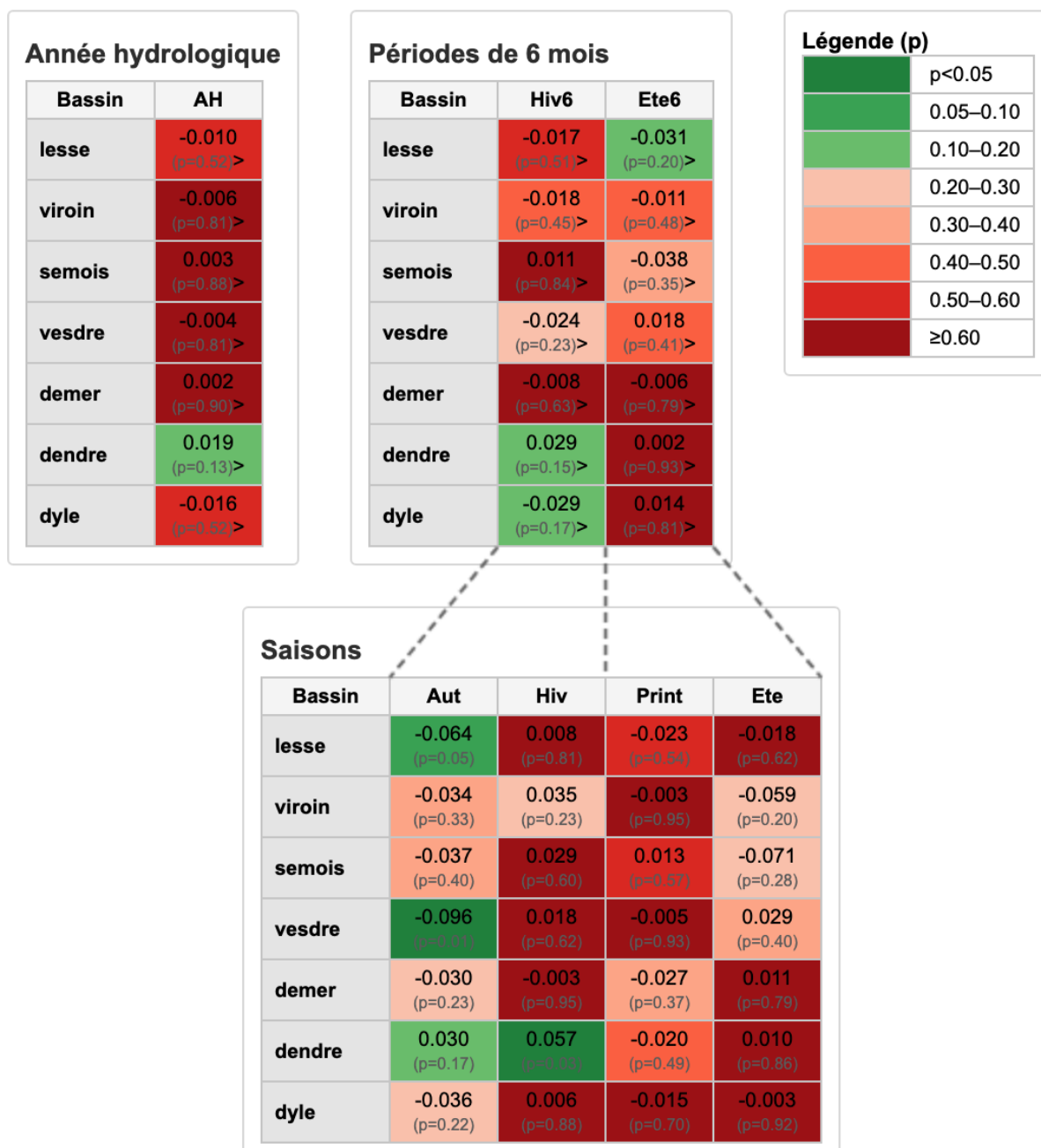


Figure 7-44 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué au quantile q95 de P-ETR-Q (P-MM - ETR_gleam_mm - Q_mm) pour chaque bassin, chaque agrégation temporelle sur 40 années (1^{er} octobre 1984 – 1^{er} octobre 2024). La valeur indiquée est la pente de la régression (mm) avec sa p-valeur du test associée.

Annexe K : Tableaux de valeurs de références pour l'analyse des bilans

Valeurs de référence - ETR_gleam_mm

Valeur de référence = droite de Theil-Sen évaluée en 1985 ; variation = pente × 40 ans / valeur_1985, en %.

Agrégation: MEAN																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	1.52 +12.1%	0.68 +11.7%	2.39 +13.1%	0.68 +5.7%	0.71 +15.0%	2.35 +14.3%	2.44 +13.1%	1.01 +9.1%	0.53 +4.5%	0.48 +8.8%	0.51 +0.8%	0.54 +25.3%	0.99 +19.5%	1.72 +10.6%	2.53 +7.4%	2.75 +27.4%	3.01 +9.8%	2.65 +7.3%	1.68 +21.1%
viroin	1.50 +12.4%	0.66 +10.0%	2.34 +13.2%	0.67 +5.1%	0.69 +14.3%	2.29 +15.4%	2.38 +9.9%	0.98 +9.1%	0.52 +3.2%	0.47 +10.1%	0.50 -9.5%	0.54 +20.5%	0.95 +21.6%	1.69 +13.5%	2.55 +7.2%	2.66 +24.9%	2.91 +10.6%	2.55 +6.2%	1.66 +17.6%
semois	1.54 +13.3%	0.67 +9.6%	2.42 +14.7%	0.66 +4.7%	0.69 +13.8%	2.36 +14.8%	2.45 +17.7%	0.96 +8.0%	0.53 -0.8%	0.49 +8.7%	0.49 -7.7%	0.53 +20.7%	0.97 +20.4%	1.73 +8.6%	2.58 +4.1%	2.72 +27.8%	3.02 +17.2%	2.63 +10.2%	1.67 +27.2%
vesdre	1.45 +15.0%	0.70 +18.8%	2.21 +15.3%	0.70 +12.3%	0.72 +20.4%	2.15 +16.8%	2.26 +14.7%	0.95 +13.4%	0.56 +19.5%	0.55 +19.3%	0.61 +0.2%	0.58 +30.9%	1.00 +24.7%	1.69 +13.2%	2.34 +9.8%	2.50 +25.7%	2.78 +12.8%	2.42 +11.5%	1.57 +18.8%
demer	1.35 +15.1%	0.67 +15.5%	2.05 +14.8%	0.64 +7.3%	0.73 +19.5%	2.02 +21.5%	2.04 +10.5%	0.87 +11.2%	0.50 +10.1%	0.46 +9.7%	0.55 -2.5%	0.55 +32.4%	1.00 +24.9%	1.58 +23.2%	2.19 +10.4%	2.29 +29.8%	2.48 +8.7%	2.13 +7.2%	1.37 +20.6%
dendre	1.30 +19.5%	0.66 +16.0%	1.96 +21.4%	0.61 +6.9%	0.74 +19.7%	2.00 +23.2%	1.93 +20.6%	0.85 +14.0%	0.48 +6.8%	0.44 +9.1%	0.51 -0.2%	0.59 +27.3%	1.03 +28.1%	1.59 +28.6%	2.08 +14.9%	2.18 +31.9%	2.35 +17.7%	2.02 +17.8%	1.30 +29.3%
dyle	1.33 +14.9%	0.63 +14.3%	2.02 +16.4%	0.63 +6.8%	0.67 +17.9%	1.98 +24.2%	2.04 +7.3%	0.84 +15.3%	0.49 +6.1%	0.44 +8.4%	0.51 -7.1%	0.48 +36.4%	0.94 +25.9%	1.54 +25.2%	2.20 +10.3%	2.24 +35.0%	2.51 +11.1%	2.17 +3.2%	1.39 +14.3%

Agrégation: VAR																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	1.14 +35.3%	0.17 +17.0%	0.74 +29.3%	0.17 -1.0%	0.16 +35.4%	0.72 +23.1%	0.67 +26.3%	0.17 +1.0%	0.09 -15.3%	0.07 -24.0%	0.08 -1.5%	0.08 +2.6%	0.14 +33.2%	0.26 +19.8%	0.58 -7.7%	0.55 +34.5%	0.50 +32.4%	0.46 -6.7%	0.15 +186.1%
viroin	1.10 +33.1%	0.17 +24.2%	0.69 +29.2%	0.17 -2.2%	0.16 +37.2%	0.71 +24.3%	0.63 +17.9%	0.17 +0.9%	0.09 -9.6%	0.07 +0.1%	0.09 -14.3%	0.07 +6.9%	0.13 +61.0%	0.27 +36.2%	0.50 +12.7%	0.52 +39.1%	0.51 +19.3%	0.41 +1.8%	0.18 +124.5%
semois	1.21 +42.1%	0.15 +28.3%	0.82 +36.8%	0.14 +11.1%	0.16 +41.6%	0.78 +28.1%	0.70 +27.7%	0.13 +17.8%	0.07 +10.9%	0.07 -7.1%	0.07 -16.1%	0.07 +31.5%	0.12 +38.9%	0.27 +12.0%	0.60 -0.1%	0.59 +32.5%	0.55 +30.6%	0.51 -10.9%	0.18 +161.3%
vesdre	0.95 +34.4%	0.18 +17.9%	0.61 +26.0%	0.16 +2.7%	0.16 +40.6%	0.62 +15.9%	0.55 +30.8%	0.14 +11.4%	0.11 -3.9%	0.09 -0.7%	0.10 -0.7%	0.08 +34.5%	0.17 +30.1%	0.25 +19.2%	0.47 -10.8%	0.47 +27.0%	0.40 +53.9%	0.38 -0.1%	0.18 +94.1%
demer	0.85 +34.0%	0.21 +8.4%	0.57 +21.4%	0.19 -13.7%	0.21 +22.6%	0.55 +15.7%	0.51 +3.0%	0.20 -26.4%	0.11 -8.4%	0.12 -28.9%	0.14 -17.9%	0.10 +17.2%	0.17 +27.3%	0.23 +39.6%	0.47 -8.6%	0.49 +20.3%	0.41 +16.6%	0.34 -12.6%	0.16 +71.1%
dendre	0.78 +51.3%	0.22 +14.5%	0.51 +39.0%	0.19 -11.4%	0.22 +39.7%	0.50 +31.5%	0.49 +26.9%	0.20 -31.7%	0.11 -17.0%	0.12 -35.7%	0.13 -14.3%	0.14 +11.4%	0.19 +52.0%	0.30 +18.4%	0.37 +34.6%	0.46 +40.8%	0.41 +27.1%	0.30 +11.9%	0.16 +90.1%
dyle	0.82 +43.3%	0.19 +11.3%	0.52 +42.2%	0.18 -16.8%	0.19 +27.6%	0.51 +38.4%	0.52 +12.3%	0.20 -31.3%	0.11 -17.0%	0.11 -31.9%	0.12 -16.7%	0.09 +17.8%	0.15 +37.7%	0.23 +51.4%	0.41 +19.0%	0.42 +54.1%	0.43 +17.8%	0.36 -13.2%	0.17 +52.9%

Agrégation: Q10																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.336 +12.6%	0.225 +14.3%	1.33 +14.0%	0.214 +22.5%	0.226 +19.5%	1.23 +18.6%	1.42 +10.3%	0.505 +14.8%	0.205 +15.1%	0.169 +20.9%	0.163 +20.1%	0.246 +42.3%	0.574 +18.8%	1.15 +5.5%	1.51 +20.3%	1.87 +27.4%	2.08 +9.9%	1.82 +10.9%	1.19 +8.5%
viroin	0.322 +12.8%	0.218 +18.6%	1.32 +15.7%	0.197 +23.4%	0.228 +24.3%	1.26 +15.8%	1.36 +13.2%	0.472 +16.9%	0.193 +18.9%	0.151 +13.8%	0.158 +10.0%	0.243 +46.6%	0.568 +13.9%	1.11 +3.9%	1.56 +11.0%	1.79 +26.7%	1.98 +5.7%	1.67 +13.1%	1.14 +6.7%
semois	0.351 +1.9%	0.217 +19.8%	1.30 +19.0%	0.219 +9.5%	0.215 +22.1%	1.21 +21.3%	1.38 +20.4%	0.493 +14.5%	0.237 -0.4%	0.189 +4.2%	0.170 -4.4%	0.250 +35.5%	0.547 +20.3%	1.11 +10.0%	1.62 +15.7%	1.89 +26.6%	2.06 +23.7%	1.83 +15.7%	1.12 +18.9%
vesdre	0.352 +29.3%	0.241 +30.8%	1.28 +17.5%	0.251 +38.1%	0.238 +22.5%	1.26 +18.4%	1.28 +14.8%	0.500 +21.7%	0.211 +39.7%	0.162 +78.1%	0.210 -15.2%	0.239 +59.2%	0.538 +32.9%	1.10 +13.4%	1.37 +27.1%	1.70 +26.4%	1.97 +12.6%	1.63 +23.0%	1.09 +14.8%
demer	0.264 +36.2%	0.175 +48.4%	1.12 +18.0%	0.161 +44.5%	0.212 +33.2%	1.16 +22.0%	1.08 +18.8%	0.421 +29.9%	0.153 +32.4%	0.135 +36.1%	0.145 +30.3%	0.247 +54.7%	0.561 +28.9%	1.00 +25.9%	1.41 +11.9%	1.46 +43.0%	1.75 +7.2%	1.45 +11.7%	0.838 +31.0%
dendre	0.261 +28.6%	0.162 +47.5%	1.03 +33.6%	0.160 +40.5%	0.206 +33.5%	1.09 +36.9%	1.01 +29.8%	0.404 +30.2%	0.160 +28.9%	0.126 +18.7%	0.126 +25.8%	0.228 +58.1%	0.587 +18.0%	1.01 +41.4%	1.35 +12.5%	1.43 +25.0%	1.67 +11.7%	1.40 +19.3%	0.818 +29.8%
dyle	0.253 +30.0%	0.169 +32.6%	1.10 +20.4%	0.165 +35.3%	0.193 +23.5%	1.13 +27.2%	1.10 +16.9%	0.429 +27.8%	0.188 +8.1%	0.131 +30.5%	0.147 +6.8%	0.211 +50.3%	0.529 +18.3%	0.970 +27.5%	1.33 +16.5%	1.47 +38.0%	1.73 +10.2%	1.50 +1.3%	0.895 +19.0%

Agrégation: Q95																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	3.52	1.47	3.96	1.41	1.43	3.81	3.76	1.59	1.10	0.954	1.02	0.988	1.60	2.56	3.72	3.91	4.17	3.70	2.25
	+14.8%	+9.8%	+14.0%	+5.9%	+22.3%	+15.8%	+13.4%	+11.4%	-4.9%	+5.2%	+3.9%	+22.1%	+24.1%	+8.6%	+3.5%	+20.8%	+10.7%	+7.2%	+36.1%
viroin	3.42	1.40	3.81	1.46	1.36	3.79	3.70	1.55	1.14	0.951	1.05	0.970	1.54	2.50	3.59	3.88	3.98	3.51	2.33
	+15.8%	+14.2%	+14.2%	-0.6%	+27.7%	+14.7%	+11.1%	+14.5%	-9.8%	+9.6%	-11.6%	+20.0%	+30.4%	+12.0%	+7.8%	+22.1%	+11.6%	+5.8%	+29.3%
semois	3.55	1.36	3.84	1.32	1.32	3.91	3.79	1.53	1.00	0.961	0.912	0.958	1.56	2.53	3.83	4.01	4.09	3.65	2.31
	+19.0%	+16.8%	+21.6%	+7.1%	+26.4%	+13.6%	+18.7%	+15.6%	+2.8%	-2.0%	-5.4%	+30.5%	+21.7%	+9.3%	+2.4%	+20.9%	+19.3%	+9.9%	+39.6%
vesdre	3.25	1.45	3.66	1.43	1.50	3.49	3.45	1.52	1.14	1.03	1.14	1.02	1.61	2.45	3.50	3.78	3.74	3.44	2.21
	+14.3%	+13.5%	+13.3%	+3.3%	+20.1%	+14.4%	+16.6%	+14.0%	+3.5%	+11.8%	+7.2%	+28.3%	+30.3%	+12.3%	+0.9%	+16.3%	+10.0%	+8.3%	+31.3%
demer	3.05	1.51	3.42	1.42	1.57	3.34	3.23	1.63	1.19	1.11	1.24	1.06	1.68	2.37	3.28	3.48	3.39	3.07	1.99
	+12.8%	+8.4%	+11.7%	+0.8%	+16.5%	+12.0%	+7.4%	+1.4%	-9.6%	-0.0%	-12.9%	+26.4%	+24.2%	+18.2%	+6.5%	+20.5%	+6.8%	-0.1%	+29.5%
dendre	2.89	1.53	3.18	1.40	1.60	3.20	3.01	1.65	1.09	1.07	1.19	1.22	1.79	2.39	3.06	3.35	3.38	2.94	1.99
	+14.8%	+14.2%	+14.2%	+4.8%	+27.7%	+14.4%	+18.7%	+14.5%	-9.8%	-0.0%	-12.9%	+26.4%	+24.2%	+18.3%	+16.5%	+38.0%	+10.2%	+1.3%	+19.0%

Figure 7-45 : Valeurs de références de l'ETR estimées par GLEAM pour les 7 bassins

Valeurs de référence - ETP_gleam_mm

Valeur de référence = droite de Theil-Sen évaluée en 1985 ; variation = pente × 40 ans / valeur_1985, en %.

Agrégation: MEAN																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	1.91 +13.7%	0.86 +17.5%	2.97 +15.4%	0.80 -1.8%	0.89 +31.5%	3.06 +17.3%	2.84 +18.4%	1.25 +4.8%	0.54 +8.8%	0.51 -10.3%	0.64 -17.0%	0.72 +43.2%	1.44 +36.5%	2.59 +17.1%	3.31 +5.0%	3.30 +25.3%	3.55 +14.7%	3.01 +13.9%	1.82 +26.6%
viroin	1.89 +14.6%	0.87 +14.1%	2.96 +15.8%	0.78 -0.9%	0.95 +24.8%	3.06 +17.3%	2.83 +17.7%	1.26 +5.6%	0.58 +4.5%	0.50 -10.1%	0.65 -19.3%	0.76 +36.8%	1.46 +31.9%	2.56 +15.8%	3.29 +7.1%	3.26 +27.0%	3.51 +15.1%	3.01 +11.9%	1.84 +27.5%
semois	1.90 +14.9%	0.81 +17.8%	3.03 +15.2%	0.74 -4.3%	0.90 +31.4%	3.09 +19.0%	2.85 +18.6%	1.16 +1.8%	0.51 -5.0%	0.46 -14.0%	0.54 -10.0%	0.69 +39.8%	1.39 +41.1%	2.64 +17.9%	3.36 +2.0%	3.37 +24.9%	3.43 +19.2%	3.05 +11.6%	1.86 +30.9%
vesdre	1.92 +13.3%	0.88 +19.8%	2.95 +13.9%	0.84 +1.5%	0.94 +27.8%	3.05 +15.9%	2.87 +15.6%	1.26 +9.5%	0.62 +11.5%	0.57 -8.6%	0.69 -15.9%	0.75 +41.8%	1.41 +37.3%	2.54 +16.9%	3.37 +4.5%	3.26 +23.7%	3.54 +12.6%	3.02 +13.6%	1.85 +23.9%
demer	1.95 +9.2%	0.91 +13.3%	2.95 +13.0%	0.85 -0.1%	1.02 +19.6%	3.05 +14.6%	2.86 +11.8%	1.24 +7.0%	0.65 +0.7%	0.53 -2.5%	0.68 -9.4%	0.82 +29.1%	1.52 +22.4%	2.48 +16.8%	3.42 +1.9%	3.26 +25.2%	3.52 +10.3%	2.99 +10.6%	1.89 +18.9%
dendre	1.86 +11.4%	0.88 +11.2%	2.81 +14.1%	0.78 +1.6%	0.99 +17.0%	2.96 +12.7%	2.71 +13.0%	1.20 +7.8%	0.60 -1.8%	0.51 -9.8%	0.63 -8.0%	0.77 +25.0%	1.44 +22.4%	2.35 +17.3%	3.21 +3.2%	3.18 +22.5%	3.37 +12.9%	2.89 +10.3%	1.83 +20.5%
dyle	1.91 +9.7%	0.90 +11.7%	2.91 +12.2%	0.83 -0.6%	1.00 +19.7%	3.01 +12.5%	2.78 +12.2%	1.24 +4.8%	0.65 -3.0%	0.52 -8.5%	0.66 -13.0%	0.80 +30.8%	1.48 +24.3%	2.46 +15.5%	3.30 +2.7%	3.21 +25.7%	3.42 +12.1%	2.98 +10.1%	1.88 +19.0%

Agrégation: VAR

Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	2.17 +33.8%	0.50 +47.8%	1.75 +20.6%	0.42 -8.1%	0.52 +75.3%	1.85 +6.2%	1.41 +36.3%	0.47 -3.5%	0.25 -19.6%	0.18 -57.8%	0.21 -12.3%	0.27 +55.0%	0.56 +80.7%	1.22 -6.2%	1.61 +5.8%	1.54 +24.9%	1.40 +37.2%	1.07 +7.3%	0.43 +158.8%
viroin	2.16 +32.6%	0.51 +38.2%	1.72 +21.3%	0.44 -18.0%	0.52 +72.2%	1.85 +4.1%	1.40 +34.0%	0.49 -9.0%	0.22 -20.9%	0.18 -50.4%	0.20 -20.3%	0.28 +55.1%	0.53 +73.9%	1.19 -13.9%	1.57 +6.7%	1.46 +34.4%	1.39 +32.4%	1.09 +10.0%	0.44 +145.5%
semois	2.36 +30.5%	0.43 +71.0%	1.87 +21.3%	0.36 -8.4%	0.47 +119.3%	2.09 +0.6%	1.65 +20.2%	0.44 -13.7%	0.16 -20.9%	0.15 -49.0%	0.17 -25.2%	0.20 +95.0%	0.52 +96.3%	1.34 -6.3%	1.62 +13.2%	1.81 +25.7%	1.58 +28.1%	1.27 -2.1%	0.46 +161.0%
vesdre	2.20 +29.8%	0.55 +42.2%	1.80 +17.8%	0.45 +0.3%	0.55 +66.8%	1.83 +6.2%	1.44 +32.0%	0.46 +9.2%	0.29 -7.4%	0.21 -52.2%	0.25 -16.9%	0.28 +76.0%	0.57 +88.8%	1.13 +4.7%	1.58 +3.6%	1.56 +16.4%	1.34 +40.9%	1.03 +14.1%	0.47 +117.8%
demer	2.04 +29.1%	0.53 +26.4%	1.52 +18.1%	0.43 -4.5%	0.52 +43.0%	1.56 +9.5%	1.33 +20.0%	0.55 -18.0%	0.25 +4.0%	0.24 -31.7%	0.25 -7.5%	0.25 +58.5%	0.51 +61.2%	0.92 +15.1%	1.35 +0.1%	1.43 +25.9%	1.20 +32.3%	0.97 +13.1%	0.43 +81.7%
dendre	1.90 +29.6%	0.49 +20.6%	1.37 +16.8%	0.43 -14.5%	0.45 +52.6%	1.39 +12.1%	1.24 +23.3%	0.47 -34.0%	0.22 -5.8%	0.24 -38.3%	0.23 -5.6%	0.24 +43.0%	0.43 +85.3%	0.80 +17.0%	1.20 +3.2%	1.38 +20.4%	1.12 +19.0%	0.79 +21.9%	0.45 +68.0%
dyle	2.00 +29.0%	0.52 +23.2%	1.44 +17.8%	0.44 -15.8%	0.50 +48.9%	1.51 +12.0%	1.29 +23.1%	0.53 -23.7%	0.24 -8.0%	0.22 -37.5%	0.24 -1.4%	0.25 +61.4%	0.47 +78.1%	0.89 +8.6%	1.34 -1.5%	1.41 +22.0%	1.20 +23.8%	0.95 +9.4%	0.45 +68.0%

Agrégation: Q10

Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.274 +8.1%	0.172 +6.0%	1.39 +19.9%	0.164 +10.1%	0.200 +4.4%	1.43 +31.4%	1.37 +12.6%	0.486 +14.7%	0.183 +8.0%	0.0957 +12.6%	0.141 -9.0%	0.214 +64.3%	0.657 +33.4%	1.36 +26.9%	1.69 +10.3%	1.78 +48.4%	2.17 +13.2%	1.71 +12.5%	1.08 +18.7%
viroin	0.279 +0.2%	0.177 -2.7%	1.35 +22.0%	0.155 +12.0%	0.205 +4.1%	1.43 +30.5%	1.34 +13.5%	0.453 +14.2%	0.169 -1.3%	0.0921 +20.0%	0.132 -6.5%	0.211 +49.1%	0.621 +26.0%	1.32 +29.2%	1.73 -1.4%	1.81 +39.4%	2.10 +9.2%	1.74 +16.0%	1.01 +21.8%
semois	0.259 +6.5%	0.152 +3.5%	1.38 +20.9%	0.142 -0.5%	0.174 +17.8%	1.49 +28.3%	1.34 +16.1%	0.410 +24.1%	0.145 +6.9%	0.102 +16.9%	0.126 -2.3%	0.221 +33.3%	0.584 +42.4%	1.29 +31.6%	1.77 +2.2%	1.85 +41.3%	2.11 +19.2%	1.64 +29.2%	0.992 +30.0%
vesdre	0.297 +7.5%	0.174 +9.5%	1.33 +25.4%	0.172 +5.7%	0.224 -1.0%	1.43 +30.6%	1.27 +19.4%	0.504 +13.8%	0.188 -7.5%	0.115 +13.8%	0.174 -13.8%	0.225 +56.3%	0.607 +29.4%	1.30 +24.7%	1.81 +11.8%	1.74 +53.1%	2.15 +13.3%	1.80 +12.3%	0.920 +44.1%
demer	0.304 +11.5%	0.180 +8.8%	1.43 +18.0%	0.160 +2.6%	0.221 +9.8%	1.56 +22.1%	1.39 +17.5%	0.499 +19.3%	0.157 -9.9%	0.120 -2.2%	0.133 -9.3%	0.280 +31.8%	0.748 +17.6%	1.35 +25.5%	1.85 +3.8%	1.90 +37.2%	2.18 +8.7%	1.92 +3.3%	1.07 +25.8%
dendre	0.291 -0.1%	0.163 +7.3%	1.34 +23.2%	0.155 -1.3%	0.204 -0.7%	1.51 +21.2%	1.27 +21.1%	0.454 +17.8%	0.149 -11.4%	0.0946 +10.4%	0.131 -2.3%	0.291 +22.9%	0.729 +6.7%	1.39 +28.5%	1.81 -2.0%	1.93 +25.1%	2.21 +3.7%	1.85 +5.5%	1.02 +22.3%
dyle	0.303 +2.0%	0.183 -6.2%	1.40 +19.9%	0.156 -3.2%	0.227 -5.3%	1.51 +21.7%	1.37 +16.0%	0.475 +13.2%	0.184 -14.0%	0.114 -0.6%	0.129 -6.8%	0.273 +27.9%	0.736 +9.6%	1.33 +23.5%	1.79 -0.7%	1.84 +30.7%	2.12 +8.9%	1.81 +3.4%	1.06 +24.7%

Agrégation: Q95

Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	4.67 +13.3%	2.24 +24.0%	5.34 +12.8%	2.15 -5.6%	2.33 +34.4%	5.38 +9.4%	4.80 +17.0%	2.45 +3.6%	1.50 -17.0%	1.25 -15.4%	1.52 -14.4%	1.61 +38.4%	2.66 +40.0%	4.39 +6.4%	5.34 +3.3%	5.49 +16.2%	5.50 +12.3%	4.84 +8.2%	2.86 +47.4%
viroin	4.70 +13.7%	2.25 +17.2%	5.22 +15.2%	2.20 -11.5%	2.28 +36.6%	5.41 +8.8%	4.82 +18.0%	2.47 -0.9%	1.58 -16.8%	1.19 -12.2%	1.47 -14.8%	1.61 +35.8%	2.76 +31.3%	4.36 +6.4%	5.21 +7.2%	5.48 +16.5%	5.38 +13.2%	4.65 +11.8%	2.95 +41.1%
semois	4.81 +13.0%	2.06 +25.0%	5.50 +13.7%	1.88 -1.9%	2.15 +48.0%	5.63 +8.0%	4.95 +17.4%	2.31 -0.3%	1.26 -18.6%	1.21 -25.4%	1.28 -10.4%	1.42 +44.0%	2.62 +38.5%	4.55 +9.3%	5.37 +11.4%	5.61 +17.8%	5.80 +14.4%	4.91 +0.8%	3.00 +49.8%
vesdre	4.73 +10.3%	2.36 +21.1%	5.35 +9.3%	2.19 -1.9%	2.30 +35.7%	5.47 +5.4%	5.00 +13.7%	2.37 +10.1%	1.68 -10.3%	1.41 -19.9%	1.65 -15.0%	1.61 +47.5%	2.70 +36.4%	4.13 +9.2%	5.46 -2.9%	5.41 +14.9%	5.46 +9.1%	4.90 +4.3%	2.96 +38.6%
demer	4.58 +9.5%	2.27 +17.7%	5.23 +15.0%	2.08 -2.0%	2.33 +26.7%	5.33 +5.7%	4.83 +10.3%	2.52 -0.1%	1.74 -8.5%	1.34 -5.6%	1.62 -11.9%	1.62 +33.0%	2.84 +24.4%	3.98 +9.7%	5.08 +4.2%	5.35 +13.9%	5.26 +4.9%	4.65 +7.0%	3.02 +28.1%
dendre	4.42 +10.3%	2.19 +15.9%	4.88 +8.3%	2.06 -7.9%	2.27 +24.4%	4.95 +8.0%	4.57 +12.6%	2.38 -8.7%	1.51 -11.3%	1.29 -8.5%	1.49 -9.8%	1.63 +29.0%	2.72 +22.9%	3.71 +14.5%	4.84 +3.5%	5.35 +9.9%	4.99 +7.6%	4.28 +10.0%	2.95 +22.9%
dyle	4.49 +10.6%	2.28 +14.7%	5.12 +6.7%	2.09 -7.2%	2.30 +27.8%	5.23 +4.8%	4.73 +9.3%	2.45 -2.0%	1.65 -11.9%	1.26 -5.6%	1.55 -11.9%	1.60 +32.4%	2.69 +26.5%	3.93 +10.3%	4.87 +4.6%	5.36 +12.5%	5.14 +7.7%	4.63 +4.8%	3.04 +25.7%

Figure 7-46 : Valeurs de références de l'ETP estimées par GLEAM pour les 7 bassins

Valeurs de référence - S_gleam_model

Valeur de référence = droite de Theil-Sen évaluée en 1985 ; variation = pente × 40 ans / valeur_1985, en %.

Agrégation: MEAN																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.81 -1.6%	0.80 -1.2%	0.81 -2.7%	0.83 +1.8%	0.77 -4.0%	0.78 -1.7%	0.85 -3.9%	0.80 +0.0%	0.82 +3.3%	0.84 +4.6%	0.83 +4.9%	0.78 -6.4%	0.73 -10.7%	0.70 -3.8%	0.78 +2.8%	0.84 -2.6%	0.85 -4.5%	0.86 -2.7%	0.86 -4.8%
viroin	0.79 -1.4%	0.78 +0.4%	0.81 -3.4%	0.82 +2.1%	0.73 -1.4%	0.78 -2.4%	0.85 -4.5%	0.79 -0.1%	0.82 +3.6%	0.83 +6.1%	0.82 +3.7%	0.73 -1.8%	0.69 -7.3%	0.70 -2.7%	0.79 +1.4%	0.83 -2.9%	0.84 -5.5%	0.85 -5.4%	0.86 -5.3%
semois	0.81 -0.8%	0.80 -0.1%	0.81 -1.7%	0.83 +3.2%	0.78 -4.6%	0.78 -2.7%	0.85 -1.3%	0.80 +2.0%	0.84 +3.1%	0.84 +7.3%	0.84 +3.9%	0.80 -4.6%	0.74 -14.0%	0.69 -5.6%	0.78 +1.5%	0.83 -1.7%	0.84 -1.4%	0.86 -0.4%	0.85 -0.9%
vesdre	0.78 +0.8%	0.80 +1.5%	0.77 -1.1%	0.81 +4.4%	0.78 -0.9%	0.74 -0.6%	0.81 -1.7%	0.77 +2.2%	0.83 +4.2%	0.84 +7.6%	0.83 +5.1%	0.77 -0.7%	0.74 -7.4%	0.71 -2.8%	0.71 +4.7%	0.80 -2.5%	0.80 -0.4%	0.80 +0.2%	0.82 -4.1%
demer	0.74 +3.1%	0.77 +3.5%	0.71 +2.9%	0.78 +4.7%	0.76 +1.8%	0.69 +5.0%	0.73 -0.4%	0.72 +5.8%	0.80 +4.9%	0.83 +6.0%	0.81 +3.4%	0.76 +2.5%	0.70 +0.1%	0.66 +7.8%	0.66 +9.3%	0.73 +2.1%	0.74 -1.9%	0.73 +1.2%	0.74 +1.0%
dendre	0.76 +5.7%	0.80 +4.4%	0.71 +7.1%	0.80 +4.6%	0.79 +4.1%	0.71 +6.2%	0.73 +6.6%	0.74 +5.8%	0.83 +4.6%	0.84 +5.9%	0.84 +3.7%	0.80 +4.2%	0.75 +2.2%	0.70 +7.9%	0.70 +10.4%	0.72 +5.7%	0.72 +5.5%	0.72 +7.5%	0.74 +6.5%
dyle	0.74 +3.3%	0.75 +3.6%	0.72 +2.6%	0.78 +4.9%	0.72 +4.1%	0.70 +7.4%	0.75 -3.0%	0.72 +6.9%	0.80 +4.0%	0.82 +7.0%	0.79 +1.9%	0.72 +3.6%	0.66 -0.3%	0.65 +10.6%	0.70 +10.4%	0.73 +6.3%	0.75 -1.5%	0.76 -4.4%	0.75 -3.1%

Agrégation: VAR																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.02 +10.8%	0.03 +23.2%	0.02 +1.4%	0.03 -4.0%	0.03 +37.8%	0.02 +4.7%	0.01 +4.9%	0.02 +12.0%	0.03 -15.0%	0.03 -15.8%	0.03 -11.2%	0.02 +42.8%	0.02 +6.5%	0.02 -21.0%	0.02 +13.8%	0.01 +8.2%	0.01 +3.1%	0.01 +3.4%	0.01 -9.7%
viroin	0.03 +7.6%	0.03 +14.5%	0.02 +2.8%	0.03 -1.4%	0.03 +23.6%	0.02 +2.8%	0.01 +13.1%	0.02 +13.1%	0.03 -11.3%	0.03 -13.2%	0.03 +7.3%	0.03 +29.8%	0.02 +9.8%	0.02 -11.2%	0.02 +14.2%	0.02 -1.8%	0.01 +15.2%	0.01 +3.6%	0.01 +11.6%
semois	0.02 +14.6%	0.03 +21.7%	0.02 +0.8%	0.03 -11.0%	0.03 +43.5%	0.02 +4.9%	0.01 -10.6%	0.02 +2.7%	0.03 -16.0%	0.03 -19.7%	0.03 -3.9%	0.02 +29.9%	0.02 -0.6%	0.02 -21.4%	0.02 +8.8%	0.01 -1.9%	0.01 -6.0%	0.01 -3.2%	0.01 -23.5%
vesdre	0.02 +6.4%	0.03 +9.4%	0.02 +3.6%	0.03 -10.2%	0.02 +28.8%	0.02 +0.5%	0.01 +9.1%	0.02 +7.8%	0.03 -17.3%	0.03 -32.0%	0.03 -17.8%	0.02 +5.5%	0.02 +19.4%	0.02 -19.8%	0.02 +36.0%	0.01 -5.0%	0.01 +13.1%	0.01 +19.3%	0.02 -7.7%
demer	0.02 +11.8%	0.02 +11.2%	0.01 +17.2%	0.02 -1.8%	0.02 +17.6%	0.01 +14.8%	0.01 +28.6%	0.02 -0.3%	0.02 -2.4%	0.02 -26.5%	0.01 +0.4%	0.01 +5.7%	0.01 +30.7%	0.01 +18.9%	0.01 +69.9%	0.01 +11.5%	0.01 +51.6%	0.01 +39.3%	0.01 +2.7%
dendre	0.01 +5.3%	0.02 +6.8%	0.01 +10.7%	0.02 -10.4%	0.01 +23.1%	0.01 +5.4%	0.01 +13.2%	0.01 -14.5%	0.02 -10.5%	0.02 -19.9%	0.01 +11.2%	0.01 +40.1%	0.01 +24.9%	0.01 +25.1%	0.01 +30.2%	0.01 -4.7%	0.01 +27.7%	0.01 +45.5%	0.01 -6.0%
dyle	0.02 +9.6%	0.03 +5.6%	0.01 +10.4%	0.02 -4.8%	0.02 +18.5%	0.01 +0.1%	0.01 +27.3%	0.02 -2.4%	0.02 -9.3%	0.02 -12.1%	0.02 -4.5%	0.02 +23.1%	0.02 +5.4%	0.02 +19.4%	0.01 +38.5%	0.01 -4.1%	0.01 +27.7%	0.01 +32.4%	0.01 +14.8%

Agrégation: Q10																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.601 -4.0%	0.583 -6.1%	0.643 -3.5%	0.592 +1.4%	0.580 -12.5%	0.595 -0.7%	0.708 -4.1%	0.622 -5.0%	0.587 +1.6%	0.583 +3.0%	0.612 +2.6%	0.593 -11.1%	0.564 -14.0%	0.535 -0.7%	0.635 +0.0%	0.698 -0.5%	0.713 -4.0%	0.723 -2.3%	0.704 -1.2%
viroin	0.575 -2.3%	0.555 -4.1%	0.645 -3.8%	0.592 +0.6%	0.536 -7.4%	0.600 -2.5%	0.699 -6.2%	0.615 -2.9%	0.592 +5.0%	0.585 +3.4%	0.565 +1.7%	0.545 -8.8%	0.521 -6.4%	0.547 -3.5%	0.632 +0.0%	0.676 -0.4%	0.698 -6.5%	0.702 -4.7%	0.704 -5.2%
semois	0.590 -3.8%	0.572 -4.7%	0.632 -3.1%	0.592 +5.1%	0.572 -12.4%	0.577 -3.2%	0.700 +0.9%	0.613 +0.3%	0.587 +11.2%	0.587 +9.1%	0.596 +1.4%	0.594 -12.4%	0.566 -17.2%	0.527 -4.2%	0.618 -1.7%	0.684 +0.1%	0.711 -2.2%	0.722 -1.1%	0.689 +2.7%
vesdre	0.589 -0.9%	0.578 -1.9%	0.611 -1.3%	0.579 +2.7%	0.581 -6.7%	0.580 -0.5%	0.658 -1.9%	0.576 +0.0%	0.609 +3.1%	0.600 +10.3%	0.598 +7.9%	0.575 -1.7%	0.572 -11.4%	0.554 -0.3%	0.591 +1.1%	0.655 -2.1%	0.661 -2.6%	0.672 -1.6%	0.656 -1.3%
demer	0.601 +0.7%	0.602 +0.3%	0.607 +0.1%	0.615 +3.8%	0.595 -1.2%	0.586 +3.8%	0.632 -2.3%	0.597 +3.5%	0.636 +4.4%	0.668 +6.5%	0.679 +2.7%	0.615 -1.3%	0.570 -1.8%	0.569 +3.7%	0.601 +2.8%	0.630 +2.3%	0.638 -4.4%	0.646 -4.4%	0.618 +0.8%
dendre	0.635 +4.5%	0.659 +2.8%	0.622 +5.1%	0.646 +5.0%	0.675 +0.5%	0.621 +4.3%	0.625 +5.8%	0.624 +6.4%	0.666 +4.8%	0.692 +6.3%	0.708 +4.1%	0.691 +0.4%	0.642 +2.1%	0.628 +2.3%	0.619 +5.7%	0.628 +4.3%	0.631 +4.9%	0.650 +4.6%	0.631 +7.8%
dyle	0.590 +1.4%	0.555 +4.0%	0.605 +0.7%	0.605 +5.5%	0.525 +2.6%	0.588 +5.3%	0.636 -5.3%	0.601 +5.2%	0.630 +3.8%	0.649 +6.8%	0.636 +5.1%	0.542 +1.0%	0.508 +4.6%	0.557 +7.1%	0.613 +3.6%	0.624 +6.6%	0.640 -2.8%	0.661 -7.3%	0.623 -2.7%

Agrégation: Q95																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.990 -0.6%	0.965 -3.9%	0.998 +0.1%	1.00 +0.0%	0.999 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%
viroin	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.986 -0.2%	0.972 -1.8%	1.000 +0.0%	1.00 +0.0%	0.999 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%
semois	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.992 -0.4%	0.981 +0.3%	0.995 +0.0%	1.00 +0.0%	0.999 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%
vesdre	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.999 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.992 +0.0%	0.999 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.999 +0.0%	0.988 -0.6%	0.967 -3.6%	0.955 +3.7%	0.991 -0.0%	0.987 -0.4%	0.990 +0.8%	0.999 -0.0%
demer	1.000 +0.0%	1.00 +0.0%	0.912 +5.7%	1.00 +0.0%	0.998 +0.2%	0.898 +6.2%	0.921 +3.5%	0.973 +0.9%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.000 +0.0%	0.990 +0.4%	0.906 +1.1%	0.841 +8.0%	0.848 +12.7%	0.920 +2.0%	0.900 +2.2%	0.906 +5.5%	0.941 +1.5%
dendre	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.919 +5.5%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.900 +6.1%	0.931 +3.8%	0.982 +1.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.997 +0.0%	0.941 +1.7%	0.868 +9.4%	0.861 +11.9%	0.910 +3.1%	0.871 +4.4%	0.891 +8.6%	0.946 +3.6%
dyle	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.950 +3.3%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.928 +5.8%	0.965 +0.1%	0.992 +0.3%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	1.00 +0.0%	0.984 +1.2%	0.921 -0.9%	0.832 +11.0%	0.902 +9.0%	0.962 +1.7%	0.922 +0.1%	0.936 -0.8%	0.970 +0.1%

Figure 7-47 : Valeurs de références du stress hydrique estimées par GLEAM.

Valeurs de référence - ETR_era_mm

Valeur de référence = droite de Theil–Sen évaluée en 1985 ; variation = pente × 40 ans / valeur_1985, en %.

Agrégation: MEAN																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	1.77	0.67	2.82	0.66	0.68	2.92	2.72	1.17	0.52	0.34	0.36	0.46	1.20	2.27	3.26	3.33	3.49	2.83	1.81
	+9.0%	+19.4%	+8.6%	+7.1%	+29.9%	+7.9%	+10.2%	+7.9%	+20.8%	+15.0%	-0.2%	+48.0%	+29.3%	+14.9%	-3.9%	+12.0%	+2.3%	+7.1%	+17.6%
viroin	1.78	0.70	2.80	0.68	0.73	2.93	2.71	1.18	0.54	0.36	0.41	0.48	1.25	2.27	3.26	3.36	3.48	2.81	1.85
	+8.9%	+17.5%	+8.5%	+6.6%	+23.4%	+6.6%	+9.4%	+8.5%	+20.8%	+13.4%	-2.9%	+57.0%	+23.6%	+13.5%	-3.5%	+10.3%	+3.9%	+8.1%	+15.2%
semois	1.73	0.62	2.82	0.62	0.64	2.88	2.70	1.12	0.48	0.28	0.29	0.41	1.16	2.19	3.22	3.31	3.47	2.81	1.80
	+10.0%	+19.7%	+8.8%	+4.3%	+32.9%	+9.3%	+9.3%	+5.5%	+18.8%	+12.0%	+1.1%	+54.7%	+33.5%	+17.3%	-1.7%	+13.0%	+2.4%	+8.5%	+15.1%
vesdre	1.75	0.70	2.77	0.72	0.69	2.82	2.70	1.19	0.58	0.37	0.41	0.51	1.19	2.15	3.18	3.24	3.47	2.78	1.77
	+9.2%	+17.9%	+9.1%	+8.0%	+26.8%	+8.2%	+9.3%	+9.1%	+14.0%	+20.0%	+2.9%	+45.8%	+25.1%	+15.2%	-4.1%	+13.1%	+3.0%	+7.9%	+21.5%
demer	1.67	0.74	2.55	0.74	0.78	2.70	2.46	1.12	0.58	0.46	0.53	0.53	1.26	2.12	3.01	3.10	3.14	2.48	1.64
	+9.5%	+18.1%	+9.7%	+8.4%	+22.9%	+5.0%	+9.6%	+12.3%	+13.2%	+13.7%	+2.5%	+55.5%	+14.5%	+10.3%	-6.4%	+9.4%	+4.4%	+12.6%	+20.7%
dendre	1.67	0.77	2.55	0.72	0.80	2.70	2.44	1.09	0.58	0.43	0.52	0.59	1.32	2.16	3.01	3.01	3.10	2.51	1.64
	+8.4%	+15.8%	+8.0%	+9.7%	+19.5%	+5.3%	+7.2%	+15.8%	+13.8%	+13.9%	+3.1%	+43.9%	+10.7%	+11.0%	-6.3%	+10.2%	+2.3%	+8.1%	+17.7%
dyle	1.68	0.69	2.59	0.69	0.72	2.77	2.50	1.04	0.52	0.40	0.44	0.50	1.21	2.15	3.15	3.12	3.23	2.53	1.62
	+9.4%	+17.9%	+9.7%	+7.8%	+22.4%	+6.0%	+8.0%	+15.8%	+16.9%	+12.5%	+4.3%	+53.1%	+15.4%	+11.5%	-7.2%	+12.1%	+2.6%	+8.8%	+19.7%

Agrégation: VAR																				
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois											
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep	
lesse	1.84 +9.3%	0.32 +12.0%	1.14 -5.4%	0.27 -6.8%	0.32 +42.2%	1.23 -16.8%	0.98 +2.5%	0.20 -4.9%	0.14 -8.0%	0.10 -7.5%	0.12 -0.8%	0.11 +11.9%	0.25 +32.0%	0.47 +9.5%	0.93 -14.2%	0.87 +1.5%	0.73 +25.6%	0.65 -16.0%	0.27 +48.9%	
viroin	1.76 +9.5%	0.32 +16.5%	1.08 -3.4%	0.27 -4.9%	0.33 +36.6%	1.16 -16.8%	0.95 -0.3%	0.19 -2.9%	0.15 -16.5%	0.10 -1.5%	0.15 -3.7%	0.12 +18.6%	0.24 +33.2%	0.45 +4.8%	0.88 -10.2%	0.71 +25.0%	0.72 +18.7%	0.54 -8.8%	0.26 +41.6%	
semois	1.87 +9.7%	0.29 +18.0%	1.12 -4.5%	0.26 -9.2%	0.30 +50.6%	1.22 -15.9%	1.03 +1.3%	0.18 +0.8%	0.12 -17.6%	0.09 -20.6%	0.11 -14.0%	0.11 +25.3%	0.25 +30.9%	0.46 -0.6%	0.84 -8.1%	0.87 +3.6%	0.72 +20.5%	0.63 -21.4%	0.29 +22.9%	
vesdre	1.71 +7.6%	0.33 +6.8%	1.05 -4.8%	0.28 -2.3%	0.35 +23.8%	1.09 -17.5%	0.92 +2.9%	0.17 +19.1%	0.13 -5.9%	0.11 -14.7%	0.13 +9.4%	0.13 +8.8%	0.28 +9.5%	0.45 -23.3%	0.84 -1.6%	0.83 +42.1%	0.65 -10.6%	0.64 -8.8%	0.27 +45.1%	
demer	1.35 +6.6%	0.30 +5.8%	0.79 -3.8%	0.24 +6.1%	0.35 +8.5%	0.81 -13.8%	0.73 +4.1%	0.18 -3.7%	0.15 +3.9%	0.13 +14.0%	0.15 +4.9%	0.13 +20.8%	0.21 +8.0%	0.32 +12.1%	0.64 -21.5%	0.59 +1.8%	0.46 +37.2%	0.37 +1.0%	0.22 +19.3%	
dendre	1.32 +2.3%	0.30 +8.4%	0.78 -7.2%	0.24 +12.7%	0.35 +7.6%	0.77 -17.1%	0.68 +2.3%	0.16 -0.0%	0.15 +2.6%	0.12 +30.8%	0.16 +4.4%	0.16 +5.4%	0.21 +25.1%	0.33 +14.1%	0.62 -21.7%	0.59 +6.2%	0.46 +38.1%	0.37 -1.3%	0.23 +11.5%	
dyle	1.49 +6.9%	0.27 +11.0%	0.93 -3.3%	0.21 +9.7%	0.31 +14.1%	0.93 -11.4%	0.84 -0.1%	0.15 +1.0%	0.13 -1.4%	0.10 +12.1%	0.12 +7.4%	0.11 +19.6%	0.20 +21.2%	0.34 +19.3%	0.73 -16.8%	0.68 +21.4%	0.57 +28.4%	0.42 +1.3%	0.23 +26.7%	

Agrégation: Q10																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.197	0.0855	1.56	0.0928	0.0942	1.60	1.53	0.612	0.154	0.0355	0.0449	0.130	0.530	1.43	1.91	2.23	2.44	1.83	1.20
	+48.4%	+93.7%	+11.3%	+91.2%	+39.4%	+19.3%	+10.0%	+21.1%	+100.0%	+112.7%	-25.1%	+103.2%	+68.5%	+20.0%	+6.0%	+16.1%	-7.2%	+13.5%	+13.8%
viroin	0.212	0.107	1.61	0.116	0.110	1.69	1.50	0.636	0.139	0.0583	0.0580	0.142	0.661	1.45	1.98	2.30	2.44	1.83	1.20
	+44.0%	+61.8%	+11.4%	+71.7%	+46.5%	+13.1%	+13.0%	+19.0%	+138.1%	+36.3%	-10.3%	+110.8%	+34.9%	+21.2%	-2.3%	+5.9%	-11.8%	+12.6%	+21.5%
semois	0.166	0.0561	1.54	0.0778	0.0795	1.57	1.47	0.581	0.142	0.0154	0.0091	0.0918	0.492	1.43	1.98	2.15	2.42	1.92	1.13
	+52.3%	+102.9%	+12.2%	+81.7%	+32.3%	+22.5%	+14.1%	+18.4%	+117.1%	+145.2%	+395.5%	+171.9%	+71.4%	+14.9%	-2.2%	+15.5%	-1.8%	+9.2%	+24.0%
vesdre	0.211	0.0707	1.54	0.0932	0.115	1.62	1.46	0.647	0.195	0.0332	0.0575	0.134	0.578	1.40	1.92	2.09	2.45	1.89	1.11
	+46.1%	+114.5%	+13.9%	+108.6%	+15.7%	+15.1%	+13.4%	+14.1%	+69.5%	+172.0%	-69.6%	+107.4%	+45.3%	+26.8%	+8.4%	+20.8%	-10.7%	+4.8%	+35.2%
demer	0.231	0.137	1.47	0.184	0.166	1.60	1.36	0.595	0.218	0.0908	0.100	0.176	0.696	1.45	1.92	2.11	2.29	1.72	1.07
	+54.3%	+72.1%	+16.8%	+24.9%	+39.2%	+14.3%	+20.2%	+23.4%	+42.1%	+53.7%	+6.1%	+114.1%	+27.6%	+14.2%	+1.7%	+8.7%	-5.8%	+14.2%	+33.8%
dendre	0.231	0.138	1.48	0.161	0.144	1.61	1.36	0.635	0.194	0.103	0.120	0.187	0.742	1.48	1.95	2.08	2.10	1.73	1.05
	+58.6%	+64.9%	+11.9%	+38.1%	+66.5%	+14.4%	+16.9%	+15.3%	+61.1%	+19.0%	+15.5%	+106.8%	+18.9%	+14.3%	-7.1%	+6.4%	-4.5%	+10.9%	+30.9%
dyle	0.208	0.130	1.43	0.152	0.151	1.61	1.31	0.556	0.197	0.0741	0.100	0.155	0.663	1.48	1.91	2.21	2.17	1.75	1.06
	+50.0%	+60.8%	+17.2%	+35.7%	+34.7%	+12.2%	+23.0%	+28.2%	+46.1%	+50.7%	+5.8%	+121.7%	+28.7%	+9.5%	+1.6%	+3.3%	-4.7%	+16.2%	+30.3%

Agrégation: Q95																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	4.22 +5.8%	1.69 +14.5%	4.66 +5.0%	1.67 +1.7%	1.75 +23.1%	4.77 +0.2%	4.49 +3.6%	1.81 +5.7%	1.12 +14.0%	0.931 +4.3%	1.00 -5.7%	1.05 +22.6%	1.95 +28.4%	3.25 +10.8%	4.67 -4.8%	4.86 +6.5%	4.73 +9.2%	4.02 +3.0%	2.68 +19.7%
viroin	4.16 +7.1%	1.74 +15.6%	4.61 +3.7%	1.68 +1.6%	1.79 +21.4%	4.68 +1.3%	4.40 +6.4%	1.89 +4.6%	1.14 +14.4%	0.996 +1.3%	1.08 -4.6%	1.05 +26.6%	2.01 +23.5%	3.26 +8.0%	4.68 -4.9%	4.81 +6.0%	4.73 +6.2%	4.00 +1.4%	2.71 +14.1%
semois	4.24 +5.0%	1.62 +13.5%	4.60 +6.0%	1.57 +2.0%	1.63 +28.5%	4.73 +2.0%	4.52 +2.5%	1.76 +6.4%	1.08 +3.8%	0.801 -2.5%	0.914 -13.6%	0.973 +28.1%	1.85 +31.3%	3.27 +9.9%	4.58 -3.3%	4.82 +6.9%	4.82 +6.9%	4.02 +1.5%	2.68 +16.8%
vesdre	4.12 +4.9%	1.73 +11.6%	4.59 +1.9%	1.64 +5.9%	1.75 +20.2%	4.66 -0.6%	4.40 +3.7%	1.83 +9.4%	1.26 +4.4%	1.03 +0.8%	1.11 -6.9%	1.10 +18.2%	2.04 +18.1%	3.17 +9.8%	4.45 -3.0%	4.66 +7.9%	4.67 +7.8%	4.05 -0.5%	2.72 +19.1%
demer	3.75 +5.8%	1.73 +11.0%	4.18 +1.8%	1.62 +5.8%	1.80 +16.7%	4.19 +0.2%	3.75 +10.8%	1.84 +4.9%	1.28 +12.3%	1.17 +1.2%	1.33 -9.3%	1.27 +17.1%	2.01 +14.6%	2.96 +5.8%	4.17 -5.9%	4.34 +5.3%	4.21 +7.1%	3.52 +5.1%	2.45 +14.8%
dendre	3.69 +6.4%	1.76 +10.2%	4.08 +1.8%	1.59 +6.1%	1.88 +14.3%	4.18 +0.0%	3.84 +3.8%	1.84 +5.9%	1.31 +12.0%	1.06 +13.8%	1.25 -1.8%	1.30 +15.2%	2.04 +14.0%	3.02 +6.7%	4.22 -6.5%	4.35 +1.4%	4.16 +6.4%	3.46 +5.7%	2.50 +11.6%
dyle	3.88 +6.1%	1.65 +12.2%	4.40 +0.1%	1.49 +6.8%	1.73 +18.0%	4.36 +2.7%	4.09 +2.7%	1.72 +7.4%	1.14 +14.4%	0.993 +6.5%	1.11 -5.7%	1.12 +19.6%	1.95 +13.0%	3.06 +6.4%	4.45 -6.5%	4.60 +6.8%	4.39 +6.2%	3.63 +3.6%	2.43 +16.1%

Figure 7-48 : Valeurs de référence de l'ETR estimées par ERA5-Land

Valeurs de référence - ETP_era_mm

Valeur de référence = droite de Theil–Sen évaluée en 1985 ; variation = pente × 40 ans / valeur_1985, en %.

Agrégation: MEAN																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	2.88	1.33	4.43	1.31	1.34	4.39	4.27	2.18	0.99	0.69	0.85	1.15	2.16	3.68	4.77	4.72	5.28	4.76	2.98
	+12.9%	+12.2%	+13.7%	-0.1%	+25.7%	+19.1%	+16.0%	+1.3%	+9.5%	-7.8%	-18.5%	+32.8%	+27.7%	+20.9%	+5.0%	+30.2%	+16.2%	+5.4%	+25.6%
viroin	2.97	1.43	4.45	1.38	1.51	4.50	4.33	2.29	1.09	0.72	0.93	1.31	2.28	3.76	4.87	4.78	5.22	4.83	3.13
	+12.0%	+9.0%	+16.1%	-1.1%	+15.4%	+18.9%	+17.6%	+1.0%	+6.1%	-9.4%	-20.6%	+25.9%	+26.4%	+18.6%	+6.5%	+30.6%	+19.0%	+11.6%	+25.1%
semois	2.84	1.24	4.46	1.20	1.26	4.47	4.35	2.05	0.91	0.62	0.75	1.04	2.05	3.71	4.78	4.75	5.32	4.85	3.01
	+13.7%	+14.3%	+14.9%	-2.2%	+25.0%	+19.2%	+16.4%	-0.7%	+4.9%	-18.3%	-18.5%	+34.3%	+32.0%	+20.2%	+5.0%	+30.7%	+15.5%	+5.6%	+27.9%
vesdre	2.87	1.36	4.38	1.40	1.35	4.36	4.29	2.25	1.06	0.77	0.93	1.02	2.12	3.54	4.89	4.65	5.17	4.75	2.99
	+14.0%	+14.4%	+15.1%	+3.9%	+25.5%	+18.9%	+16.6%	+6.2%	+13.8%	-5.9%	-20.6%	+53.3%	+27.6%	+21.5%	+4.0%	+31.6%	+18.4%	+6.5%	+26.0%
demer	3.40	1.80	4.95	1.75	1.86	4.99	4.93	2.67	1.43	1.03	1.30	1.51	2.67	4.13	5.39	5.25	5.85	5.39	3.54
	+10.9%	+8.2%	+13.9%	+1.7%	+13.5%	+17.9%	+12.6%	+3.3%	+4.5%	+1.5%	-9.9%	+26.7%	+17.9%	+19.5%	+5.6%	+29.8%	+13.3%	+3.8%	+20.8%
dendre	3.33	1.77	4.82	1.71	1.89	4.86	4.84	2.59	1.35	1.02	1.28	1.53	2.57	4.00	5.22	5.24	5.61	5.18	3.54
	+10.0%	+5.4%	+14.0%	-0.7%	+7.0%	+14.2%	+12.8%	+4.5%	+6.0%	-7.7%	-13.7%	+18.3%	+15.1%	+18.1%	+4.0%	+23.3%	+15.1%	+8.0%	+17.3%
dyle	3.06	1.57	4.50	1.53	1.67	4.51	4.50	2.39	1.23	0.86	1.07	1.37	2.39	3.71	4.88	4.76	5.38	4.87	3.27
	+10.1%	+6.9%	+14.4%	+0.3%	+11.2%	+16.3%	+12.7%	+2.6%	+5.0%	-4.7%	-13.2%	+23.6%	+17.5%	+20.1%	+3.0%	+27.7%	+13.3%	+8.8%	+18.9%

Agrégation: VAR																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	4.34 +36.6%	1.18 +17.0%	2.88 +36.8%	1.05 -2.9%	1.09 +36.1%	2.92 +11.7%	2.81 +23.3%	1.01 -7.0%	0.55 -27.2%	0.47 -52.8%	0.46 -37.9%	0.44 +86.4%	1.03 +26.4%	1.78 +3.9%	2.42 +22.9%	2.67 +27.5%	2.25 +64.8%	2.19 +2.5%	0.95 +99.3%
viroin	4.37 +43.3%	1.24 +17.8%	2.88 +47.2%	1.12 -5.3%	1.14 +41.0%	2.84 +18.3%	2.84 +29.8%	1.07 -0.8%	0.66 -31.9%	0.45 -49.8%	0.49 -24.4%	0.52 +69.6%	1.03 +38.2%	1.79 -1.1%	2.62 +10.4%	2.46 +35.7%	2.64 +49.2%	2.22 +10.2%	1.04 +90.8%
semois	4.56 +35.6%	1.05 +26.2%	3.19 +29.2%	0.95 -7.9%	1.07 +46.1%	3.20 +8.9%	3.09 +16.8%	1.01 -12.8%	0.42 -27.7%	0.37 -52.3%	0.38 -44.6%	0.41 +88.4%	0.95 +33.1%	1.92 -8.3%	2.52 +26.7%	2.62 +33.6%	2.55 +51.2%	2.49 -10.5%	1.02 +94.8%
vesdre	4.36 +42.6%	1.23 +17.8%	2.93 +37.6%	1.15 +4.8%	1.17 +32.5%	2.85 +16.0%	2.75 +41.7%	1.11 +2.8%	0.69 -6.6%	0.56 -47.1%	0.47 -30.2%	0.46 +118.1%	1.17 +22.5%	1.86 +3.8%	2.55 +18.8%	2.57 +23.8%	2.30 +59.3%	1.81 +26.3%	1.00 +92.2%
demer	5.08 +42.5%	1.76 +11.2%	3.30 +43.3%	1.74 +0.9%	1.60 +26.8%	3.38 +17.6%	3.42 +29.8%	1.87 -20.6%	1.01 +13.1%	0.84 -27.9%	0.77 -11.6%	0.71 +61.6%	1.44 +23.7%	2.07 +5.1%	2.86 +19.9%	3.18 +26.6%	2.77 +49.1%	2.28 +28.4%	1.50 +48.2%
dendre	4.64 +41.5%	1.73 +7.5%	3.02 +45.1%	1.65 -6.1%	1.56 +22.1%	2.95 +28.7%	2.86 +33.4%	1.90 -22.4%	0.79 +25.4%	0.89 -28.9%	0.82 -13.0%	0.86 +34.0%	1.29 +26.7%	1.85 +15.8%	2.88 +20.2%	3.12 +26.6%	2.45 +36.2%	2.05 +46.1%	1.59 +34.3%
dyle	4.12 +44.1%	1.38 +9.4%	2.62 +45.8%	1.27 +1.5%	1.27 +25.7%	2.55 +22.7%	2.62 +31.9%	1.35 -14.2%	0.73 +9.6%	0.57 -31.8%	0.53 -6.1%	0.58 +59.3%	1.12 +24.8%	1.62 +9.9%	2.29 +15.0%	2.48 +29.6%	2.12 +46.6%	1.85 +37.9%	1.21 +42.8%

Agrégation: Q10																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.420	0.230	2.27	0.243	0.289	2.31	2.21	0.980	0.304	0.112	0.193	0.395	0.945	2.08	2.64	2.82	3.25	2.82	1.65
	+18.2%	+30.5%	+19.5%	+23.8%	+8.2%	+23.1%	+21.1%	+18.3%	+56.7%	+21.9%	-9.9%	+16.9%	+36.1%	+30.6%	+5.1%	+32.6%	+12.8%	+16.0%	+31.7%
viroin	0.509	0.281	2.29	0.267	0.367	2.37	2.30	1.08	0.379	0.156	0.225	0.510	1.07	2.14	2.85	3.07	3.42	2.87	1.96
	+3.4%	+10.7%	+16.4%	+11.5%	-1.1%	+26.4%	+18.6%	+13.2%	+31.9%	-9.7%	-10.4%	-0.7%	+24.0%	+31.0%	-3.1%	+30.9%	+9.0%	+29.7%	+23.0%
semois	0.370	0.192	2.15	0.181	0.221	2.30	2.18	0.975	0.266	0.0724	0.113	0.272	0.817	2.06	2.85	2.99	3.08	2.80	1.53
	+9.1%	+19.9%	+25.2%	+35.2%	+20.0%	+23.8%	+23.1%	+3.3%	+62.2%	-6.6%	+69.8%	+28.9%	+62.2%	+30.3%	-4.8%	+33.2%	+25.7%	+16.6%	+44.5%
vesdre	0.441	0.232	2.27	0.244	0.279	2.20	2.15	1.08	0.364	0.0970	0.214	0.386	0.888	2.11	2.63	3.00	3.55	2.89	1.59
	+15.9%	+33.2%	+18.8%	+31.0%	-7.3%	+30.8%	+22.1%	+9.8%	+17.0%	+78.4%	-24.9%	+35.0%	+41.6%	+20.3%	+8.3%	+31.5%	+1.6%	+13.3%	+43.2%
demer	0.644	0.402	2.54	0.372	0.510	2.65	2.54	1.16	0.466	0.237	0.335	0.608	1.36	2.58	3.27	3.29	3.91	3.43	2.13
	+4.3%	+14.5%	+20.8%	+7.7%	+5.1%	+27.3%	+19.6%	+26.3%	+18.2%	+5.3%	-18.6%	+22.1%	+32.1%	+18.5%	+5.8%	+37.1%	+2.3%	+6.0%	+32.6%
dendre	0.653	0.362	2.55	0.387	0.467	2.62	2.47	1.22	0.409	0.241	0.297	0.630	1.36	2.35	3.26	3.39	3.89	3.68	2.14
	-0.7%	+11.4%	+20.3%	-3.3%	+4.2%	+23.0%	+23.6%	+18.2%	+24.4%	-12.7%	+1.7%	+19.6%	+20.2%	+32.2%	-2.6%	+15.8%	+1.3%	-2.8%	+24.6%
dyle	0.566	0.323	2.38	0.352	0.415	2.49	2.33	1.11	0.399	0.193	0.283	0.559	1.23	2.19	2.78	3.12	3.56	3.07	2.05
	+2.2%	+18.6%	+18.1%	-7.7%	+6.5%	+20.5%	+17.1%	+22.0%	+15.8%	+4.3%	-17.0%	+17.5%	+18.0%	+33.5%	+7.9%	+25.1%	+7.1%	+8.0%	+20.1%

Agrégation: Q95																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	6.45	3.37	7.30	3.41	3.28	7.27	7.09	3.86	2.44	1.73	2.15	2.22	3.71	5.81	6.95	7.59	7.52	7.27	4.43
	+21.7%	+13.7%	+16.9%	-10.3%	+20.7%	+12.8%	+15.4%	+3.8%	-8.6%	-17.6%	-24.5%	+33.5%	+26.5%	+7.2%	+10.7%	+17.7%	+23.0%	+0.7%	+37.0%
viroin	6.53	3.52	7.37	3.45	3.48	7.21	7.02	4.07	2.69	1.86	2.34	2.26	3.83	5.93	7.04	7.60	7.63	7.41	4.66
	+20.7%	+14.3%	+19.6%	-4.9%	+20.4%	+14.5%	+18.2%	-0.4%	-14.7%	-17.2%	-22.7%	+36.2%	+23.8%	+7.9%	+10.1%	+18.0%	+22.2%	+3.2%	+34.2%
semois	6.55	3.14	7.17	3.15	3.16	7.54	7.09	3.75	2.11	1.62	1.80	2.00	3.56	5.83	7.19	7.84	7.81	7.36	4.61
	+20.0%	+16.2%	+18.8%	-6.8%	+24.7%	+12.1%	+16.9%	-0.0%	-7.5%	-18.0%	-23.9%	+41.9%	+29.7%	+10.1%	+11.3%	+18.0%	+19.5%	-2.6%	+38.1%
vesdre	6.64	3.54	7.50	3.60	3.33	7.21	7.01	4.05	2.79	2.13	2.30	2.20	3.87	5.75	7.26	7.44	7.62	7.09	4.61
	+18.9%	+11.6%	+14.9%	-1.1%	+25.6%	+11.0%	+14.9%	+2.0%	-5.0%	-20.4%	-21.1%	+43.6%	+21.2%	+8.4%	+7.8%	+18.1%	+17.5%	+6.5%	+35.4%
demer	7.39	4.33	8.41	4.25	4.30	8.05	7.97	5.09	3.32	2.64	3.05	3.21	4.97	6.42	7.93	8.36	8.62	7.84	5.32
	+16.6%	+5.6%	+14.8%	-2.0%	+13.5%	+11.9%	+12.6%	-5.4%	+4.8%	-12.8%	-12.4%	+20.0%	+11.7%	+8.3%	+10.6%	+17.8%	+10.9%	+8.5%	+31.0%
dendre	7.20	4.29	7.89	4.30	4.04	7.71	7.55	5.08	3.08	2.68	3.10	3.14	4.65	6.08	7.73	8.11	8.05	7.49	5.35
	+15.1%	+4.3%	+14.8%	-3.7%	+13.7%	+15.3%	+14.2%	-10.8%	+4.5%	-12.0%	-14.0%	+16.7%	+11.0%	+11.8%	+8.3%	+17.0%	+17.9%	+6.7%	+26.5%
dyle	6.70	3.89	7.38	3.76	3.75	7.23	7.11	4.52	2.86	2.12	2.62	2.63	4.35	5.81	7.11	7.47	7.73	7.16	4.95
	+15.6%	+4.5%	+15.0%	-1.0%	+14.3%	+13.2%	+14.1%	-6.5%	-0.3%	-14.6%	-16.7%	+21.3%	+10.7%	+10.7%	+9.4%	+18.1%	+13.9%	+7.7%	+24.0%

Figure 7-49 : Valeurs de référence de l'ETP estimées par ERA5-Land

Valeurs de référence - StressHydrique_era

Valeur de référence = droite de Theil-Sen évaluée en 1985 ; variation = pente × 40 ans / valeur_1985, en %.

Agrégation: MEAN																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.61	0.55	0.67	0.56	0.52	0.68	0.65	0.57	0.59	0.54	0.55	0.48	0.59	0.65	0.68	0.71	0.68	0.63	0.65
	-0.2%	+10.9%	-4.9%	+11.6%	+9.2%	-6.3%	-0.7%	+6.2%	+12.0%	+21.4%	+9.5%	+16.6%	-0.8%	-7.3%	-1.5%	-7.7%	-8.8%	+7.8%	-1.2%
viroin	0.60	0.54	0.65	0.56	0.51	0.67	0.64	0.56	0.58	0.55	0.55	0.47	0.57	0.64	0.67	0.69	0.66	0.62	0.62
	-1.1%	+10.2%	-4.1%	+9.9%	+8.5%	-6.2%	-2.5%	+5.9%	+8.2%	+19.4%	+6.0%	+16.0%	-0.1%	-7.6%	-0.2%	-7.4%	-8.6%	+3.5%	-1.8%
semois	0.61	0.55	0.66	0.58	0.52	0.67	0.64	0.59	0.60	0.55	0.55	0.48	0.60	0.64	0.67	0.69	0.66	0.62	0.65
	-0.5%	+9.1%	-4.4%	+10.5%	+11.1%	-5.8%	-2.5%	+5.5%	+10.5%	+16.6%	+10.6%	+20.4%	-2.4%	-6.5%	-1.4%	-6.6%	-9.0%	+5.8%	-3.1%
vesdre	0.61	0.55	0.66	0.58	0.53	0.67	0.65	0.57	0.57	0.55	0.50	0.54	0.59	0.64	0.65	0.69	0.68	0.62	0.65
	-0.8%	+8.1%	-4.2%	+7.1%	+6.7%	-6.6%	-1.0%	+1.9%	+8.9%	+15.8%	+17.7%	+1.7%	-3.2%	-6.6%	-0.7%	-8.7%	-9.7%	+9.4%	-3.3%
demer	0.50	0.44	0.53	0.47	0.42	0.57	0.52	0.45	0.47	0.47	0.41	0.40	0.49	0.54	0.55	0.58	0.54	0.50	0.50
	+3.9%	+13.6%	-1.9%	+8.7%	+16.0%	-8.8%	+6.4%	+6.7%	+10.5%	+12.5%	+20.8%	+17.4%	+0.4%	-10.0%	-1.8%	-10.7%	-3.1%	+10.7%	+3.8%
dendre	0.51	0.47	0.55	0.48	0.45	0.57	0.53	0.47	0.50	0.49	0.44	0.45	0.52	0.57	0.57	0.58	0.57	0.51	0.50
	+2.4%	+11.9%	-3.7%	+9.1%	+12.7%	-4.9%	-0.4%	+9.1%	+8.9%	+9.5%	+13.7%	+12.2%	-1.1%	-7.7%	-0.6%	-6.5%	-11.5%	+8.3%	+2.2%
dyle	0.54	0.48	0.59	0.50	0.46	0.63	0.57	0.48	0.52	0.50	0.45	0.43	0.52	0.60	0.63	0.65	0.63	0.54	0.54
	+3.3%	+11.9%	-2.2%	+9.5%	+12.5%	-5.4%	+2.6%	+7.7%	+8.0%	+15.1%	+19.8%	+15.7%	+0.1%	-7.3%	-1.6%	-5.6%	-8.9%	+10.6%	+3.1%

Agrégation: VAR																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juil	aout	sep
lesse	0.04 -17.4%	0.06 -22.2%	0.01 +23.9%	0.05 -22.5%	0.05 -12.5%	0.01 -5.4%	0.01 +28.7%	0.02 -14.0%	0.04 -26.6%	0.08 -27.6%	0.08 -14.6%	0.04 +19.8%	0.02 -5.6%	0.02 -42.7%	0.01 +5.0%	0.01 -1.6%	0.01 +41.3%	0.01 -12.7%	0.01 -6.4%
viroin	0.04 -11.9%	0.05 -22.7%	0.01 +13.7%	0.05 -22.1%	0.05 -12.2%	0.01 -6.1%	0.01 +4.7%	0.02 -17.2%	0.04 -23.0%	0.07 -2.6%	0.07 +6.3%	0.04 +2.3%	0.02 -41.0%	0.02 -1.3%	0.01 -9.0%	0.01 +22.5%	0.01 -7.3%	0.01 -12.0%	0.01 -12.0%
semois	0.04 -16.7%	0.06 -25.7%	0.01 +24.0%	0.06 -26.4%	0.06 -16.8%	0.01 -6.6%	0.01 +27.9%	0.02 -10.0%	0.05 -36.1%	0.09 -17.1%	0.09 -13.7%	0.04 +13.8%	0.02 -10.1%	0.02 -32.5%	0.01 +9.1%	0.01 -11.5%	0.01 +18.0%	0.01 -24.4%	0.01 -3.1%
vesdre	0.03 -8.8%	0.05 -11.7%	0.01 +20.7%	0.05 -17.3%	0.06 -8.6%	0.01 +2.2%	0.01 +18.3%	0.02 -0.2%	0.04 -14.2%	0.08 -27.7%	0.07 +6.1%	0.04 +24.9%	0.02 -5.3%	0.01 -29.6%	0.01 +16.3%	0.01 -0.0%	0.01 +53.1%	0.01 +1.2%	0.01 +7.3%
demer	0.03 -9.5%	0.04 -12.6%	0.01 +6.2%	0.04 -6.8%	0.04 -12.2%	0.01 +5.3%	0.01 +7.5%	0.02 -2.4%	0.04 -9.3%	0.06 -29.5%	0.05 -10.1%	0.03 +19.2%	0.02 +3.3%	0.01 -39.8%	0.01 +1.4%	0.01 +22.0%	0.01 +15.3%	0.01 +11.7%	0.01 +11.3%
dendre	0.03 -13.4%	0.04 -20.5%	0.01 -0.6%	0.04 -10.1%	0.04 -23.7%	0.01 -2.5%	0.01 +6.6%	0.02 +4.7%	0.04 -15.3%	0.06 -31.2%	0.06 -15.6%	0.03 +12.6%	0.02 -12.2%	0.01 -48.8%	0.01 -6.4%	0.01 +20.6%	0.01 -12.0%	0.01 +34.7%	0.01 -2.8%
dyle	0.03 -18.4%	0.05 -22.4%	0.01 -0.2%	0.04 -14.1%	0.05 -13.8%	0.01 +2.1%	0.01 -0.7%	0.02 +2.6%	0.04 -18.4%	0.07 -28.4%	0.06 -9.2%	0.03 +15.1%	0.02 -11.0%	0.01 -37.5%	0.01 -3.6%	0.01 +14.0%	0.01 +9.6%	0.01 +11.0%	0.01 +9.8%

Agrégation: Q10																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juil	aout	sep
lesse	0.363 +13.7%	0.216 +64.3%	0.548 -10.7%	0.285 +41.4%	0.229 +28.1%	0.551 -6.5%	0.540 -7.8%	0.409 +7.0%	0.347 +22.8%	0.153 +120.1%	0.108 +92.3%	0.274 +26.7%	0.432 -0.1%	0.512 -2.8%	0.570 -1.8%	0.617 -10.6%	0.587 -11.5%	0.525 +10.6%	0.524 -3.8%
viroin	0.368 +8.1%	0.241 +45.5%	0.518 -9.1%	0.309 +25.9%	0.250 +29.0%	0.533 -5.5%	0.517 -5.2%	0.373 +13.5%	0.360 +15.6%	0.216 +61.6%	0.206 +31.8%	0.271 +18.9%	0.412 -1.6%	0.501 -4.0%	0.557 +1.2%	0.585 -6.8%	0.558 -13.6%	0.489 +6.0%	0.507 -3.8%
semois	0.359 +12.7%	0.221 +63.4%	0.538 -10.5%	0.299 +40.0%	0.216 +56.6%	0.541 -6.2%	0.538 -8.2%	0.419 +7.5%	0.338 +36.4%	0.160 +98.4%	0.0711 +193.9%	0.264 +20.0%	0.443 -7.2%	0.503 -2.6%	0.570 -3.2%	0.591 -8.8%	0.565 -13.3%	0.508 +10.0%	0.528 -6.7%
vesdre	0.368 +6.7%	0.242 +40.5%	0.530 -8.4%	0.290 +28.4%	0.234 +23.9%	0.537 -6.2%	0.508 -5.4%	0.407 -0.4%	0.332 +15.3%	0.187 +65.0%	0.205 +11.3%	0.320 -5.5%	0.436 -6.3%	0.507 -2.5%	0.547 -1.8%	0.600 -12.1%	0.585 -15.4%	0.501 +14.7%	0.513 -7.2%
demer	0.280 +14.2%	0.186 +55.1%	0.398 -3.1%	0.243 +19.3%	0.185 +56.9%	0.433 -9.7%	0.373 +7.4%	0.302 +6.3%	0.288 +9.2%	0.161 +71.2%	0.133 +79.9%	0.212 +32.6%	0.344 +1.3%	0.424 -5.9%	0.441 -0.7%	0.484 -16.8%	0.420 -4.7%	0.394 +13.9%	0.372 +1.5%
dendre	0.297 +11.3%	0.218 +50.0%	0.411 -4.8%	0.249 +19.4%	0.218 +46.8%	0.445 -6.4%	0.396 -2.6%	0.313 +12.8%	0.303 +10.4%	0.198 +44.4%	0.144 +92.0%	0.240 +27.2%	0.361 +2.5%	0.433 -3.5%	0.453 +0.0%	0.478 -8.2%	0.447 -10.6%	0.402 +8.4%	0.390 -3.0%
dyle	0.306 +15.2%	0.206 +57.7%	0.442 -3.8%	0.259 +24.4%	0.189 +71.0%	0.490 -5.3%	0.424 +1.6%	0.328 +11.0%	0.319 +9.9%	0.180 +60.8%	0.144 +84.7%	0.228 +32.0%	0.376 +1.3%	0.474 -3.8%	0.518 -0.4%	0.551 -9.0%	0.483 -5.8%	0.434 +10.7%	0.424 -1.9%

Agrégation: Q95																				
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois											
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juil	aout	sep	
lesse	0.911 +1.9%	0.975 -1.3%	0.868 -3.5%	0.967 -0.4%	0.953 +0.7%	0.869 -5.8%	0.834 -1.0%	0.840 +3.2%	0.946 -1.7%	0.982 +0.0%	0.977 +0.0%	0.859 +8.9%	0.866 +1.3%	0.875 -13.1%	0.823 +0.3%	0.841 -7.5%	0.816 -2.6%	0.779 +2.2%	0.832 -3.7%	
viroin	0.910 -0.4%	0.964 -1.3%	0.853 -2.8%	0.970 -1.3%	0.931 +2.2%	0.858 -5.7%	0.819 -1.6%	0.831 -0.4%	0.945 -2.5%	0.981 -0.2%	0.989 -1.3%	0.810 +15.0%	0.852 -0.6%	0.859 -12.0%	0.822 -1.1%	0.830 -6.0%	0.799 -4.7%	0.779 -1.6%	0.808 -3.7%	
semois	0.941 -0.8%	0.991 -1.1%	0.866 -4.9%	0.986 -0.2%	0.971 +0.0%	0.871 -6.5%	0.842 -2.3%	0.890 +0.0%	0.963 -1.6%	0.998 +0.0%	0.996 +0.0%	0.861 +11.0%	0.874 -2.1%	0.887 -11.1%	0.815 +1.2%	0.831 -6.0%	0.822 -3.8%	0.784 +0.8%	0.847 -4.8%	
vesdre	0.904 +3.0%	0.967 -0.1%	0.849 -1.6%	0.969 +5.3%	0.926 +5.3%	0.849 -3.3%	0.824 +1.1%	0.841 +3.1%	0.933 +0.9%	0.984 +0.0%	0.962 +5.2%	0.846 +1.0%	0.845 +3.9%	0.841 -7.4%	0.811 +1.3%	0.842 -6.8%	0.816 -1.2%	0.758 +10.4%	0.832 -3.6%	
demer	0.777 +5.0%	0.825 +6.1%	0.731 -0.8%	0.860 -1.8%	0.783 +9.7%	0.749 -8.6%	0.705 +4.1%	0.696 +6.8%	0.847 +2.4%	0.870 +1.2%	0.848 +3.0%	0.644 +28.5%	0.721 +0.9%	0.726 -12.1%	0.701 -3.7%	0.701 -5.9%	0.700 -1.9%	0.652 +8.0%	0.659 +6.5%	
dendre	0.804 +2.5%	0.862 +0.8%	0.755 -3.0%	0.877 -0.1%	0.823 +5.1%	0.764 -5.8%	0.697 +2.0%	0.675 +13.3%	0.857 -1.8%	0.901 -0.8%	0.872 +1.9%	0.710 +19.3%	0.805 -5.1%	0.773 -14.2%	0.715 +0.1%	0.705 -1.7%	0.742 -11.9%	0.646 +8.8%	0.690 +1.8%	
dyle	0.834 +1.6%	0.894 +0.8%	0.784 -0.9%	0.898 -2.2%	0.858 +6.3%	0.812 -5.6%	0.765 +0.3%	0.714 +10.0%	0.884 -1.5%	0.935 -2.4%	0.915 +2.1%	0.730 +22.6%	0.794 -5.5%	0.799 -12.4%	0.779 -2.3%	0.771 -0.4%	0.780 -7.9%	0.680 +4.4%	0.713 +4.3%	

Figure 7-50 : Valeurs de référence du stress hydrique calculées avec l'ETR et l'ETP d'ERA5-Land

Valeurs de référence - P_mm

Valeur de référence = droite de Theil–Sen évaluée en 1985 ; variation = pente × 40 ans / valeur_1985, en %.

Agrégation: MEAN																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	2.88	2.86	2.67	3.15	2.57	2.63	2.85	3.15	2.61	2.91	3.58	2.89	3.13	2.60	2.39	3.38	2.64	2.42	2.44
	-10.5%	-5.1%	-12.6%	-8.3%	+3.5%	-23.0%	-8.7%	-32.7%	+0.6%	+26.8%	-2.4%	+0.8%	-34.9%	-43.6%	+1.3%	-20.7%	-7.6%	+9.4%	-15.3%
viroin	2.80	3.04	2.65	3.18	2.81	2.59	2.76	3.05	2.91	3.01	3.38	2.73	3.36	2.40	2.23	2.59	2.91	2.30	2.34
	-4.4%	+1.6%	-14.9%	-0.8%	+7.7%	-17.4%	-10.1%	-24.8%	-17.5%	+33.8%	+15.3%	+19.4%	-35.0%	-41.4%	+3.5%	-2.2%	-27.4%	+0.1%	+11.0%
semois	3.45	3.82	2.93	4.08	3.24	2.70	2.98	3.97	3.12	3.73	4.80	3.21	3.92	2.87	2.43	3.22	2.46	2.71	2.48
	-5.9%	+4.4%	-14.6%	+5.9%	+9.4%	-20.5%	+2.5%	-26.8%	+12.8%	+45.8%	+4.5%	+21.4%	-33.2%	-38.5%	+5.9%	-17.4%	-15.7%	-1.1%	-8.4%
vesdre	3.07	3.07	2.94	3.20	2.94	2.90	3.21	2.87	3.10	3.34	2.96	3.02	3.40	2.83	2.16	3.52	2.75	2.74	2.86
	-7.8%	-3.5%	-6.6%	-9.3%	+4.4%	-19.1%	+2.7%	-22.0%	-0.5%	+7.2%	+15.9%	-0.5%	-22.8%	-37.0%	+29.1%	-25.7%	+2.1%	+14.4%	-6.9%
demer	2.14	2.13	2.13	2.28	1.94	2.14	2.36	2.30	2.26	2.24	2.10	1.75	2.22	1.84	1.76	2.33	2.04	1.97	1.58
	-4.9%	-3.0%	-1.9%	-12.9%	-0.9%	-19.5%	+2.3%	-24.5%	-7.7%	+2.8%	+10.3%	+21.3%	-28.9%	-46.4%	+2.3%	-6.7%	+4.5%	+26.1%	+11.7%
dendre	2.35	2.23	2.35	2.39	1.99	2.23	2.36	2.21	2.29	2.20	2.19	1.86	2.41	2.03	1.90	2.66	2.55	1.84	1.83
	-3.9%	+10.7%	-8.2%	+13.2%	+13.2%	-24.0%	-1.2%	+0.9%	+15.7%	+30.7%	+23.4%	+35.1%	-23.6%	-54.8%	+8.5%	-17.8%	-22.0%	+22.0%	+7.8%
dyle	2.43	2.39	2.24	2.48	2.17	2.32	2.40	2.42	2.31	2.36	2.29	2.18	2.61	1.95	2.07	2.62	2.31	2.05	1.78
	-10.4%	-6.2%	-14.7%	+9.4%	-3.0%	-26.3%	-7.2%	-31.9%	-13.7%	+15.5%	+3.8%	+12.1%	-29.8%	-43.3%	-2.5%	-11.9%	-24.8%	+15.7%	+5.9%

Agrégation: VAR																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	23.3	26.2	19.6	31.2	20.2	15.2	22.3	34.8	18.5	23.6	23.1	13.2	19.7	13.2	13.3	15.0	18.0	17.9	17.4
	-1.7%	-23.0%	+21.3%	-40.4%	-3.5%	+14.0%	+27.5%	-76.4%	-19.8%	+7.6%	+15.6%	+46.2%	-18.7%	-37.2%	+24.6%	+47.3%	+7.5%	+19.8%	+2.2%
viroin	28.3	33.0	22.6	38.8	25.3	17.4	27.4	36.1	23.4	25.2	29.4	15.9	21.6	14.3	13.4	14.1	22.9	19.5	17.2
	-10.2%	-20.4%	-0.3%	-35.1%	+10.8%	+10.3%	-5.4%	-60.2%	-47.6%	+23.9%	+18.0%	+64.0%	-36.3%	-29.4%	+13.6%	+82.2%	-24.6%	+7.3%	+28.1%
semois	36.8	48.0	24.8	58.2	42.2	20.3	28.1	61.7	31.4	52.1	51.0	26.9	30.7	22.6	14.7	17.6	20.9	27.8	22.3
	-6.2%	-14.5%	+14.2%	-30.0%	-7.2%	+9.2%	+24.9%	-73.3%	-18.1%	+10.7%	+14.4%	+41.7%	-20.2%	-41.3%	+37.2%	+42.7%	-15.9%	-16.2%	+6.3%
vesdre	27.4	28.9	25.1	33.1	30.1	23.8	27.0	27.8	21.4	23.3	24.6	20.1	21.7	16.7	12.8	25.6	23.4	23.4	28.4
	-5.9%	-33.6%	+17.0%	-44.9%	-22.6%	+1.6%	+17.7%	-59.4%	-29.3%	-10.7%	-9.1%	-7.3%	-23.0%	-29.6%	+54.2%	+19.7%	-20.6%	+41.2%	+7.2%
demer	14.9	14.1	14.3	16.2	11.2	12.2	15.7	18.0	11.7	14.6	11.2	7.55	8.90	7.86	6.77	11.1	16.9	10.3	8.89
	+12.1%	-17.6%	+47.5%	-28.1%	-0.2%	+14.6%	+11.6%	-49.8%	-33.0%	-14.8%	+7.7%	+38.0%	-16.3%	-34.5%	+58.6%	+154.5%	-6.0%	+58.4%	+26.5%
dendre	16.0	15.5	15.8	17.9	11.6	13.7	17.8	18.0	14.2	11.9	11.6	6.76	11.8	8.14	11.6	14.4	18.0	12.4	9.04
	+14.2%	+7.2%	+27.0%	-0.4%	+16.7%	-1.2%	+31.0%	-19.8%	+3.7%	+37.2%	+40.4%	+66.5%	+1.4%	-49.9%	+7.4%	+66.2%	-6.0%	+28.7%	+21.9%
dyle	19.0	17.9	17.5	20.9	14.5	14.7	18.5	23.3	14.0	17.3	14.9	13.6	12.3	8.80	12.7	13.6	18.5	15.5	9.18
	-8.1%	-26.8%	+12.2%	-38.2%	-9.7%	-3.0%	+15.2%	-60.6%	-43.1%	-3.1%	+6.5%	-2.3%	-28.4%	-25.8%	+21.9%	+55.3%	-4.0%	+15.9%	+42.8%

Agrégation: Q10																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.0000 +115.3%	0.0013 —	0.0000 —	0.0072 +63.6%	0.0019 +0.0%	0.0000 —	0.0000 —	0.0090 +0.0%	0.0131 +60.1%	0.0137 +40.0%	0.0090 +0.0%	0.0080 +0.0%	0.0005 +0.0%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0059 +0.0%
viroin	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0033 +62.6%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0055 +0.0%	0.0059 +190.7%	0.0062 +111.0%	0.0040 +0.0%	0.0021 +0.0%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0052 +0.0%
semois	0.0000 +672.9%	0.0005 —	0.0000 —	0.0018 +619.3%	0.0005 +0.0%	0.0000 —	0.0015 +0.0%	0.0108 +103.9%	0.0147 +68.6%	0.0048 +269.3%	0.0091 +17.9%	0.0050 +63.2%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0040 +0.0%	0.0069 +23.7%
vesdre	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0032 +78.3%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0020 +0.0%	0.0053 +208.9%	0.0068 +195.1%	0.0105 +61.0%	0.0024 +282.0%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0058 -71.2%
demer	0.0000 +258.1%	0.0007 —	0.0000 —	0.0022 +257.9%	0.0009 +0.0%	0.0000 —	0.0000 —	0.0050 +0.0%	0.0095 +33.7%	0.0040 +155.1%	0.0021 +405.8%	0.0032 +0.0%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0009 +0.0%
dendre	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0023 +222.8%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0040 +0.0%	0.0030 +521.1%	0.0019 +461.5%	0.0021 +203.5%	0.0024 +0.0%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0014 +0.0%
dyle	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0013 +320.0%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0055 +90.9%	0.0133 +7.5%	0.0024 +181.8%	0.0005 +2975.8%	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0000 —	0.0027 +0.0%

Agrégation: Q95																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	12.8 -7.2%	12.6 -6.0%	12.0 -2.6%	14.4 -20.0%	11.4 +4.3%	10.9 -9.0%	12.7 -0.2%	15.2 -37.8%	10.5 -10.1%	11.3 +10.7%	11.6 +14.9%	9.01 +29.1%	10.9 -17.4%	8.72 -18.6%	9.46 -2.0%	11.1 -0.5%	10.5 -15.1%	10.6 +6.6%	9.71 +22.5%
viroin	13.0 +2.1%	13.4 -3.4%	11.7 +3.8%	15.3 -18.2%	12.0 +15.2%	10.7 +3.9%	13.3 -10.8%	14.0 -26.3%	13.1 -30.1%	11.0 +31.4%	12.6 +27.3%	8.76 +45.4%	11.4 -17.9%	9.95 -23.9%	8.80 +14.2%	10.6 +18.8%	10.7 -25.0%	10.2 +10.5%	9.20 +26.3%
semois	15.5 -0.7%	17.6 +4.2%	13.4 -4.9%	20.0 -13.1%	14.5 +18.6%	11.2 +3.5%	14.7 -12.2%	19.7 -38.7%	14.4 -7.7%	15.5 +26.3%	16.9 +18.0%	11.4 +38.5%	14.7 -20.5%	11.8 -19.3%	9.66 +6.0%	11.4 +13.1%	13.5 -41.3%	12.4 +7.9%	11.6 +7.6%
vesdre	13.2 -2.7%	14.4 -17.0%	12.1 +8.9%	14.4 -24.9%	13.2 -2.6%	11.8 -0.7%	12.6 +14.5%	13.1 -30.0%	11.9 -5.5%	13.7 -3.8%	11.7 +9.9%	10.7 +10.7%	12.0 -4.8%	11.8 -30.7%	7.96 +43.5%	13.9 -16.2%	9.5 +9.5%	10.9 +31.6%	11.1 +3.4%
demer	9.74 +2.0%	9.99 -7.2%	9.71 +2.9%	10.0 -13.2%	8.11 +0.3%	9.50 -6.2%	9.69 +7.8%	11.0 -40.4%	9.25 -19.8%	9.39 +4.6%	7.55 +15.8%	6.75 +22.7%	7.51 -8.3%	6.61 -11.5%	6.33 +36.9%	9.33 +24.8%	9.45 -4.7%	7.69 +30.6%	6.56 +26.6%
dendre	10.5 +1.8%	10.5 +2.2%	10.6 -0.4%	10.8 +1.7%	8.72 +14.6%	9.79 -13.2%	10.2 +3.1%	9.38 -4.9%	9.58 +13.2%	9.07 +19.1%	6.24 +13.6%	8.25 +50.8%	7.54 +5.0%	7.12 -33.8%	7.12 +17.3%	9.64 +25.7%	10.7 -18.2%	9.00 +26.4%	7.45 +12.2%
dyle	11.0 -8.5%	11.4 -11.6%	10.3 +0.9%	11.7 -19.0%	9.72 +0.7%	9.42 -3.4%	9.82 +0.5%	12.8 -47.3%	9.28 -26.3%	10.9 +0.8%	9.16 +18.1%	8.65 +24.4%	8.46 -15.6%	8.11 -26.3%	7.98 +7.5%	9.22 +27.3%	11.6 -22.5%	9.66 +3.6%	7.99 +12.0%

Figure 7-51 : Valeurs de référence des précipitations

Valeurs de référence - Q_{mm}

Valeur de référence = droite de Theil-Sen évaluée en 1985 ; variation = pente × 40 ans / valeur_1985, en %.

Agrégation: MEAN																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	1.13 +0.8%	1.64 +9.2%	0.70 -35.2%	1.31 -11.6%	1.84 +26.0%	0.96 -40.2%	0.32 -11.3%	0.53 -41.1%	0.97 -11.8%	1.64 +33.3%	2.48 +16.5%	1.50 +67.5%	1.90 -13.7%	1.29 -47.3%	0.74 -18.6%	0.49 -40.1%	0.33 -41.4%	0.25 +5.8%	0.32 -21.7%
viroin	1.18 -1.8%	1.78 +6.7%	0.68 -29.3%	1.36 -5.2%	1.92 +26.0%	0.95 -32.9%	0.28 -18.1%	0.44 -30.2%	0.94 -8.3%	1.69 +52.8%	2.45 +15.1%	1.52 +77.4%	1.98 -28.0%	1.22 -41.2%	0.69 -15.1%	0.50 -42.2%	0.30 -36.4%	0.23 -8.5%	0.25 -12.6%
semois	1.88 -5.9%	2.84 -1.1%	0.98 -34.6%	2.49 -20.6%	2.96 +24.7%	1.35 -35.6%	0.44 -18.6%	1.06 -55.3%	2.08 -19.2%	3.04 +36.0%	4.39 +6.3%	2.06 +93.5%	2.67 -18.6%	2.12 -47.0%	1.06 -17.4%	0.67 -35.9%	0.47 -42.7%	0.33 +4.6%	0.47 -26.2%
vesdre	1.35 -3.5%	1.75 +1.0%	0.98 -19.9%	1.47 -13.8%	2.03 +18.4%	1.17 -34.1%	0.71 -4.9%	0.80 -22.8%	1.28 -12.2%	1.93 +3.0%	2.09 +4.4%	1.54 +58.7%	2.12 -7.8%	1.39 -29.9%	0.92 -7.5%	0.87 -28.0%	0.70 -33.8%	0.62 +7.2%	0.65 -6.6%
demer	0.61 -8.8%	0.74 -9.3%	0.49 -24.8%	0.64 -22.3%	0.90 +0.1%	0.62 -34.1%	0.36 -4.9%	0.42 -21.9%	0.58 -22.4%	0.78 -7.0%	1.01 -4.9%	0.80 +19.6%	0.88 -14.1%	0.74 -43.0%	0.51 -16.0%	0.45 -19.7%	0.35 -11.7%	0.36 +8.5%	0.37 -14.6%
dendre	0.69 +1.4%	0.91 +10.1%	0.40 -4.4%	0.76 +0.4%	1.13 +16.4%	0.51 -20.0%	0.24 +33.5%	0.37 -24.4%	0.61 -8.8%	0.95 +23.8%	1.44 +9.0%	1.02 +46.9%	1.06 -4.0%	0.61 -23.3%	0.36 +18.5%	0.35 -10.0%	0.25 +1.5%	0.17 +57.5%	0.19 +36.8%
dyle	0.65 -12.3%	0.72 -12.7%	0.61 -19.6%	0.69 -21.8%	0.74 -2.3%	0.67 -23.3%	0.53 -12.4%	0.59 -27.9%	0.65 -23.7%	0.77 -12.0%	0.81 -5.4%	0.71 +11.7%	0.79 -12.2%	0.72 -30.6%	0.61 -15.2%	0.59 -23.3%	0.52 -17.4%	0.53 -11.8%	0.51 -22.7%

Agrégation: VAR																				
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois											
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep	
lesse	1.90 -3.7%	2.57 -16.0%	0.32 -25.6%	1.72 -16.3%	2.81 -7.9%	0.35 -49.3%	0.05 -4.3%	0.10 -80.3%	0.27 -10.7%	1.30 -24.1%	2.44 -15.2%	0.89 +40.0%	1.13 -68.8%	0.19 -52.5%	0.05 +53.3%	0.03 -20.8%	0.01 -26.9%	0.01 +7.6%	0.02 -14.6%	
viroin	2.62 -12.5%	3.93 -8.7%	0.63 -64.9%	2.55 -43.1%	3.59 +0.1%	0.57 -48.3%	0.06 -13.8%	0.12 -69.3%	0.47 -22.0%	2.39 -15.3%	4.50 -7.5%	1.43 +88.8%	2.29 -69.9%	0.30 -45.6%	0.10 +12.7%	0.04 -63.0%	0.02 -35.6%	0.01 -14.2%	0.01 -13.4%	
semois	5.99 -12.0%	8.85 -13.4%	0.78 -34.1%	6.10 -0.7%	8.49 -13.6%	0.77 -59.2%	0.07 -30.2%	0.96 -95.1%	1.04 -7.1%	6.49 -32.4%	9.64 -17.1%	1.98 +96.7%	3.25 -74.7%	0.50 -48.5%	0.09 +46.2%	0.06 -35.1%	0.02 -56.5%	0.01 +10.1%	0.03 -37.9%	
vesdre	1.80 -10.2%	2.39 -22.3%	0.48 -19.1%	1.75 -48.8%	2.00 +9.9%	0.42 -31.9%	0.16 -18.5%	0.12 -66.1%	0.30 -48.7%	1.30 -26.2%	1.93 -23.4%	0.63 +143.7%	1.31 -41.9%	0.26 -38.1%	0.09 +12.7%	0.15 -49.9%	0.04 -21.0%	0.05 +92.6%	0.08 -0.6%	
demer	0.15 +10.0%	0.17 +9.7%	0.07 -46.5%	0.13 -24.6%	0.16 +24.8%	0.05 -24.8%	0.03 +28.4%	0.03 -66.6%	0.04 -30.2%	0.11 -4.6%	0.16 -0.5%	0.06 +103.0%	0.09 -7.1%	0.04 -45.9%	0.02 +59.8%	0.03 +25.8%	0.02 +34.7%	0.01 +234.0%	0.01 +12.4%	
dendre	0.74 -27.0%	1.03 -23.9%	0.18 -61.1%	0.61 -18.6%	1.07 -27.0%	0.18 -72.4%	0.07 +18.6%	0.10 -30.2%	0.31 -73.3%	0.50 +3.2%	1.13 -21.6%	0.27 +102.1%	0.49 -37.7%	0.07 -65.7%	0.04 +54.3%	0.04 +3.0%	0.05 -5.6%	0.06 +31.1%	0.03 +127.9%	
dyle	0.08 -9.1%	0.09 -21.3%	0.04 +10.0%	0.07 -37.7%	0.09 -19.4%	0.05 -25.1%	0.02 +103.8%	0.03 -72.1%	0.03 -51.6%	0.07 -20.1%	0.08 +0.9%	0.04 +79.8%	0.05 -40.1%	0.02 -49.0%	0.02 -8.6%	0.01 +62.6%	0.01 +114.0%	0.01 +70.8%	0.02 +41.1%	

Agrégation: Q10																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.170 -24.1%	0.319 -14.8%	0.177 -17.6%	0.246 -18.8%	0.656 +30.3%	0.361 -35.7%	0.151 -12.2%	0.213 -4.4%	0.443 -22.8%	0.583 +62.4%	0.734 +77.7%	0.677 +87.3%	0.924 -3.6%	0.779 -43.5%	0.493 -30.1%	0.301 -40.2%	0.215 -37.3%	0.141 +7.6%	0.158 -10.8%
viroin	0.167 -28.2%	0.240 -4.4%	0.158 -24.1%	0.191 +1.6%	0.553 +41.8%	0.316 -22.5%	0.142 -20.1%	0.176 -1.2%	0.346 -5.2%	0.484 +88.4%	0.645 +84.0%	0.520 +109.3%	0.693 -0.1%	0.599 -30.9%	0.406 -16.6%	0.278 -30.0%	0.189 -27.3%	0.143 -8.7%	0.146 -20.1%
semois	0.284 -36.0%	0.408 -7.7%	0.261 -33.5%	0.332 -6.5%	0.892 +32.2%	0.526 -36.0%	0.223 -30.6%	0.320 -17.5%	0.835 -20.4%	0.998 +61.6%	1.24 +61.9%	0.802 +102.3%	1.31 -15.3%	1.10 -37.8%	0.631 -22.5%	0.427 -33.1%	0.316 -39.7%	0.213 -6.1%	0.242 -32.7%
vesdre	0.489 -27.4%	0.599 -4.6%	0.482 -26.2%	0.508 -7.8%	0.837 +11.8%	0.589 -22.3%	0.429 -18.6%	0.480 -9.1%	0.595 -8.0%	0.793 +24.2%	0.921 +32.1%	0.754 +65.5%	1.08 -3.9%	0.887 -27.4%	0.638 -9.7%	0.573 -27.2%	0.499 -32.8%	0.429 -6.5%	0.462 -10.0%
demer	0.277 -18.7%	0.352 -11.8%	0.260 -22.7%	0.332 -18.4%	0.547 -13.6%	0.346 -31.9%	0.236 -16.6%	0.321 -20.5%	0.411 -27.8%	0.485 -15.0%	0.554 +1.4%	0.540 +9.4%	0.581 -18.5%	0.523 -35.1%	0.370 -23.3%	0.321 -31.9%	0.264 -22.4%	0.232 -1.2%	0.280 -21.9%
dendre	0.114 +39.4%	0.197 +20.2%	0.0806 +64.9%	0.180 -1.8%	0.391 +38.3%	0.188 +7.9%	0.0780 +41.1%	0.153 +11.0%	0.213 +16.7%	0.372 +31.9%	0.490 +50.9%	0.417 +75.6%	0.463 +0.2%	0.366 -15.2%	0.204 +15.6%	0.141 +10.4%	0.0855 +14.1%	0.0741 +57.1%	0.100 +24.4%
dyle	0.458 -23.3%	0.485 -19.2%	0.444 -24.4%	0.471 -21.6%	0.528 -1.5%	0.488 -24.6%	0.431 -21.5%	0.459 -23.0%	0.521 -20.6%	0.553 -18.4%	0.565 +0.9%	0.549 +4.9%	0.563 -8.5%	0.588 -20.8%	0.514 -19.9%	0.475 -26.3%	0.442 -22.4%	0.437 -24.1%	0.454 -25.7%

Agrégation: Q95																			
Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	3.58 +3.5%	4.87 -10.4%	1.89 -27.5%	3.37 +7.8%	5.02 +6.4%	2.12 -37.9%	0.770 -9.6%	1.24 -54.3%	1.91 -5.3%	4.08 +5.2%	5.39 +7.1%	3.16 +46.0%	4.29 -39.0%	2.33 -47.5%	1.18 +2.0%	0.859 -31.9%	0.557 -38.5%	0.470 +0.1%	0.574 -22.2%
viroin	4.22 -6.6%	5.59 -7.9%	2.33 -36.8%	4.24 -10.0%	5.43 +7.8%	2.51 -35.0%	0.705 -15.0%	1.23 -44.0%	2.23 -20.6%	4.85 +8.6%	6.80 -0.4%	3.52 +66.3%	5.02 -42.6%	2.42 -36.3%	1.26 +7.7%	0.925 -50.5%	0.596 -38.6%	0.387 -4.4%	0.472 -8.8%
semois	6.57 +1.2%	9.00 -5.4%	3.13 -34.4%	7.06 +9.1%	8.13 +9.9%	3.26 -36.6%	0.912 -19.9%	3.16 -69.8%	4.09 -10.1%	8.78 -10.8%	11.1 -10.3%	4.85 +71.7%	6.75 -44.2%	3.73 -42.1%	1.53 +2.7%	1.19 -30.6%	0.723 -42.3%	0.546 -1.1%	0.827 -27.4%
vesdre	3.58 -2.0%	4.44 +4.3%	2.37 -20.7%	3.71 -19.2%	4.65 +18.2%	2.51 -28.4%	1.39 -7.2%	1.45 -38.9%	2.14 -26.9%	3.67 -4.2%	4.76 -3.8%	3.15 +61.6%	3.92 -16.5%	2.40 -37.1%	1.50 -2.7%	1.40 -24.3%	0.998 -22.1%	1.02 +25.9%	1.09 -9.7%
demer	1.41 +5.3%	1.66 -1.6%	0.956 -21.5%	1.28 -12.4%	1.79 +4.7%	1.14 -27.7%	0.703 +5.5%	0.877 -38.7%	0.967 -20.5%	1.48 -0.4%	1.72 +1.7%	1.32 +24.9%	1.56 -15.1%	1.10 -41.6%	0.726 +0.7%	0.728 -7.1%	0.539 +5.3%	0.555 +19.7%	0.544 +2.2%
dendre	2.35 -6.1%	2.97 -4.2%	1.14 -35.0%	2.36 -13.0%	3.15 +2.4%	1.34 -43.5%	0.641 +41.2%	0.977 -7.6%	1.61 -24.2%	2.45 +14.9%	3.80 -6.9%	2.04 +51.6%	2.62 -24.9%	1.07 -35.0%	0.678 +28.3%	0.771 -8.8%	0.595 -0.8%	0.437 +52.8%	0.384 +54.7%
dyle	1.11 -6.7%	1.25 -11.3%	0.916 -13.2%	1.24 -21.3%	1.22 +2.7%	0.976 -17.0%	0.766 +2.3%	0.953 -39.9%	0.898 -29.6%	1.28 -14.6%	1.39 +2.9%	0.992 +28.8%	1.13 -18.0%	0.940 -29.7%	0.804 -10.6%	0.771 -6.8%	0.721 -6.3%	0.792 -7.6%	0.675 -9.8%

Figure 7-52 : Valeurs de référence des débits

Valeurs de référence - ET0_mm

Valeur de référence = droite de Theil-Sen évaluée en 1985 ; variation = pente × 40 ans / valeur_1985, en %.

Agrégation: MEAN

Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	1.63	0.65	2.58	0.63	0.69	2.57	2.53	1.01	0.48	0.38	0.41	0.60	1.09	1.86	2.80	2.84	3.14	2.86	1.58
	+11.5%	+11.9%	+13.2%	-6.8%	+20.1%	+20.5%	+12.0%	-5.2%	-5.8%	-12.1%	-10.1%	+16.2%	+33.9%	+25.5%	-1.0%	+32.1%	+11.2%	+6.0%	+28.0%
viroin	1.69	0.74	2.65	0.71	0.78	2.64	2.59	1.10	0.56	0.46	0.50	0.68	1.19	2.00	2.84	2.91	3.24	2.98	1.70
	+0.6%	-9.5%	+7.1%	-23.9%	-2.1%	+11.8%	+6.6%	-15.7%	-27.2%	-42.0%	-36.5%	-3.2%	+13.0%	+14.8%	-4.8%	+23.0%	+6.4%	+1.3%	+15.0%
semois	1.67	0.69	2.63	0.66	0.75	2.59	2.59	-1.07	0.53	0.41	0.46	0.63	1.14	1.92	2.88	2.99	3.22	2.91	1.64
	+6.1%	-5.6%	+10.3%	-21.1%	+6.1%	+17.6%	+6.1%	-18.9%	-22.9%	-28.7%	-28.5%	-1.1%	+22.4%	+20.4%	-4.8%	+24.0%	+7.8%	+1.7%	+19.2%
vesdre	1.61	0.70	2.53	0.68	0.73	2.54	2.50	1.06	0.50	0.42	0.46	0.63	1.07	1.86	2.89	2.80	3.11	2.73	1.57
	+11.2%	+5.8%	+13.5%	-8.2%	+16.7%	+22.0%	+14.8%	-3.5%	-4.7%	-9.6%	-14.6%	+12.1%	+28.1%	+23.1%	+0.4%	+31.0%	+12.7%	+12.6%	+29.1%
demer	1.73	0.76	2.73	0.70	0.81	2.70	2.70	1.09	0.54	0.48	0.52	0.65	1.21	2.03	3.01	3.05	3.32	2.92	1.68
	+17.6%	+16.1%	+17.4%	+6.0%	+23.9%	+25.1%	+15.7%	+6.8%	+8.8%	-0.3%	+2.2%	+33.0%	+29.9%	+26.6%	+7.6%	+36.1%	+15.5%	+11.5%	+31.8%
dendre	1.73	0.79	2.65	0.72	0.84	2.68	2.61	1.08	0.60	0.51	0.58	0.66	1.22	2.04	2.88	3.07	3.26	2.88	1.71
	+16.1%	+8.6%	+19.5%	+0.6%	+15.8%	+22.1%	+16.3%	+8.4%	-4.6%	-13.4%	-12.4%	+23.9%	+27.3%	+24.9%	+8.2%	+30.7%	+12.8%	+10.6%	+29.6%
dyle	1.73	0.77	2.69	0.72	0.82	2.68	2.64	1.09	0.56	0.50	0.50	0.65	1.21	2.05	2.87	3.03	3.30	2.93	1.75
	+8.4%	+5.8%	+11.8%	-8.9%	+13.3%	+16.7%	+11.9%	+2.2%	-11.3%	-19.3%	-14.7%	+18.2%	+21.6%	+17.9%	+2.3%	+29.4%	+9.7%	+7.4%	+22.1%

Agrégation: VAR

Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	1.83 +17.9%	0.22 +28.6%	1.58 -6.1%	0.18 -26.3%	0.21 +74.0%	1.56 -13.2%	1.39 -4.7%	0.19 -44.4%	0.05 -32.0%	0.04 -44.4%	0.04 -34.9%	0.06 +16.6%	0.25 +54.2%	0.66 +11.8%	1.39 -22.6%	1.69 -14.7%	1.33 -6.0%	1.12 -19.2%	0.34 +70.3%
viroin	1.71 +20.4%	0.20 +31.5%	1.42 +3.1%	0.18 -29.1%	0.20 +72.6%	1.45 -7.8%	1.24 +5.6%	0.15 -27.1%	0.07 -54.4%	0.05 -74.2%	0.05 -62.6%	0.06 +12.0%	0.20 +65.2%	0.61 +9.4%	1.25 -19.2%	1.45 +1.4%	1.13 +11.3%	0.91 -11.6%	0.27 +108.1%
semois	1.83 +15.4%	0.21 +19.3%	1.56 -4.6%	0.18 -45.0%	0.21 +76.7%	1.64 -14.7%	1.42 -7.1%	0.18 -54.2%	0.05 -64.1%	0.04 -62.2%	0.04 -67.3%	0.06 +1.6%	0.25 +58.9%	0.66 +5.4%	1.36 -20.9%	1.60 -4.9%	1.39 -6.7%	1.08 -17.7%	0.33 +78.9%
vesdre	1.73 +27.5%	0.22 +26.3%	1.55 +11.7%	0.20 -23.4%	0.22 +82.6%	1.61 +1.7%	1.31 +20.0%	0.19 -21.1%	0.06 -26.7%	0.05 -53.7%	0.04 -24.4%	0.07 +15.9%	0.26 +61.2%	0.67 +23.3%	1.40 -12.7%	1.62 -0.2%	1.26 +16.6%	1.06 +15.3%	0.28 +154.0%
demer	1.85 +31.8%	0.23 +46.3%	1.42 +10.0%	0.18 +2.6%	0.24 +58.3%	1.39 +4.4%	1.21 +8.3%	0.16 -8.1%	0.09 +15.5%	0.07 -7.2%	0.07 +8.6%	0.07 +80.5%	0.21 +63.1%	0.49 +30.5%	1.23 -12.0%	1.37 +6.9%	1.15 +7.4%	0.89 +0.4%	0.28 +73.6%
dendre	1.66 +33.2%	0.21 +52.4%	1.29 +13.0%	0.17 +7.7%	0.20 +76.1%	1.40 +0.1%	1.12 +6.4%	0.17 -20.4%	0.08 +7.6%	0.08 -27.1%	0.08 -23.1%	0.07 +72.5%	0.17 +64.3%	0.47 +37.6%	1.12 -4.0%	1.21 +13.5%	1.16 -4.5%	0.79 -9.2%	0.26 +81.3%
dyle	1.73 +27.3%	0.21 +43.5%	1.37 +9.3%	0.17 +3.0%	0.23 +56.6%	1.42 +2.5%	1.16 +9.5%	0.15 -8.0%	0.08 -5.8%	0.07 -39.3%	0.06 -15.0%	0.07 +66.1%	0.21 +60.0%	0.55 +21.5%	1.17 -5.8%	1.38 +8.9%	1.18 +0.9%	0.90 -2.4%	0.27 +90.7%

Agrégation: Q10

Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	0.309	0.253	1.07	0.233	0.272	1.03	1.08	0.532	0.287	0.191	0.208	0.347	0.549	0.880	1.19	1.29	1.70	1.49	0.825
	+1.2%	+2.6%	+34.3%	-1.1%	+6.9%	+49.6%	+28.8%	+12.4%	-8.9%	-6.5%	-5.0%	+14.2%	+28.1%	+37.2%	+34.9%	+68.9%	+22.6%	+15.6%	+31.0%
viroin	0.364	0.287	1.20	0.265	0.303	1.22	1.22	0.611	0.306	0.219	0.228	0.395	0.688	1.05	1.36	1.47	1.83	1.64	1.04
	-19.4%	-13.5%	+13.0%	-26.1%	-5.6%	+18.1%	+8.0%	-11.9%	-10.4%	-46.7%	-11.5%	-0.4%	-5.8%	+22.8%	+8.2%	+36.4%	+10.2%	+3.3%	-1.9%
semois	0.320	0.287	1.11	0.254	0.300	1.14	1.13	0.592	0.298	0.209	0.225	0.369	0.584	0.987	1.32	1.45	1.84	1.52	0.924
	-6.3%	-11.3%	+27.5%	-18.3%	-3.1%	+29.0%	+18.1%	-6.8%	-13.7%	-19.1%	-10.2%	+1.0%	+14.4%	+20.6%	+15.9%	+46.4%	+10.1%	+10.0%	+11.0%
vesdre	0.326	0.274	1.07	0.262	0.300	1.06	1.10	0.539	0.300	0.220	0.213	0.369	0.570	0.962	1.23	1.34	1.76	1.44	0.862
	+0.0%	-1.8%	+25.1%	-8.2%	-2.9%	+37.6%	+17.7%	+13.9%	-13.2%	-23.7%	-8.3%	+9.2%	+15.9%	+15.4%	+23.2%	+59.0%	+3.6%	+17.5%	+29.6%
demer	0.362	0.283	1.27	0.252	0.295	1.28	1.32	0.634	0.278	0.190	0.226	0.390	0.695	1.22	1.50	1.54	1.80	1.72	1.07
	+14.5%	+12.4%	+33.5%	+7.3%	+19.0%	+38.1%	+27.9%	+18.9%	+7.2%	-7.3%	+8.4%	+27.6%	+24.4%	+24.5%	+30.9%	+75.0%	+35.6%	+20.4%	+35.6%
dendre	0.400	0.299	1.29	0.258	0.313	1.31	1.29	0.618	0.289	0.217	0.245	0.422	0.735	1.24	1.56	1.63	1.92	1.67	1.05
	+0.0%	+0.0%	+30.9%	-0.5%	+3.8%	+29.3%	+29.9%	+18.7%	-0.4%	-29.3%	-8.3%	+17.4%	+21.0%	+22.5%	+17.8%	+52.3%	+29.3%	+22.7%	+35.8%
dyle	0.393	0.293	1.27	0.277	0.300	1.29	1.28	0.601	0.286	0.218	0.252	0.396	0.706	1.21	1.53	1.52	1.86	1.79	1.07
	-5.1%	-1.3%	+20.3%	-13.2%	+0.0%	+24.4%	+21.1%	+9.2%	-5.9%	-39.8%	-6.4%	+4.8%	+5.2%	+16.6%	+9.8%	+48.7%	+20.2%	+15.2%	+28.0%

Agrégation: Q95

Bassin	Année	6 mois			Saisons				Mois										
	AH	Hiv6	Ete6	Aut	Hiv	Print	Ete	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jui	aout	sep
lesse	4.42	1.62	4.94	1.48	1.59	4.99	4.59	1.83	0.874	0.704	0.828	1.02	2.00	3.36	4.68	5.12	4.88	4.50	2.57
	+7.4%	+15.3%	+4.1%	-10.1%	+31.5%	+2.1%	+4.9%	-14.2%	-16.4%	-24.2%	-22.7%	+9.4%	+32.7%	+9.3%	+0.6%	+10.4%	+9.3%	-0.9%	+28.6%
viroin	4.31	1.58	4.71	1.55	1.61	4.79	4.52	1.80	1.04	0.848	0.930	1.12	1.99	3.34	4.62	4.94	4.93	4.46	2.52
	+7.7%	+7.3%	+6.5%	-21.3%	+22.5%	+4.2%	+2.5%	-12.0%	-30.7%	-48.6%	-43.2%	-1.7%	+21.4%	+2.4%	-0.6%	+10.0%	+8.0%	-2.1%	+28.5%
semois	4.38	1.58	4.88	1.51	1.62	4.97	4.61	1.84	0.912	0.737	0.860	0.992	2.00	3.32	4.77	4.99	4.93	4.52	2.62
	+6.7%	+5.8%	+5.0%	-21.7%	+27.2%	+1.5%	+4.2%	-22.2%	-37.7%	-40.4%	-41.3%	-1.9%	+27.6%	+8.8%	-2.9%	+9.7%	+6.4%	-3.7%	+22.8%
vesdre	4.27	1.61	4.87	1.62	1.67	4.88	4.55	1.84	0.980	0.829	0.857	1.16	2.01	3.30	4.85	5.04	5.05	4.47	2.55
	+11.3%	+13.0%	+5.6%	-14.0%	+23.8%	+6.9%	+6.7%	-3.7%	-16.1%	-29.6%	-21.0%	+5.5%	+32.3%	+18.0%	+0.3%	+11.1%	+9.7%	+5.7%	+38.3%
demer	4.34	1.62	4.84	1.54	1.63	4.80	4.60	1.74	1.09	0.931	0.993	1.16	2.09	3.16	4.63	4.96	4.89	4.37	2.56
	+14.8%	+25.4%	+12.5%	+2.7%	+36.6%	+11.8%	+10.3%	+6.3%	+10.2%	-3.8%	+3.8%	+32.9%	+25.4%	+17.8%	+5.7%	+19.4%	+13.7%	+9.0%	+33.6%
dendre	4.30	1.61	4.69	1.58	1.58	4.77	4.48	1.73	1.13	1.01	1.06	1.19	2.02	3.11	4.51	4.73	4.83	4.30	2.57
	+12.5%	+20.5%	+13.0%	+0.6%	+35.8%	+10.0%	+8.4%	+1.4%	-5.5%	-16.1%	-8.5%	+25.4%	+25.0%	+18.4%	+8.5%	+20.0%	+12.1%	+4.1%	+31.6%
dyle	4.28	1.66	4.75	1.48	1.63	4.77	4.58	1.71	1.08	0.942	0.973	1.14	2.10	3.24	4.63	4.86	4.83	4.40	2.48
	+11.0%	+15.8%	+9.1%	-4.0%	+31.7%	+8.8%	+6.7%	+3.3%	-8.5%	-24.2%	-10.6%	+20.1%	+20.4%	+9.3%	+3.0%	+16.4%	+10.1%	+5.9%	+39.2%

Figure 7-53 : Valeurs de référence de l'ET0

Annexe L : Graphe des composantes annuelles du bilan hydrologique

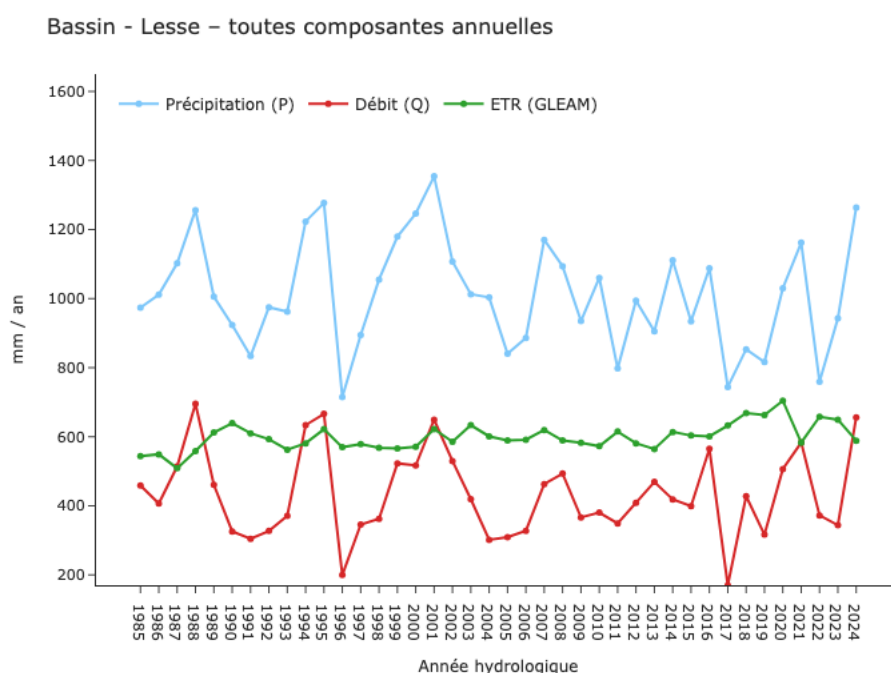


Figure 7-55 : Composantes hydrologiques annuelles (précipitation, débit, évapotranspiration réelle) pour le BV de la Lesse

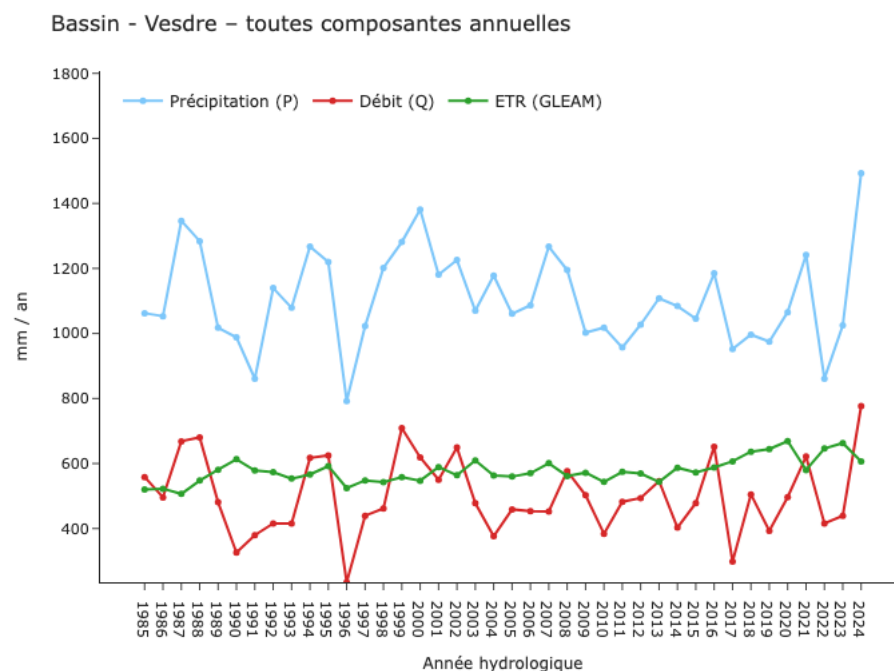


Figure 7-54 : Composantes hydrologiques annuelles (précipitation, débit, évapotranspiration réelle) pour le bassin de la Vesdre

Bassin - Semois – toutes composantes annuelles

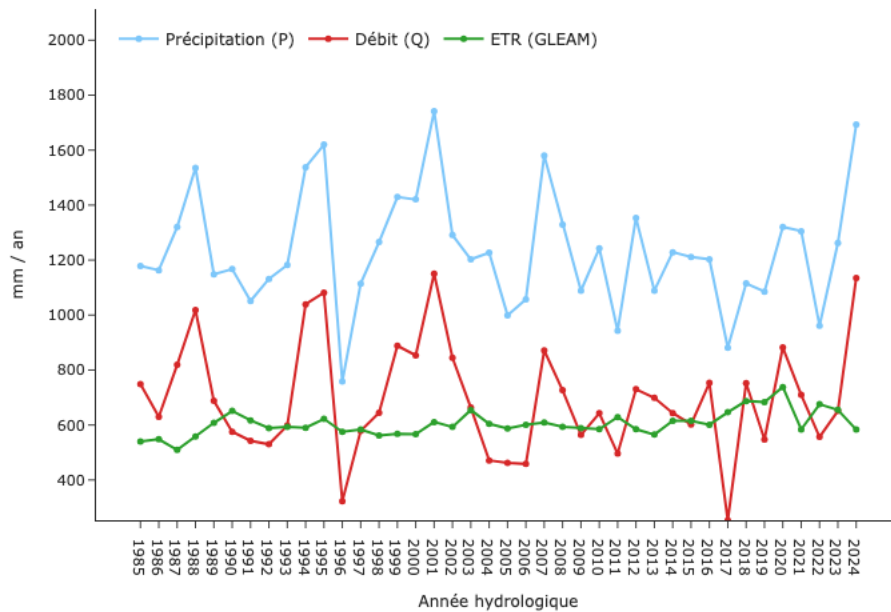


Figure 7-56 : Composantes hydrologiques annuelles (précipitation, débit, évapotranspiration réelle) pour le bassin de la Semois

Bassin - Viroin – toutes composantes annuelles

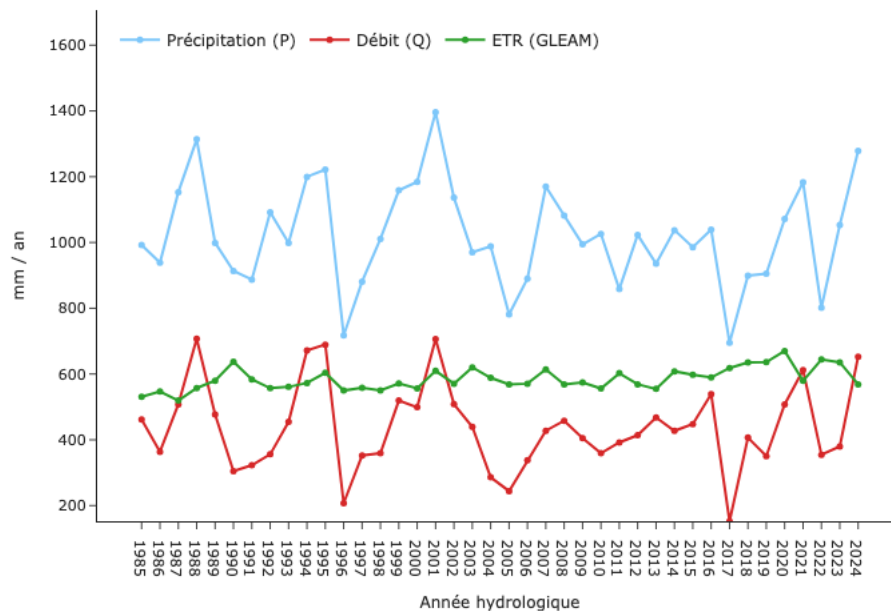


Figure 7-57 : Composantes hydrologiques annuelles (précipitation, débit, évapotranspiration réelle) pour le bassin du Viroin

Bassin - Dyle – toutes composantes annuelles

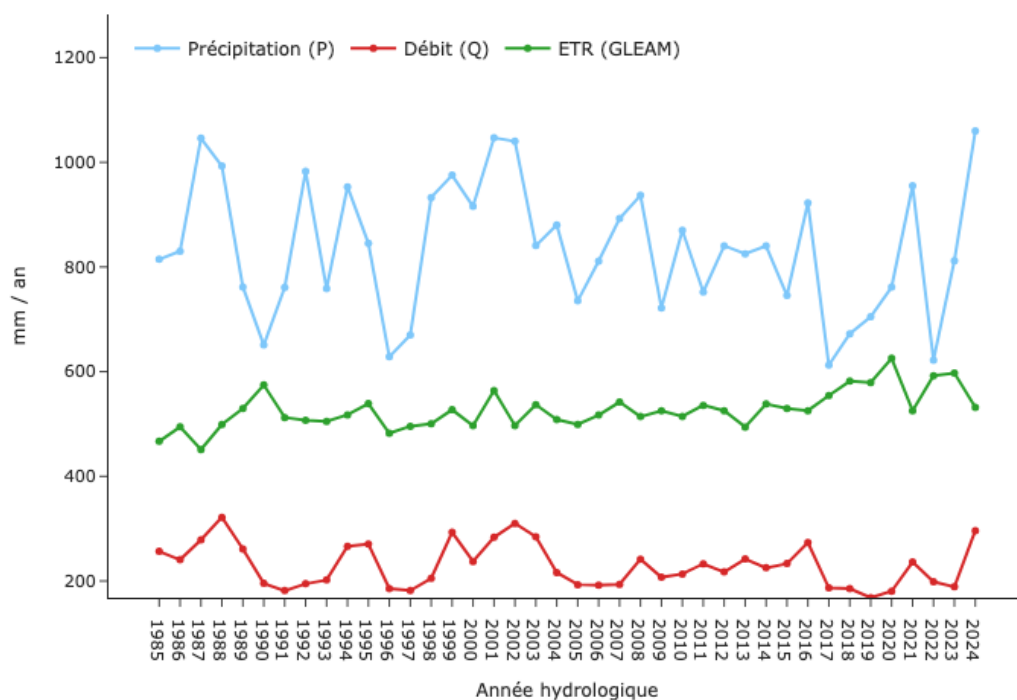


Figure 7-59 : Composantes hydrologiques annuelles (précipitation, débit, évapotranspiration réelle) pour le bassin de la Dyle

Bassin - Dendre – toutes composantes annuelles

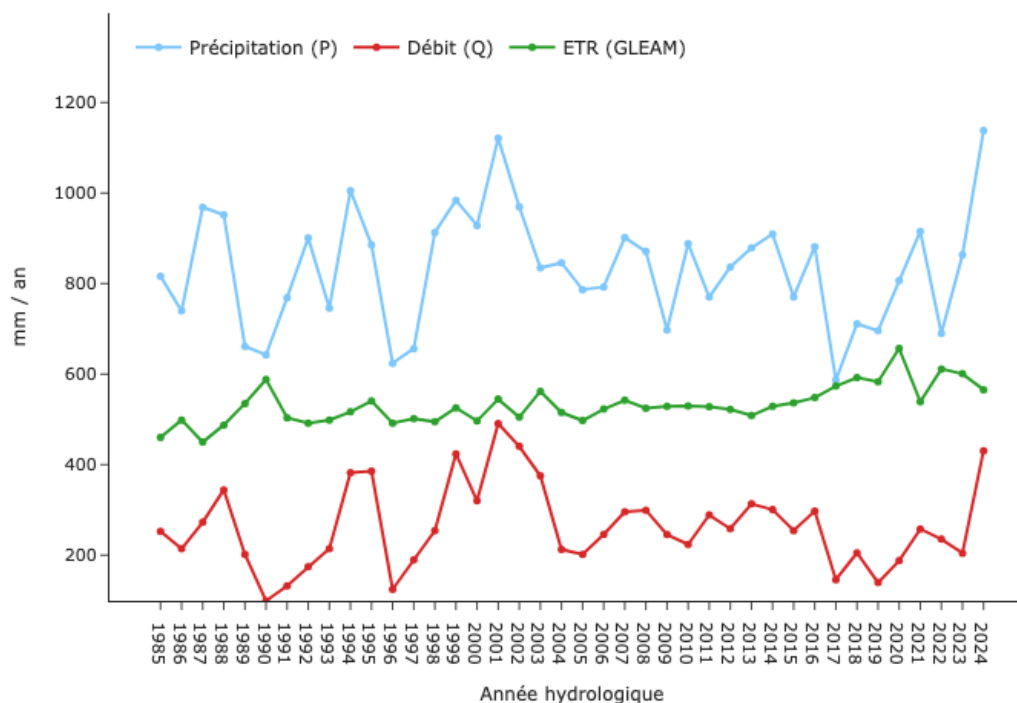


Figure 7-58 Composantes hydrologiques annuelles (précipitation, débit, évapotranspiration réelle) pour le bassin de la Dendre

Bassin - Demer – toutes composantes annuelles

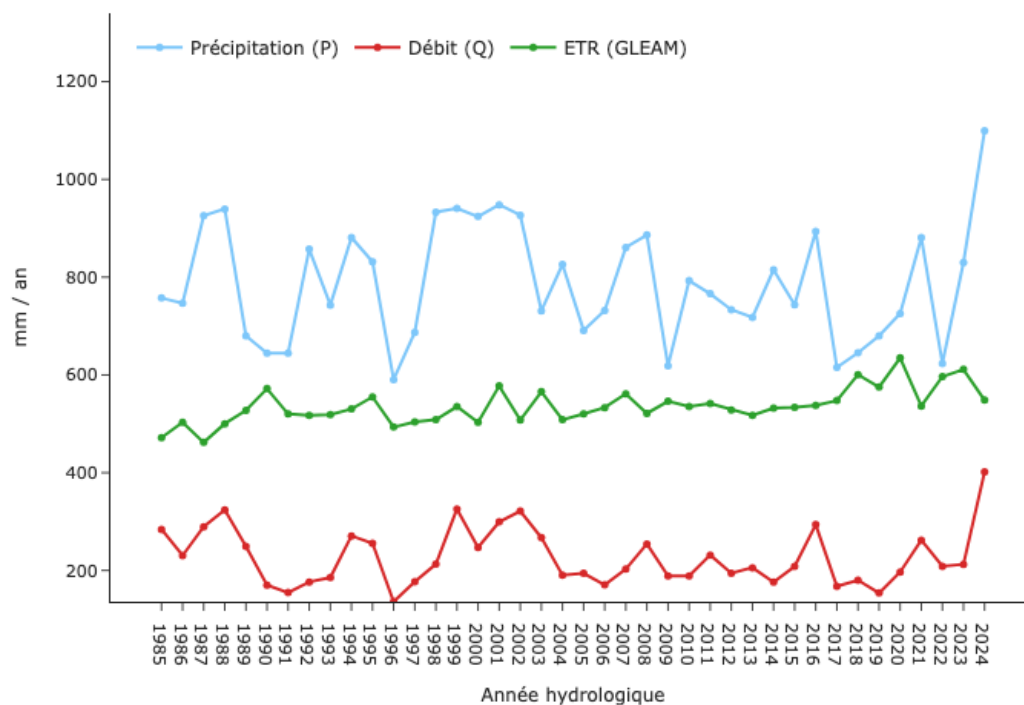


Figure 7-60 : Composantes hydrologiques annuelles (précipitation, débit, évapotranspiration réelle) pour le bassin de la Demer

Annexe M : Lien Zenodo avec les bilans et régression effectuées

Les graphes de bilans et régressions sont disponible dans un fichier zip accessible à cette adresse : <https://doi.org/10.5281/zenodo.16877859>

Analyse de l'évolution sur 40 ans (1984-2024) des variables hydrologiques de sept bassins versants belges

Le changement climatique intensifie le cycle de l'eau et accentue la vulnérabilité hydrique de la Belgique, qui présente une forte densité de population et est par conséquent fortement dépendant de ses nappes souterraines. Dans ce contexte, ce mémoire analyse l'évolution des variables hydrologiques et des stocks d'eau sur une période de quarante ans (1984-2024), couvrant plusieurs bassins représentatifs des districts de la Meuse et de l'Escaut. La méthodologie repose sur la construction de bilans hydrologiques annuels et saisonniers, complétés par des tests de tendances appliqués aux précipitations, débits, niveaux piézométriques et évapotranspiration (potentielle et réelle).

Les résultats mettent en évidence une diminution des précipitations printanières, particulièrement marquée en avril, associée à une baisse proportionnelle des débits. À l'automne, la variabilité des précipitations diminue, traduisant une répartition plus homogène des pluies et constante, ce qui se répercute sur les régimes de débits. L'évapotranspiration réelle et potentielle est en augmentation, bien que les incertitudes liées aux produits de télédétection et de réanalyse compliquent la quantification des tendances.

Sur le plan des nappes, une baisse généralisée des niveaux piézométriques est observée dans le district de l'Escaut. Globalement, les bilans soulignent une dégradation progressive de l'équilibre hydrologique et confirment le risque croissant de déficit hydrique à l'échelle régionale. Ces constats appellent à approfondir la recherche et à développer des stratégies d'adaptation face aux impacts du changement climatique sur les ressources en eau.

Arthur Waroquiers