

HydroTrend 2

Rapport final

Analyse des tendances observées dans l'amplitude et la fréquence des pics de crue en Wallonie.

Marché public de services

Cahier spécial des charges n° 03.06.04-18J002

« Analyse de l'évolution de la fréquence et de
l'amplitude des débits de crue en Région
Wallonne »

HydroTrend 2

Rapport final

Ir Maud Grandry

16/03/2020

Résumé

Le projet HydroTrend a pour but de détecter et analyser des tendances potentielles dans l'amplitude et la fréquence des pics de crue en Wallonie. Dans la première partie du projet, des tendances significatives ont été observées dans les données de 16 stations limnimétriques sur les 84 étudiées. Ces tendances étaient majoritairement positives dans le bassin de l'Escaut, mais aussi bien positives que négatives dans le bassin de la Meuse. Cette deuxième partie du projet se concentre sur la recherche des facteurs externes qui seraient à l'origine des tendances dans les débits de crue.

L'évolution de facteurs climatiques (précipitations, neige, évapotranspiration, indice de l'Oscillation Nord Atlantique) et d'occupation du sol (surfaces bâties, forestières et agricoles) a, dans un premier temps, été analysée.

De façon similaire aux débits de crue, des tendances positives et négatives ont été détectées dans les précipitations. Les précipitations neigeuses ont, par contre, diminué partout. Ceci est lié à l'augmentation globale de la température moyenne, qui engendre aussi une augmentation de l'évapotranspiration.

Les surfaces bâties sont partout à la hausse également. Les changements dans les types de cultures sont plus marqués dans les bassins versants les plus agricoles, situés principalement dans le nord de la région, où les surfaces agricoles à risque de ruissellement nul (essentiellement des prairies) sont remplacées par des surfaces agricoles à risque de ruissellement faible ou très élevé.

À l'exception des précipitations, les corrélations avec les débits de crue sont toutefois faibles. Les corrélations n'impliquent cependant pas de causalité, celle-ci ne pouvant réellement être déterminée que par l'analyse des processus physiques, et notamment la modélisation hydrologique.

La modélisation hydrologique a en effet permis de mettre en relation l'évolution des variables climatiques (en particulier les précipitations et l'évapotranspiration) et l'évolution des débits de crue pour Daverdisse, Sauheid, Mabompré, Sainte-Marie, Wanze et Saint-Rémy-Geest. Elle a aussi permis de démontrer que l'évolution des débits à Sainte-Marie et Saint-Rémy-Geest était influencée par d'autres facteurs que les facteurs climatiques, probablement liés à l'évolution de l'occupation du sol. Pour Mabompré, la piste la plus probable pour expliquer les divergences entre modélisation et observation est le manque de données de précipitations en altitude pour une partie de la période étudiée, ce qui démontre l'importance stratégique d'une métrologie hydrologique de qualité en vue de l'adaptation aux évolutions du climat.

Pour Daverdisse, les débits futurs ont également été modélisés de manière prospective à partir des données CORDEX. Sous le scénario le plus pessimiste, la crue centennale augmenterait de 20 % à l'horizon 2050. Les données d'entrée présentent toutefois des limitations qui devront être prises en compte pour une meilleure estimation des débits futurs.

Enfin, cinq zones homogènes ont pu être identifiées sur base des différentes tendances et paramètres physiques des bassins versants. Chaque zone regroupe donc des stations pour lesquelles des tendances très similaires ont été détectées, et on peut supposer que les stations non analysées dans ces zones présentent les mêmes tendances.

Table des matières

Résumé	1
Introduction	4
Recensement des paramètres pertinents	5
Les changements climatiques	5
Les précipitations	5
Les circulations atmosphériques.....	5
La température	6
L'évapotranspiration.....	6
Les changements d'occupation du sol	6
L'urbanisation	6
L'agriculture	6
La déforestation	7
Le drainage des zones humides	7
Les ouvrages de lutte contre les inondations	7
Les modifications de la rivière	7
Les barrages	7
Autres facteurs.....	7
La taille du bassin versant.....	7
Les transferts d'eau en dehors du bassin versant	8
Les prélèvements d'eau	8
Collecte des données et extraction des paramètres	8
Sélection des bassins versants	9
Données climatiques.....	10
Données d'occupation du sol.....	12
Analyses statistiques.....	13
Méthodologie.....	13
Résultats.....	14
Oscillation nord atlantique	15
Précipitations	16
Neige	19
Évapotranspiration.....	23
Indice d'humidité extrême.....	25
Surfaces bâties	26
Surfaces agricoles.....	29
Surfaces forestières	35
Analyse PLS	37

Régression mixte.....	39
Autres analyses	40
Saisonnalité	40
Hypothèse de bypass de Saint-Rémy-Geest	42
Ajout de données en utilisant les données journalières.....	43
Données horaires de précipitations.....	45
Discussion.....	46
Modélisation hydrologique.....	48
Introduction	48
Sélection des bassins versants	49
Paramètres de la modélisation	54
Résultats.....	54
Daverdisse	55
Sauheid.....	58
Mabompré	61
Sainte-Marie.....	66
Wanze	69
Saint-Rémy-Geest	75
Discussion.....	79
Prospection	86
Impacts des changements climatiques futurs à Daverdisse	86
Régionalisation des résultats	92
Conclusion et perspectives	102
Bibliographie	104
Annexes.....	107
Annexe 1 – Corrélations entre les débits maximums annuels et les indicateurs climatiques et d’occupation du sol	108
Annexe 2 – Corrélations entre le nombre de POTs par an et les indicateurs climatiques et d’occupation du sol	112
Annexe 3 – Cercles des corrélations de l’analyse PLS sur les débits maximums annuels	117
Annexe 4 – Cercles des corrélations de l’analyse PLS sur le nombre de POTs par an	122

Introduction

Le projet HydroTrend a vu le jour suite à un appel d'offre lancé par la Direction des Cours d'Eau non navigables du Service Public de Wallonie (SPW - DGO3) en juin 2017. Cet appel concernait le marché public de services intitulé « Analyse des débits maximums extrêmes et observation d'une tendance éventuelle à un retour plus fréquent de certains "hauts" débits » (référence 03.06.04-17F86). En effet, les gestionnaires des cours d'eau wallons avaient l'impression que les caractéristiques des crues, et en particulier leur fréquence, avaient changé ces dernières années, mais ceci n'avait toutefois jamais été étudié, ni vérifié statistiquement auparavant.

Ce premier projet, d'une durée d'un an, avait donc essentiellement pour but la détection des tendances dans l'amplitude et la fréquence des crues. Pour cela, les données horaires de 84 stations limnimétriques ont été analysées. Des tendances dans l'amplitude des maximums annuels, l'amplitude des POTs (peaks over threshold c'est-à-dire les valeurs excédant un certain seuil) et/ou leur fréquence ont été observées. Celles-ci sont majoritairement positives dans le bassin de l'Escaut, mais aussi bien positives que négatives dans le bassin de la Meuse (plutôt positives sur la Lesse et négatives sur l'Ourthe, l'Amblève, la Vesdre, la Semois et la Chiers). Presque 12% d'entre elles sont significatives pour l'amplitude des maximums annuels et la fréquence, et 6% sont significatives pour l'amplitude des POTs.

Durant ce projet, les facteurs qui pourraient potentiellement expliquer les tendances observées ont également été brièvement étudiés. L'urbanisation, l'installation des réseaux d'égouttage et l'évolution des précipitations (pluies et neige) pourraient en partie expliquer certaines tendances. Il semblerait aussi que la présence ou non d'une tendance soit influencée par la taille du bassin versant. L'ensemble des processus hydrologiques constitutifs des crues pourrait en fait être impacté par diverses transformations brusques ou continues, uniques ou répétées. Il avait donc été recommandé de procéder à une analyse plus complète et détaillée, tenant compte de tous les facteurs probables, afin de conclure quels sont les facteurs réellement responsables de ces tendances.

Un second appel d'offre avait dès lors été lancé par la Direction des Cours d'Eau non navigables pour le marché public de services intitulé « Analyse de l'évolution de la fréquence et de l'amplitude des débits de crue en Région Wallonne » (référence 03.06.04-18J002). Le cahier des charges comprenait 5 Working Packages (WP) :

1. Recensement des paramètres pertinents
2. Collecte des données et méthode d'extraction des paramètres
3. Extraction des paramètres
4. Analyse statistique de l'évolution de la fréquence et de l'amplitude des débits de crue
5. Prospection

Gembloux Agro-Bio Tech – Liège Université a remporté cet appel d'offre, et le projet HydroTrend 2 a débuté le 1^{er} décembre 2018 pour une durée de 15 mois. Ce projet vise donc à identifier et analyser les facteurs responsables des tendances observées mais également à évaluer les impacts potentiels de l'instationnarité des débits de crues sur la gestion des crues et des inondations en Wallonie.

Recensement des paramètres pertinents

De nombreux chercheurs, un peu partout dans le monde, ont étudié les phénomènes d'instationnarité des variables hydroclimatiques. Une revue bibliographique a donc été effectuée afin de recenser les paramètres qui pourraient potentiellement influencer les tendances observées dans l'amplitude et la fréquence des débits de crue. Ceux-ci sont regroupés en 3 classes (Hall et al., 2014; Kundzewicz, 2012; Merz et al., 2012) :

- changements climatiques : précipitations, circulations atmosphériques, température, évapotranspiration, humidité antécédente aux crues, etc. (Burn et al., 2004; Hannaford and Marsh, 2008; Mediero et al., 2014; Ruiz-Villanueva et al., 2016).
- changements d'occupation du sol : urbanisation, déforestation, drainage des zones humides, présence d'ouvrages de lutte contre les inondations, etc.
- modifications de la rivière : changement de son tracé, de sa largeur et de sa profondeur, construction de barrages, etc.

Il est à noter que la construction d'ouvrages ou d'infrastructures engendre un changement plutôt rapide et brusque dans les débits alors que les changements d'occupation du sol ou climatiques sont en général plus lents et graduels (Hall et al., 2014; Merz et al., 2012).

Ce chapitre reprend également les résultats de l'analyse préliminaire réalisée dans le cadre du projet HydroTrend 1.

Les changements climatiques

Les précipitations

Des augmentations et diminutions des précipitations ont été observées dans différentes régions du monde (Ganguli and Coulibaly, 2017; Kundzewicz, 2012). En Belgique, l'intensité des pluies diminuerait dans la région de Butgenbach mais augmenterait dans la région de Bouillon. Les analyses d'HydroTrend 1 montrent une légère augmentation des précipitations annuelles pour le bassin versant de Daverdisse sur la Lesse, mais une diminution significative pour le bassin de Theux sur la Hoëgne, sur la même période de temps que les débits de crue analysés.

En Ardenne, la majorité des débordements de rivières survient en hiver et près de la moitié d'entre eux est due à la combinaison de fortes pluies et de la fonte rapide de la neige. Le Laboratoire de Climatologie de l'ULiège a étudié l'évolution des conditions hydroclimatiques favorisant les crues hivernales dans le bassin de l'Ourthe. Celles-ci ont été reconstituées à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional pour la période 1959-2010. Ils ont observé une diminution du nombre de jours favorables aux crues et plus particulièrement une diminution significative de l'accumulation neigeuse et de la durée de la saison d'enneigement (Wyrd et al., 2017). Ces tendances négatives dans les précipitations neigeuses ont aussi été observées dans les Alpes, à haute altitude mais aussi plus fortement à basse altitude (Bezák et al., 2016).

Les circulations atmosphériques

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'effet du changement climatique sur les débits de crue (Burn et al., 2004; Hannaford and Marsh, 2008; Kundzewicz, 2012). Les circulations atmosphériques, notamment, semblent changer. L'indice de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA), qui est la différence de pression atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande, est beaucoup utilisé pour caractériser la météo de l'Europe de l'Ouest, et en particulier les précipitations hivernales (Hannaford and Marsh, 2008; Ruiz-Villanueva et al., 2016; Wyrd et al., 2017). En Belgique, un indice ONA négatif correspond en général aux hivers froids avec chutes de neige, tandis qu'un indice positif correspond plutôt aux hivers doux et pluvieux. Wyrd et al. (2017) observent une augmentation de

cet indice entre 1959 et 2010, ce qui se traduit par une augmentation de la fréquence des conditions anticycloniques en hiver et qui expliquerait partiellement la diminution des précipitations hivernales en Ardenne. Il faut toutefois être prudent dans l'utilisation de cet indice étant donné les variations cycliques de 20-25 ans qu'il présente (Willems, 2013).

La température

La température est parfois utilisée pour étudier l'impact des changements climatiques, vu qu'elle influence la capacité de l'air à contenir de l'eau et a donc un effet sur les précipitations ; selon la littérature, les précipitations extrêmes augmenteraient de 7-8% par °C de réchauffement (Ganguli and Coulibaly, 2017; Kundzewicz, 2012; Ruiz-Villanueva et al., 2016). La température influence également la fonte des neiges. En Wallonie, une hausse de la température moyenne de plus de 1°C par rapport à la normale calculée sur la période 1961-1990 a été observée (SPW - DGO3 - DEMNA - DEE, 2017).

L'évapotranspiration

L'évapotranspiration peut aussi aider à expliquer les tendances dans les débits de crue. Une augmentation de l'évapotranspiration, induite notamment par l'augmentation de la température, engendre en effet une augmentation des pertes d'eau des sols et donc une diminution de l'humidité du sol (Mediero et al., 2014). La diminution de l'humidité de sol avant les crues expliquerait en partie pourquoi, même si l'on prédit une augmentation des débits extrêmes due à l'augmentation des précipitations dans un contexte de changements climatiques, celle-ci n'est pas toujours observée (Lettenmaier, 2018).

Les changements d'occupation du sol

Les changements d'occupation et de pratiques de gestion des sols ont un impact sur les processus de génération des crues en influençant l'évapotranspiration, l'infiltration de l'eau dans le sol, et les stockages d'eau de surface et souterraine (Hall et al., 2014).

L'urbanisation

L'urbanisation est un phénomène connu pour augmenter le débit des rivières du fait de la conversion de surfaces perméables (prairies principalement) en surfaces imperméables favorisant ainsi le ruissellement direct de l'eau de pluie au détriment de l'infiltration (Kundzewicz, 2012). L'augmentation de la surface bâtie peut être observée en Wallonie, notamment dans le Brabant Wallon, en comparant les orthophotoplans de 1971 et 2017. Le rapport sur l'état de l'environnement wallon (REEW) 2017 chiffre l'augmentation des terrains artificialisés entre 1985 et 2015 à près de 40%, avec un taux d'augmentation maximal au cours des années 1990 (19,7 km²/an en moyenne entre 1990 et 2000) (SPW - DGO3 - DEMNA - DEE, 2017).

L'agriculture

L'affectation des surfaces agricoles wallonnes a également connu des changements ces dernières années. On constate notamment, entre 1980 et 2015, une diminution des prairies permanentes, des cultures de betteraves et de céréales de printemps, et une augmentation des cultures de pommes de terre, de maïs et des prairies temporaires (SPW - DGO3 - DEMNA - DEE, 2017). Les rotations biennales remplacent les rotations tri- ou quadriennales, avec une plus longue période pendant laquelle les sols sont nus; l'obligation de couvrir totalement les terres ne datant que de 2007. Une perte de matière organique a également été observée pour les sols sous cultures (SPW - DGO3 - DEMNA - DEE, 2017), ce qui favorise l'érosion et influence la circulation de l'eau dans le sol. On peut donc s'attendre à une augmentation des débits due à un ruissellement plus important.

Sur les orthophotoplans, on constate aussi une augmentation de la taille des parcelles, ce qui engendre potentiellement aussi une augmentation du ruissellement.

La déforestation

La déforestation est souvent mentionnée dans la littérature comme facteur influençant l'évolution des débits de crue. En Belgique, c'est plutôt une afforestation des landes et terrains dits incultes qui a eu lieu à partir du 19^{ème} siècle (SPW - DGO3 - DEMNA - DEE, 2017), ce qui pourrait avoir contribué à la diminution des débits dans certains bassins versants (Hall et al., 2014). À l'heure actuelle, il semblerait que la balance penche plutôt du côté de la déforestation ; selon des spécialistes en gestion forestière, des milliers d'hectares de forêts sont coupés chaque année et leur régénération est plus lente (communication personnelle).

Le drainage des zones humides

Le drainage des zones humides est aussi mentionné puisque cette pratique affecte les chemins d'écoulement de l'eau (Hall et al., 2014). Bien que ce ne soit pas un facteur important en Wallonie, certains terrains ont été drainés dans un but d'amélioration foncière probablement jusque dans les années 1990.

Les ouvrages de lutte contre les inondations

La présence d'ouvrages de lutte contre les inondations, en particulier les zones d'immersion temporaire et les bassins d'orage, modifient aussi la dynamique de l'écoulement des bassins versants.

Les modifications de la rivière

L'homme a parfois modifié les rivières en leur donnant un tracé plus rectiligne, les élargissant, augmentant leur profondeur, etc. Ces modifications ont une influence non négligeable sur la propagation des crues (Hall et al., 2014).

Les barrages

Il est bien connu que les barrages ont une influence sur le débit des rivières. La plupart des barrages en Wallonie ont été construits avant le début des mesures des débits, sauf ceux de l'Eau d'Heure, du Ry de Rome et de Coe qui datent des années 1970-1980. Si une diminution des précipitations hivernales dans certaines régions est confirmée, ceci pourrait avoir des répercussions sur la quantité d'eau stockée dans les réservoirs et de ce fait sur la quantité d'eau relâchée dans les rivières.

Autres facteurs

La taille du bassin versant

Il semblerait qu'un lien existe entre la présence ou non d'une tendance et la taille du bassin versant car très peu de tendances ont été détectées en Wallonie pour les petits bassins versants (< 95 km² ; voir figure ci-dessous). Une analyse plus approfondie est nécessaire pour comprendre les phénomènes physiques sous-jacents qui expliqueraient cette relation. Toutefois, on sait déjà que l'échelle à laquelle ces phénomènes se produisent varie : les changements d'occupation du sol, par exemple, affectent généralement des parties de bassins versants et leur effet va donc diminuer avec la taille du bassin versant, au contraire des changements climatiques qui ont des répercussions sur de plus grandes superficies (Hall et al., 2014). Le temps de réponse des cours d'eau aux précipitations dépend également de la taille du bassin versant : les petits bassins versants sont très sensibles aux

pluies intenses car elles affectent la globalité de leur surface alors que les grands bassins sont généralement touchés de façon partielle et leur réponse est davantage liée à une lente accumulation des pluies sur plusieurs jours.

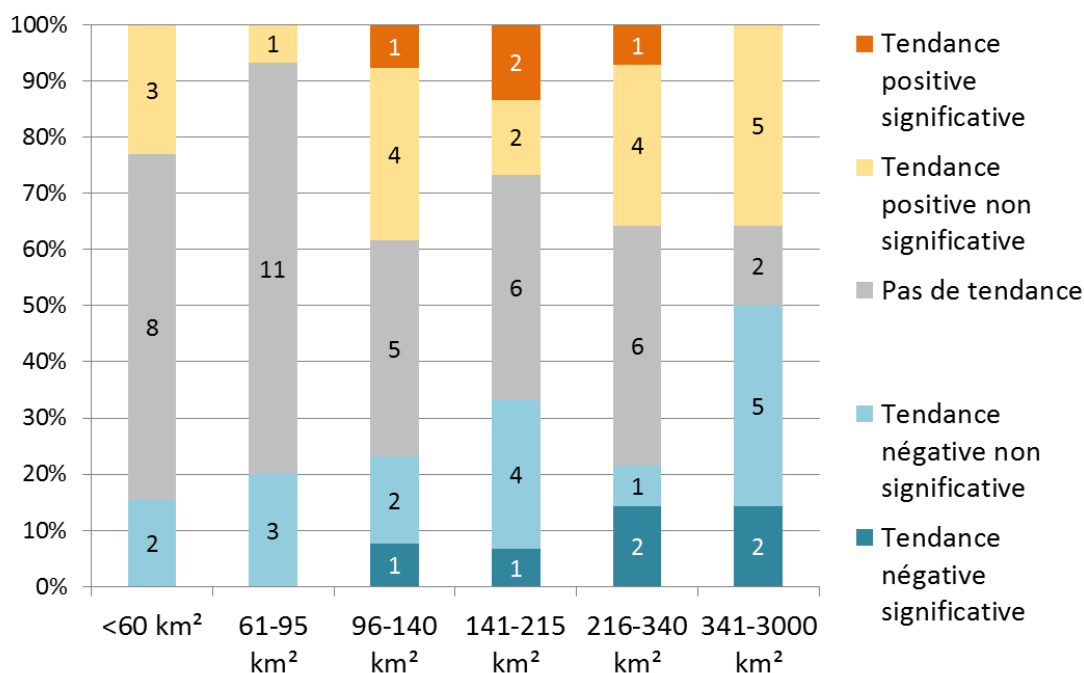


Figure 1. Graphique des proportions des différents types de tendance pour l'amplitude des maximums annuels en fonction de la classe de superficie du bassin versant.

Les transferts d'eau en dehors du bassin versant

L'installation du réseau d'assainissement a modifié le réseau de transfert et de drainage de certains bassins versants. Les eaux de pluie et les eaux usées, qui autrefois été déversées directement dans les cours d'eau, peuvent maintenant être collectées et acheminées vers les stations d'épuration qui se situent parfois en aval des stations de mesure, comme c'est le cas pour la station d'épuration de Jodoigne située juste en aval de la station de mesure de Saint-Rémy-Geest. Ceci pourrait en partie expliquer la diminution des débits de crue observée à cette station.

À une plus grande échelle, l'eau captée dans certains aquifères est parfois rejetée, après avoir été consommée et traitée, dans un autre bassin hydrogéologique.

Les prélèvements d'eau

L'eau peut être prélevée des nappes souterraines (parfois en continuité avec les rivières) ou directement des cours d'eau par les industries ou pour la potabilisation. Ces prélèvements modifient donc la quantité d'eau présente à tout moment dans les rivières.

Collecte des données et extraction des paramètres

Parmi les facteurs cités ci-dessus, nous nous sommes tout d'abord intéressé à ceux qui ont une plus grande influence sur les débits de crue et qui pouvaient être analysés pour tous les bassins versants : les facteurs climatiques et d'occupation du sol. Les autres influences seront prises en compte par la suite au cas par cas.

Sélection des bassins versants

Les bassins versants sélectionnés pour cette étude sont ceux d'HydroTrend 1 pour lesquels une tendance significative dans au moins un des 3 indicateurs (amplitude des MA, amplitude des POTs et/ou fréquence) avait été détectée, auxquels nous avons ajouté, pour une meilleure répartition spatiale, 10 bassins versants pour lesquels la tendance n'était pas significative. La Figure 2 ci-dessous montre la localisation de ces bassins versants avec leur tendance respective, et le Tableau 1 donne plus de précisions sur les tendances pour chaque indicateur. Pour rappel, les bassins sélectionnés pour HydroTrend 1 sont ceux des stations de mesure Aqualim et Wacondah situées sur les cours d'eau non navigables, actuellement opérationnelles et présentant au moins 30 ans de données. L'année hydrologique de début des données est également reprise dans le Tableau 1 pour chaque station.

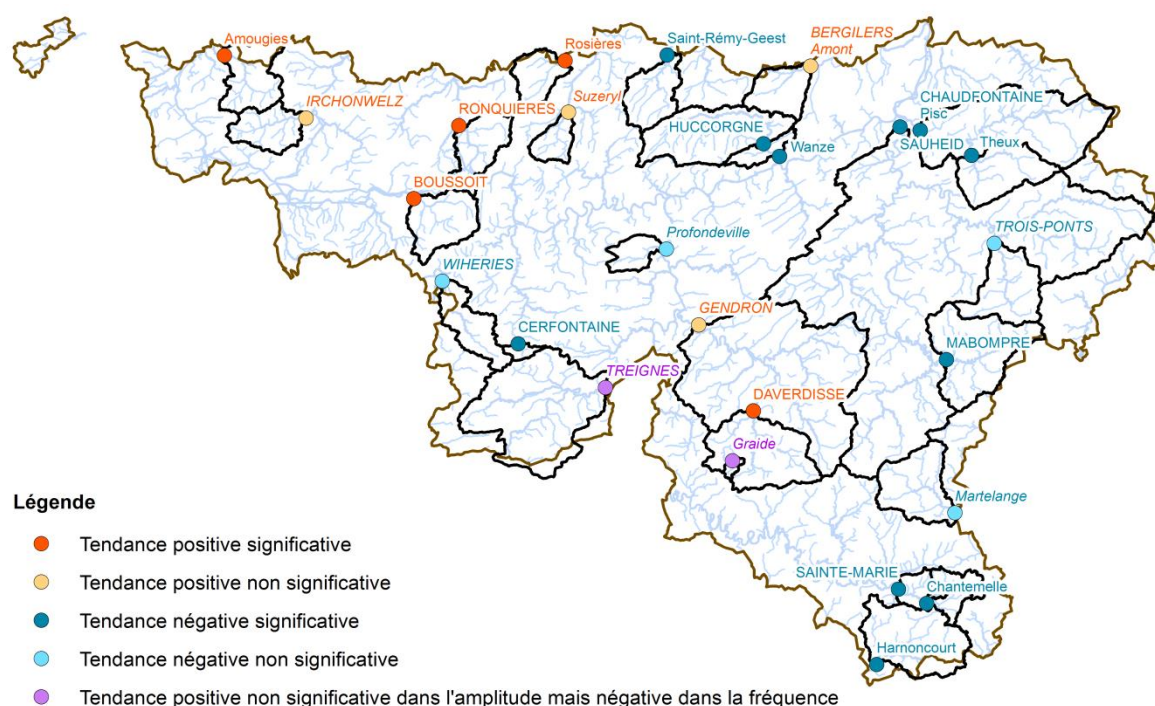


Figure 2. Carte des bassins versants de l'étude et de leur tendance dans les débits de crue. Les noms des stations de mesure sont colorés selon leur tendance et en italique lorsque la tendance n'est pas significative ; la distinction minuscules-majuscules provient des différents réseaux de mesure (Aqualim-Wacondah respectivement).

Tableau 1. Liste des stations limnimétriques sélectionnées avec l'année hydrologique de début des données pour chacune et leurs tendances pour chaque indicateur.

Rivière	Nom de la station	Année hydrologique de début des données	Tendance dans l'amplitude des maximums annuels	Tendance dans l'amplitude des POTs	Tendance dans la fréquence des crues (nb de POTs par an)
Rhosnes	Amougies	1973	Positive significative	Positive significative	Positive significative
DENDRE OCCIDENTALE	IRCHONWELZ	1979	Positive non significative	Positive non significative	Positive non significative
HAINE	BOUSSOIT	1975	Positive significative	Positive significative	Positive non significative
SAMME	RONQUIERES	1974	Positive non significative	Positive non significative	Positive significative
Lasne	Rosières	1974	Positive significative	Pas de tendance	Positive significative

Thyle	Suzeryl	1974	Positive non significative	Positive non significative	Positive non significative
Grande Gette	Saint-Rémy-Geest	1979	Négative significative	Négative non significative	Négative significative
HANTES	WIHERIES	1980	Négative non significative	Pas de tendance	Pas de tendance
EAU D'HEURE	CERFONTAINE	1981	Pas de tendance	Pas de tendance	Négative significative
VIROIN	TREIGNES	1975	Positive non significative	Positive non significative	Négative non significative
MEHAIGNE	HUCCORGNE	1975	Pas de tendance	Pas de tendance	Négative significative
Mehaigne	Wanze	1980	Négative significative	Pas de tendance	Négative significative
GEER	BERGILERS Amont	1986	Pas de tendance	Pas de tendance	Positive non significative
OURTHE	SAUHEID	1979	Négative significative	Négative non significative	Négative non significative
VESDRE	CHAUDFONTAINE Pisc	1968	Négative non significative	Négative significative	Positive non significative
Hoëgne	Theux	1980	Négative significative	Négative significative	Négative significative
SALM	TROIS-PONTS	1988	Négative non significative	Négative non significative	Pas de tendance
OURTHE ORIENTALE	MABOMPRES	1979	Négative significative	Négative significative	Pas de tendance
Sûre	Martelange	1976	Négative non significative	Négative non significative	Pas de tendance
SEMOIS	SAINTE-MARIE	1977	Négative non significative	Pas de tendance	Négative significative
Semois	Chantemelle	1980	Pas de tendance	Pas de tendance	Négative significative
Ton	Harnoncourt	1975	Négative significative	Négative non significative	Pas de tendance
LESSE	GENDRON	1969	Positive non significative	Positive non significative	Pas de tendance
LESSE	DAVERDISSE	1969	Positive significative	Positive non significative	Positive non significative
Ruisseau de Graide	Graide	1975	Positive non significative	Positive non significative	Négative non significative
Burnot	Profondeville	1983	Négative non significative	Pas de tendance	Négative non significative

Données climatiques

Les données de précipitations (pluie et neige), température et évapotranspiration ont été calculées au pas de temps journalier depuis le 1^{er} janvier 1961 pour chaque bassin versant via le modèle EPICgrid (Sohier et al., 2009). Les données météorologiques de départ étaient disponibles par maille de 5km x 5km (obtenues par interpolation spatiale ou krigeage au départ des données ponctuelles) et le modèle EPICgrid travaille sur des mailles de 1km x 1km.

À partir de ces données journalières, des indicateurs par année hydrologique ont été calculés afin de permettre leur comparaison directe avec les débits maximums annuels et le nombre de POTs par an.

Pour les précipitations, nous avons calculé le maximum annuel des précipitations journalières ainsi que les maximums annuels des précipitations cumulées sur 2 et 3 jours étant donné que les crues dans les grands bassins versants sont davantage liées à une lente accumulation des pluies sur plusieurs jours. Le temps de réaction aux pluies des bassins concernés ne dépasse toutefois pas 72h. Cette accumulation des précipitations permet aussi de prendre en compte, en quelque sorte, l'humidité du sol antécédente aux crues.

En ce qui concerne la neige, c'est en général l'épaisseur maximale annuelle qui est étudiée (Ruiz-Villanueva et al., 2016 par exemple). Les données d'épaisseur de neige ne sont toutefois pas disponibles pour tous les bassins versants étant donné que peu de stations de mesure existent en Wallonie. Nous avons donc utilisé les données dérivées des données de précipitations lorsque la température maximale journalière est inférieure à 0°C et avons extrait le total annuel. Ces données sont donc exprimées en mm de précipitations et non en cm de neige, mais il faut savoir que 1 mm de précipitations neigeuses correspond environ à 3 cm de neige fraîche, non tassée. La quantité journalière de neige fondue, quand la température maximale journalière dépasse 0°C, a également été estimée par le modèle EPICgrid. A partir de ces quantités journalières, nous avons calculé le maximum annuel ainsi que les maximums annuels des quantités cumulées sur 2 et 3 jours. La quantité de neige totale restante au sol après la fonte a aussi été estimée (toujours en mm) et le maximum annuel a été calculé. Il ne faudra pas oublier que ces données de précipitations neigeuses sont des estimations et comportent des imprécisions. La première est liée au fait que la station de mesure des températures n'est pas toujours située au même endroit et à la même altitude que la station mesurant les précipitations. La seconde vient du fait que les quantités de neige par bassin versant sont en fait la moyenne des mailles le constituant ; sur de grands bassins versants, il peut arriver que certaines parties du bassin soient encore enneigées alors que l'épaisseur de neige au sol estimée pour le bassin versant est à 0.

L'évapotranspiration a été calculée suivant l'équation de Penman-Montheit et nous avons utilisé le total annuel.

Les données de température maximales et minimales journalières étaient également disponibles et les températures moyennes ont été calculées. Celles-ci seront utilisées en complément d'information aux données précédentes étant donné qu'elles n'ont pas de lien direct avec les débits.

L'indice d'humidité extrême, défini comme le cumul annuel des différences entre les précipitations et l'évapotranspiration journalières par Przybylak et al. (2007, cité dans Ruiz-Villanueva et al., 2016), a également été calculé. Le nombre de jours très secs et de jours secs, définis respectivement comme le nombre de jours où l'indice d'humidité extrême est inférieur aux percentiles 1 et 10 calculés sur l'ensemble des indices annuels, a également été calculé par année, de même que le nombre de jours humides et de jours très humides lorsque l'indice d'humidité extrême est supérieur aux percentiles 90 et 99. Les nombres de jours humides et très humides peuvent être mis en lien avec le nombre de POTs par an, tandis que les nombres de jours secs et très secs sont plutôt informatifs et nous renseignent sur les années plus sèches.

Enfin, étant donné que l'influence de l'indice de l'oscillation nord atlantique sur le climat de l'Europe de l'ouest est plus évidente en hiver (Hannaford and Marsh, 2008), nous avons utilisé l'indice hivernal (décembre-mars). Les données ont été téléchargées sur le [site internet](#) du Climate Data Guide de l'US National Center for Atmospheric Research.

Données d'occupation du sol

Les données du bâti proviennent du Département d'Architecture, Géologie, Environnement et Construction de l'Université de Liège (groupe de recherche LEMA - Local Environment Management & Analysis). Des chercheurs ont développé des couches cartographiques raster (100m x 100m) des surfaces bâties pour les années 1990, 2000 et 2010 à partir des données du cadastre. Le shapefile du cadastre, contenant entre autres la date de construction des bâtiments, a d'abord été « rasterisé » en cellules de 2m x 2m puis celles-ci ont été agrégées en cellules de 100m x 100m (Mustafa et al., 2018). Une cellule est définie comme « bâtie » lorsqu'elle contient au moins 25 cellules de 2m x 2m bâties ; ceci équivaut à 100m² qui est la taille moyenne d'un bâtiment résidentiel en Belgique (Tannier et Thomas, 2003, cité dans Mustafa et al., 2018). La densité du bâti a ensuite été divisée en 3 classes : la classe 1 correspond à une densité faible (c'est-à-dire 1 à 4% bâti), la classe 2 à une densité moyenne (4-20% bâti) et la classe 3 à une densité élevée (plus de 20% bâti).

L'outil « histogramme zonal » d'ArcGIS a permis d'extraire les proportions de chaque classe de densité par bassin versant.

Pour les données agricoles, nous avons utilisé les couches cartographiques du parcellaire agricole anonyme disponible chaque année depuis 1998. Voici la description donnée par le [Geoportail de Wallonie](#), y compris ses limitations : « Le parcellaire agricole anonyme reprend l'utilisation du sol dans les zones agricoles et forestières gérées dans le cadre de la mise œuvre de la Politique Agricole Commune par l'Organisme Payeur de Wallonie. Le parcellaire agricole anonyme localise, sous la forme de polygones, l'emprise des parcelles agricoles exploitées ainsi que la culture principale qui y est effectuée, ce qui n'exclut pas un usage éventuel en interculture. Le parcellaire agricole anonyme est fourni à titre indicatif, et sans garantie aucune, tant au niveau des limites que des informations attributaires. Les limites des parcelles sont basées sur une interprétation des règles d'éligibilités que doit suivre l'Organisme Payeur de Wallonie (OPW) ; elles ne reflètent pas les limites de propriétés. » . Concernant le traitement de ces données, nous avons d'abord effectué un « intersect » sur ArcGIS entre la couche du parcellaire et la couche des limites des bassins versants, recalculé l'aire des nouveaux polygones et exporté la table d'attribut sur Excel. La proportion de chaque type de culture par bassin versant a été calculée à l'aide de tableaux croisés dynamiques. Ces types de culture ont ensuite été regroupés en 5 catégories selon leur risque de ruissellement, évalué par l'équipe GISER (Gestion Intégrée Sol-Erosion-Ruissellement) du SPW :

- Risque très élevé : cultures sarclées, certaines cultures maraîchères et quelques autres cultures
- Risque élevé : certaines cultures maraîchères et quelques autres cultures
- Risque moyen : cultures non sarclées de printemps et certaines cultures maraîchères
- Risque faible : cultures non sarclées d'hiver
- Pas à risque : prairies, jachères, arbres fruitiers, boisements

Les couches cartographiques des surfaces forestières proviennent de l'Axe de Gestion des ressources forestières et des milieux naturels de Gembloux Agro-Bio Tech. Ces « masques ligneux » ont été développés sur base des orthophotoplans de 2006-2007, 2009-2010, 2012-2013 et 2016, et des modèles numériques de hauteur photogrammétriques correspondants, à une résolution spatiale de 2m. Ces couches étant sous la forme « raster », la proportion de surface forestière par bassin versant a été calculée à l'aide de l'outil « histogramme zonal ». La principale limitation de ces données réside dans la qualité des orthophotoplans ; des biais existent dus à l'ombre notamment. Étant donné que les photos des différentes années n'ont pas été prises à la même heure, des petites différences de surface liées à ces biais peuvent apparaître lorsque l'on compare les couches des différentes années. De plus, la couche de 2006 n'a malheureusement pas pu être utilisée dans cette étude car certaines images composant les orthophotoplans ont été prises en automne, ce qui mène à une sous-estimation de la surface forestière et à une impossibilité de comparer cette année aux 3 autres.

Méthodologie

La première étape est d'analyser l'évolution de ces variables climatiques et d'occupation du sol au fil du temps. Comme pour la détection de tendances dans les débits maximums annuels, nous avons utilisé les tests statistiques de régression linéaire, Mann-Kendall et Pettitt.

Pour rappel, la régression linéaire est sensible aux données aberrantes (« outliers ») et donne de meilleurs résultats lorsque les résidus ont une distribution normale (Svensson et al., 2005). Nous n'avons donc pas pris en compte les résultats du test de régression linéaire lorsque les résidus n'étaient pas normaux. De plus, le test de la régression linéaire nécessite des variables aléatoires c'est-à-dire pour lesquelles les observations sont indépendantes les unes des autres. Pour les variables climatiques, étant donné qu'on a extrait des indicateurs annuels, on peut considérer que leurs valeurs sont indépendantes d'une année à l'autre, comme nous l'avons fait pour les débits maximums annuels. Cependant, pour les variables d'occupation du sol, les valeurs d'une année dépendent généralement des valeurs de l'année précédente. Le test de régression linéaire ne convient donc pas pour ces données.

Le test de Mann-Kendall ne nécessite pas d'hypothèse quant à la normalité de la distribution mais est toutefois également sensible à l'autocorrélation des données. Nous avons donc testé l'autocorrélation des données et utilisé le test de Mann-Kendall modifié lorsqu'elle était présente (Hamed and Ramachandra Rao, 1998). Le test de Pettitt permet, quant à lui, de détecter des changements brusques dans la série de données. Étant donné qu'il est sensible à la présence de tendances dans les données (Rybski and Neumann, 2011), nous avons également fait le test sur les résidus de la régression linéaire (c'est-à-dire les données desquelles on a en quelque sorte enlevé la tendance linéaire) et comparé ce résultat à celui du test sur les données initiales. Une tendance a été considérée comme significative si au moins un des trois tests était significatif. Nous avons utilisé les packages R « trend » (Pohlert, 2018) et « fume » (Santander Meteorology Group, 2012). Pour analyser l'évolution du nombre jours secs, très secs, humides et très humides, nous avons utilisé la même méthode que pour le nombre de POTs par an : régression de Poisson sur le nombre de jours en fonction de l'année puis test χ^2 sur la pente de la régression pour tester la significativité de la tendance ; cette méthode est en effet la plus appropriée aux données de comptage (Mangini et al., 2018).

Pour les données climatiques, la présence de tendances a été testée sur le jeu de données dont l'historique correspond à celui des données de débit, ainsi que sur le jeu de données complet (années hydrologiques de 1962 à 2017). Le jeu de données complet comprend donc entre 6 et 26 ans de données supplémentaires.

Pour les proportions de surface bâties et forestières, les données entre les 3 années pour lesquelles on dispose des données ont été estimées suivant une simple interpolation linéaire.

La deuxième partie des analyses consiste à évaluer les relations entre l'évolution des débits et l'évolution des variables climatiques et d'occupation du sol. Pour cela, nous avons tout d'abord fait 4 tests de corrélations (Pearson, Spearman, Kendall et « distance correlation ») entre les variables et les débits maximums annuels d'une part, et le nombre de POTs par an d'autre part. Ces tests se différencient par la nature de la relation qui est testée : linéaire pour Pearson, monotone pour Spearman, ordinale pour Kendall, et quelconque pour la « distance correlation ». Nous avons conclu qu'une relation existe si au moins 2 de ces tests sont significatifs. Le test de Pearson n'est toutefois pas pris en compte lorsque les données ne sont pas normales, vu que c'est l'une des conditions d'application de ce test. Ces tests ont été réalisés sur R à l'aide des fonctions de base et du package « energy » pour la « distance correlation » (Rizzo and Szekely, 2019).

Le niveau de significativité a été défini à 5% pour tous les tests statistiques : on rejette l'hypothèse nulle lorsque la p-valeur du test est inférieure à 0,05.

Ces analyses ont été effectuées pour chaque variable individuellement. Nous avons ensuite procédé à des analyses statistiques plus globales afin de prendre en compte les interactions entre les variables et tenter de dégager les facteurs les plus influençant.

La première analyse de ce type est l'analyse PLS (Partial Least Squares). Cette analyse est similaire à l'analyse en composantes principales (ACP) car des composantes sont créées à partir de régressions (par les moindres carrés partiels) des différentes variables explicatives. Cependant, ces composantes sont créées de telle sorte qu'elles expliquent au mieux la variable à expliquer (débits maximums annuels ou nombre de POTs par an dans cette étude), c'est-à-dire en utilisant la matrice de covariance entre les facteurs et la variable à expliquer, au contraire de l'ACP qui utilise la matrice de covariance des variables explicatives entre elles. Cette analyse a été effectuée pour chaque bassin versant, en ne tenant compte que des variables climatiques dans un premier temps. En effet, les données d'occupation du sol ont un historique beaucoup plus court, ce qui limiterait l'analyse à cette courte période. On a ensuite procédé à des analyses PLS séparées incluant les données d'occupation du sol, et on les a comparées à l'analyse principale faite avec les données climatiques. Cette analyse permet de mettre en évidence les variables qui expliquent le plus la variance de l'amplitude des débits de crue d'une part et de leur fréquence d'autre part, mais aussi d'évaluer les relations des variables explicatives entre elles.

Le deuxième type d'analyse est la régression mixte. Le modèle de régression mixte se présente comme suit : $MA/Nb\ POTs\ par\ an \sim (X1, X2, \dots) + (1 | \text{bassin versant})$. La première partie est la partie fixe décrite par les variables explicatives ($X1, X2, \dots$: variables climatiques et d'occupation du sol ici). La deuxième partie est la partie aléatoire qui décrit la partie de la variabilité des débits due au bassin versant (localisation, taille du bassin versant, etc). Cette analyse est donc encore plus globale que la première étant donné qu'elle inclut les données de toutes les variables pour tous les bassins versants. Elle nous permet de mieux comprendre quelles sont les variables qui influencent le plus les débits de crue d'une manière générale pour tous les bassins. Pour les mêmes raisons que pour l'analyse PLS, seules les variables climatiques ont été prises en compte.

Ces deux analyses ont été réalisées sur R en utilisant, respectivement, les packages « plsdepot » (Sanchez, 2012) et « lme4 » (Bates et al., 2015).

Résultats

Tous les résultats de tendance et corrélation sur les cartes ci-dessous sont représentés par les différents types de flèches tandis que les noms des stations sont restés colorés selon la tendance dans les débits de crue (orange pour tendance positive, bleu pour tendance négative, italique si la tendance est non significative). Une tendance est symbolisée sur la carte si la tendance est significative pour au moins un des indicateurs de la variable concernée, et la corrélation n'est symbolisée que lorsque celle-ci est significative et lie un des indicateurs des débits de crue à un indicateur de la variable montrant une tendance significative.

De même, dans les tableaux, le nom des bassins versants est coloré selon leur tendance dans les débits de crue : orange pour une tendance positive, bleu pour une tendance négative, mauve si la tendance est positive pour les maximums annuels et négative pour le nombre de POTs par an, et couleur claire si la tendance est non significative.

Les tableaux complets des corrélations sont repris en Annexes 1 et 2. Les résultats détaillés de différents tests statistiques (conditions d'application, p-valeurs, etc) sont disponibles sous format électronique.

Oscillation nord atlantique

Aucune tendance significative dans l'indice de l'ONA hivernal n'a été détectée « à court terme » (lorsqu'on fait l'analyse sur le même historique que les stations) mais une tendance positive significative est observée « à plus long terme » (lorsqu'on utilise les données depuis 1962), comme le montre le graphique ci-dessous. Cette augmentation est décrite par de nombreux auteurs dans la littérature, dont notamment Wyard et al. (2017) pour la période 1959-2010. Selon eux, cette augmentation de la fréquence des conditions anticycloniques en hiver expliquerait en partie la diminution des précipitations hivernales en Ardenne sur la même période.

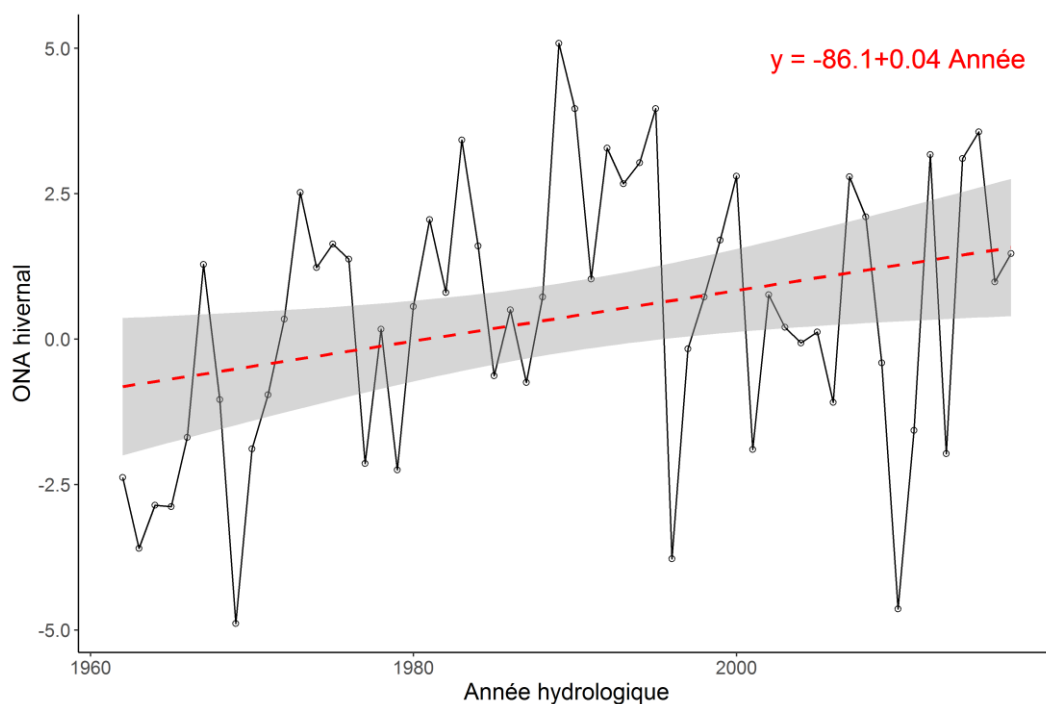


Figure 3. Graphique montrant l'évolution de l'indice hivernal de l'oscillation nord atlantique depuis 1962 ainsi que la droite de régression linéaire et son équation.

Les données de l'indice étant disponibles depuis 1864, nous avons également fait les tests de tendance sur l'historique complet. Une tendance positive est observée, comme le montre le graphique ci-dessous, mais celle-ci n'est pas significative.

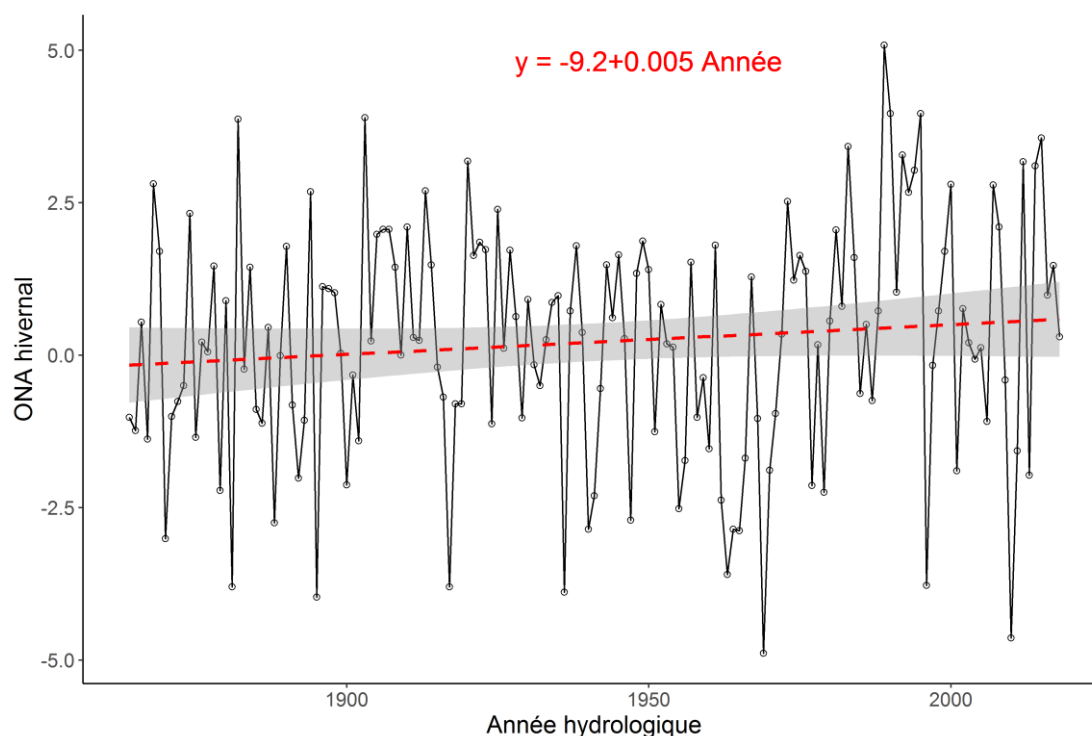


Figure 4. Graphique montrant l'évolution de l'indice hivernal de l'oscillation nord atlantique depuis 1864 ainsi que la droite de régression linéaire et son équation.

Ces résultats montrent que la significativité d'une tendance peut changer en fonction de la longueur de l'historique considéré, surtout lorsque la variable suit des oscillations cycliques.

Précipitations

La carte ci-dessous montre les résultats des tendances et corrélations significatives pour les précipitations.

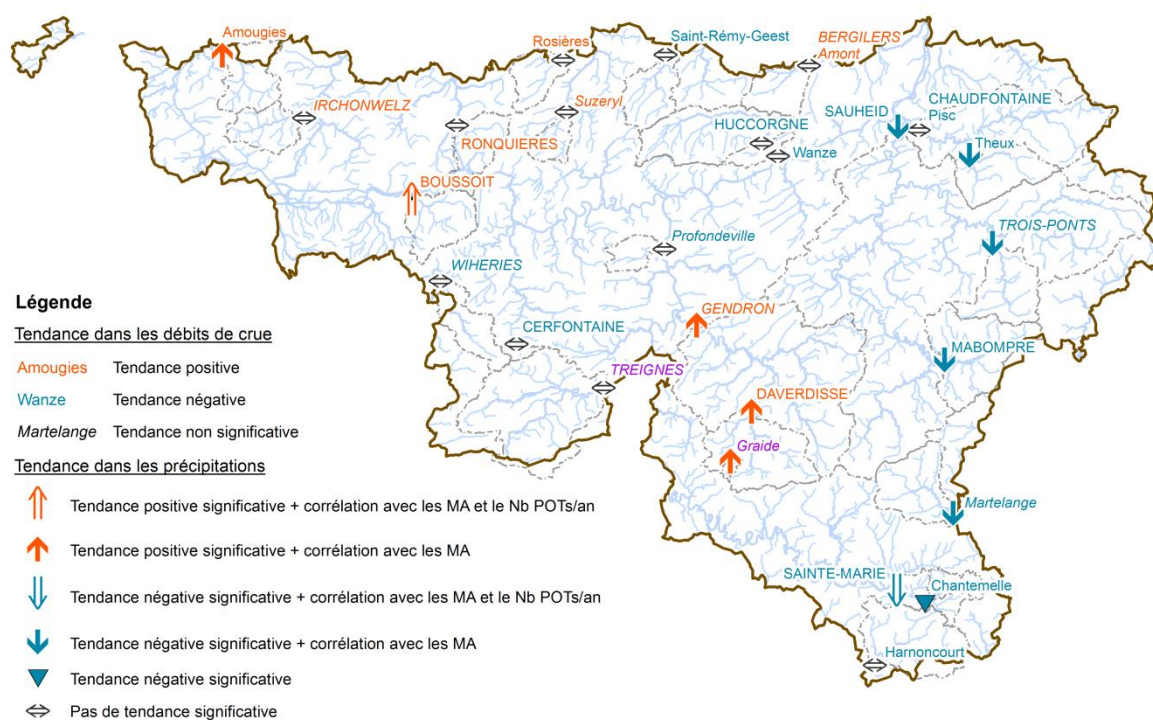


Figure 5. Carte des tendances dans les précipitations et de leur corrélation avec les tendances dans les débits de crue.

La tendance est significative pour au moins un des 3 indicateurs pour 12 bassins versants sur les 26. Elle est positive pour les bassins versants d'Amougies, de Bousoit et ceux de la Lesse, et négative dans le sud de la région et pour les bassins de l'Ourthe, Amblève et Vesdre. Ceci correspond aux signes des tendances observées dans les débits de crue ; les corrélations sont d'ailleurs positives et significatives pour tous ces bassins versants, excepté Chantemelle. Ces résultats sont aussi en adéquation avec l'information selon laquelle l'intensité des pluies augmenterait dans la région de Bouillon mais diminuerait dans la région de Butgenbach.

Si l'on décompose les résultats par indicateur (Tableau 2), on constate que les tendances positives ne sont significatives que pour les maximums annuels des précipitations journalières, ainsi que pour le maximum annuel des cumuls sur 2 jours pour Gendron ; il n'y a pas de tendances positives significatives pour le maximum annuel des cumuls sur 3 jours. Pour les tendances négatives, c'est le contraire : elles sont toutes significatives pour le maximum annuel des cumuls sur 3 jours, seules 3 (Sauheid, Theux et Martelange) le sont pour le maximum annuel des cumuls sur 2 jours et une seule (Theux) pour le maximum annuel des précipitations journalières.

Tableau 2. Tendances dans les différents indicateurs des précipitations.

Bassin versant	Maximum annuel des précipitations journalières	Maximum annuel des cumuls sur 2 jours	Maximum annuel des cumuls sur 3 jours
Amougies	Tendance positive significative		
BOUSSOIT	Tendance positive significative		
SAUHEID			Tendance négative significative
Theux	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
TROIS-PONTS			Tendance négative significative
MABOMPRE			Tendance négative significative
Martelange		Tendance négative significative	Tendance négative significative
SAINTE-MARIE			Tendance négative significative
Chantemelle			Tendance négative significative
GENDRON	Tendance positive significative	Tendance positive significative	
DAVERDISSE	Tendance positive significative		
Graide	Tendance positive significative		

Le tableau ci-dessous montre, de nouveau par indicateur, les corrélations avec les débits maximums annuels et le nombre de POTs par an. On peut voir que les précipitations sont corrélées positivement aux débits maximums annuels pour tous les bassins versants. Les corrélations avec le nombre de POTs par an sont moins nombreuses mais elles sont aussi toutes positives. On ne peut par contre pas faire de généralisation concernant le type d'indicateur qui est corrélé à l'amplitude et/ou à la fréquence des crues.

Tableau 3. Corrélations entre les différents indicateurs des précipitations et les maximums annuels d'une part, et le nombre de POTs par an d'autre part. Le type de relation n'est indiqué que lorsqu'un ou deux des 4 tests de corrélations n'étaient pas significatifs. Les résultats sont en gris lorsqu'il n'y a pas de tendance dans cet indicateur des débits de crue.

Bassin versant	Débits maximums annuels			Nombre de POTs par an		
	Maximum annuel des précipitations journalières	Maximum annuel des cumuls sur 2 jours	Maximum annuel des cumuls sur 3 jours	Maximum annuel des précipitations journalières	Maximum annuel des cumuls sur 2 jours	Maximum annuel des cumuls sur 3 jours
Amougies	Positive	Positive	Positive		Positive (relation monotone et ordinale)	Positive (relation monotone et ordinale)
IRCHONWELZ		Positive (relation monotone et ordinale)				Positive
BOUSSOIT	Positive	Positive	Positive	Positive	Positive	Positive
RONQUIERES	Positive	Positive	Positive	Positive	Positive	Positive (relation monotone et ordinale)
Rosières	Positive	Positive	Positive	Positive		Positive
Suzeryl	Positive	Positive	Positive (relation monotone et ordinale)	Positive	Positive	
Saint-Rémy-Geest	Positive	Positive	Positive		Positive	
WIHERIES	Positive	Positive	Positive			
CERFONTAINE	Positive	Positive	Positive			
TREIGNES	Positive	Positive	Positive			
HUCCORGNE	Positive	Positive	Positive		Positive	
Wanze		Positive	Positive		Positive	
BERGILERS Amont	Positive	Positive	Positive	Positive (relation monotone et ordinale)		Positive
SAUHEID		Positive	Positive			
CHAUDFONTAINE Pisc	Positive	Positive	Positive		Positive	
Theux		Positive	Positive			
TROIS-PONTS			Positive			
MABOMPRES			Positive			Positive
Martelange	Positive	Positive	Positive		Positive	
SAINTE-MARIE	Positive	Positive	Positive			
Chantemelle	Positive	Positive	Positive			
Harnoncourt	Positive	Positive	Positive			
GENDRON	Positive	Positive	Positive		Positive	
DAVERDISSE	Positive	Positive	Positive		Positive	
Graide	Positive	Positive	Positive		Positive	Positive (relation monotone et ordinale)

Profondeville	Positive	Positive	Positive	Positive	Positive
---------------	----------	----------	----------	----------	----------

Les résultats « à long terme » sont néanmoins assez différents, comme on peut le voir sur la carte ci-dessous.



Figure 6. Carte des tendances dans les précipitations depuis 1962.

On ne retrouve plus aucune tendance significativement négative. La tendance positive à Boussoit et Gendron n'est plus significative, mais elle l'est désormais à Treignes. Du point de vue des indicateurs, la tendance est significative pour le maximum annuel des précipitations journalières pour les 4 bassins versants, et pour le maximum annuel des cumuls sur 2 jours pour Daverdisse et Graide.

Chaudfontaine et Harnoncourt, qui ont un historique plus long que les autres stations proches (1968-2017 et 1975-2017 respectivement), étaient d'ailleurs les seuls bassins versants dans leur région où la tendance n'était pas significative. Par contre, les stations de Boussoit et Gendron possèdent respectivement le même historique de données que Treignes et Daverdisse (1975-2017 et 1969-2017 respectivement).

Neige

En ce qui concerne les précipitations neigeuses, on peut voir sur la carte ci-dessous qu'une tendance négative a été détectée dans 11 bassins versants, tous situés dans le bassin de la Meuse.

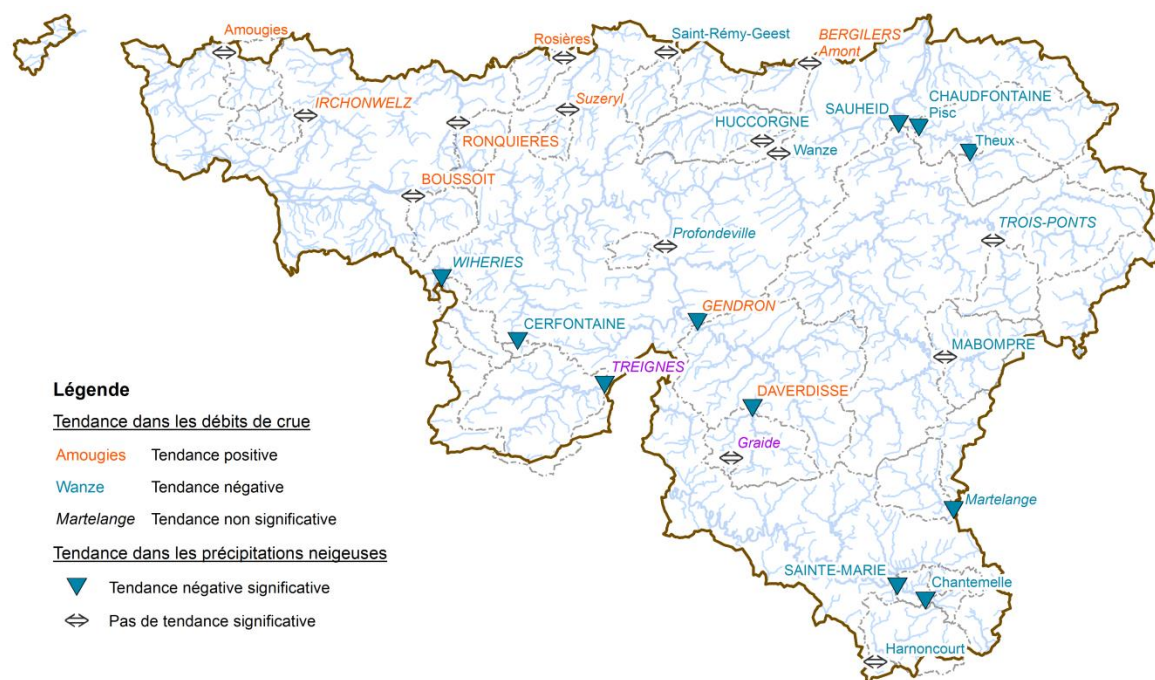


Figure 7. Carte des tendances dans les précipitations neigeuses.

Ces diminutions de précipitations neigeuses ne sont toutefois pas corrélées aux diminutions des débits de crue. Une seule corrélation est significative mais aucune tendance n'a été détectée pour cet indicateur : corrélation positive pour Mabompré entre le maximum annuel de la neige accumulée et les débits maximums annuels.

Le tableau ci-dessous détaille les résultats de détection de tendance par indicateur des précipitations neigeuses.

Tableau 4. Tendances dans les différents indicateurs annuels des précipitations neigeuses.

Bassin versant	Total annuel des précipitations neigeuses	Maximum annuel de neige accumulée	Maximum annuel de neige fondue	Maximum des cumuls de neige fondue sur 2 jours	Maximum des cumuls de neige fondue sur 3 jours
WIHERIES		Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
CERFONTAINE		Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
TREIGNES		Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
SAUHEID	Tendance négative significative*	Tendance négative significative*			
CHAUDFONTAINE Pisc	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative*	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Theux	Tendance négative significative*				
Martelange	Tendance négative	Tendance négative		Tendance négative	Tendance négative

	significative	significative		significative	significative
SAINTE-MARIE		Tendance négative significative	Tendance négative significative**	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Chantemelle					Tendance négative significative
GENDRON	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
DAVERDISSE	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative

* test de régression linéaire uniquement

** test de Mann-Kendall uniquement

Cette diminution des précipitations neigeuses est confirmée et même généralisée lorsque l'on inclut l'historique des données météorologiques depuis 1962 ; les tendances « à long terme » sont en effet significativement négatives pour tous les bassins versants, sauf Mabompré. Les résultats par indicateur sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5. Tendances dans les différents indicateurs annuels des précipitations neigeuses depuis 1962.

Bassin versant	Total annuel des précipitations neigeuses	Maximum annuel de neige accumulée	Maximum annuel de neige fondue	Maximum des cumuls de neige fondue sur 2 jours	Maximum des cumuls de neige fondue sur 3 jours
Amougies	Tendance négative significative			Tendance négative significative	Tendance négative significative
IRCHONWELZ	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
BOUSSOIT	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
RONQUIERES	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Rosières	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Suzeryl	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Saint-Rémy-Geest	Tendance négative significative	Tendance négative significative		Tendance négative significative	Tendance négative significative
WIHERIES	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
CERFONTAINE	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
TREIGNES	Tendance négative	Tendance négative	Tendance négative	Tendance négative	Tendance négative

	significative	significative	significative	significative	significative
HUCCORGNE	Tendance négative significative				
Wanze	Tendance négative significative				
BERGILERS Amont	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
SAUHEID	Tendance négative significative	Tendance négative significative			
CHAUDFONTAINE Pisc	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Theux	Tendance négative significative*				Tendance négative significative
TROIS-PONTS	Tendance négative significative				
MABOMPRE					
Martelange	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
SAINTE-MARIE	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Chantemelle	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Harnoncourt	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
GENDRON	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
DAVERDISSE	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Graide	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative
Profondeville	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative	Tendance négative significative

En moyenne pour tous les bassins de l'étude et en utilisant les équations de régression linéaire, on peut chiffrer cette diminution à plus de 50% entre 1967 et 2017 ; **les quantités de neige ont donc diminué de moitié dans les 50 dernières années.**

Ceci confirme les résultats de modélisation de l'Ourthe par Wyard et al. (2017) qui avaient détecté une diminution significative de l'accumulation neigeuse pour la période 1959-2010.

On observe également, sur le graphique ci-dessous, que ces diminutions sont fortement corrélées négativement à l'augmentation des températures hivernales (décembre-mars).

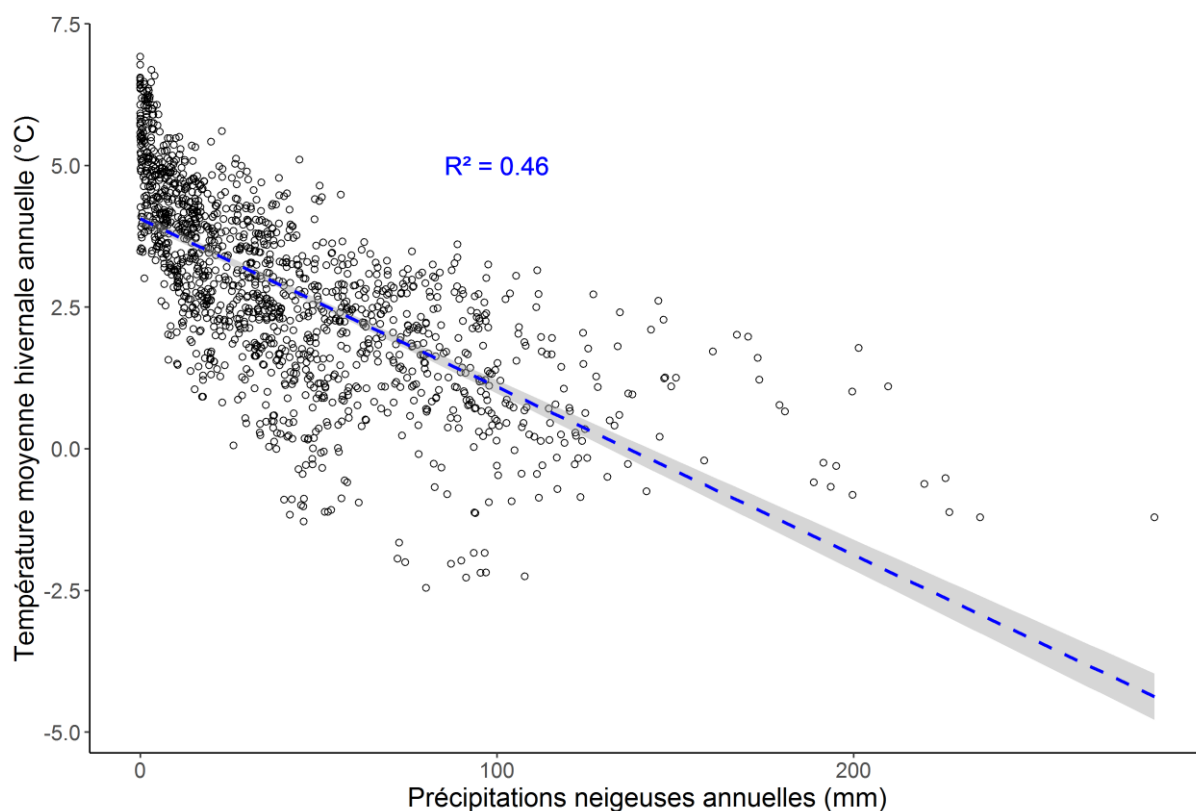


Figure 8. Graphique de corrélation entre les précipitations neigeuses totales annuelles et la température moyenne hivernale (décembre-mars) pour tous les bassins versants.

Évapotranspiration

Comme on peut le voir sur la carte ci-dessous, nous avons détecté une tendance positive significative pour 14 bassins versants, principalement situés dans la partie nord de la région. Cette augmentation de l'évapotranspiration potentielle totale annuelle n'est toutefois corrélée négativement à la diminution des débits de crue que pour Saint-Rémy-Geest et Wanze. Elle est également corrélée positivement à l'augmentation des débits à Amougies, ce qui est contraire aux processus physiques selon lesquels l'évapotranspiration transfère l'eau du sol vers l'atmosphère, ce qui diminue ainsi l'humidité du sol avant les crues et conduit donc à des débits plus faibles (Mediero et al., 2014).

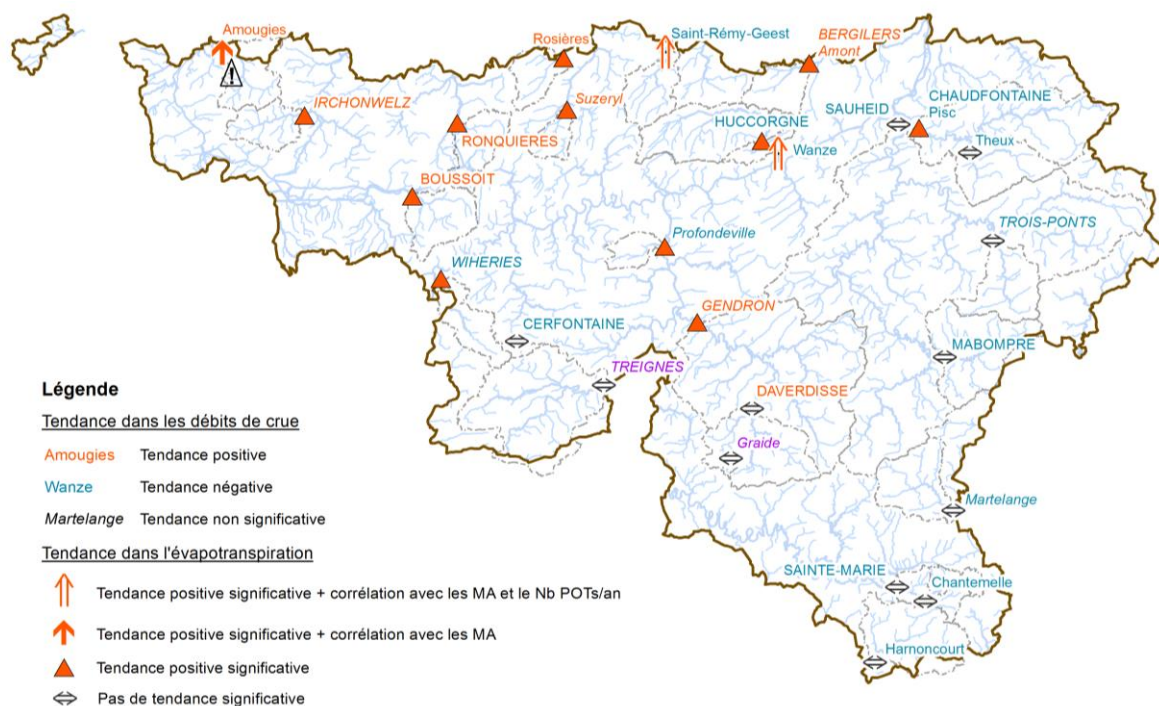


Figure 9. Carte des tendances dans l'évapotranspiration et de leur corrélation avec les tendances dans les débits de crue.

Cette tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration est également visible sur 4 bassins versants supplémentaires (Cerfontaine, Daverdisse, Chantemelle et Harnoncourt) lorsqu'on tient compte de données depuis 1962. La tendance à Chaudfontaine n'est, par contre, plus significative.

On observe également que cette augmentation de l'évapotranspiration est logiquement directement corrélée à l'augmentation des températures (voir graphique ci-dessous).

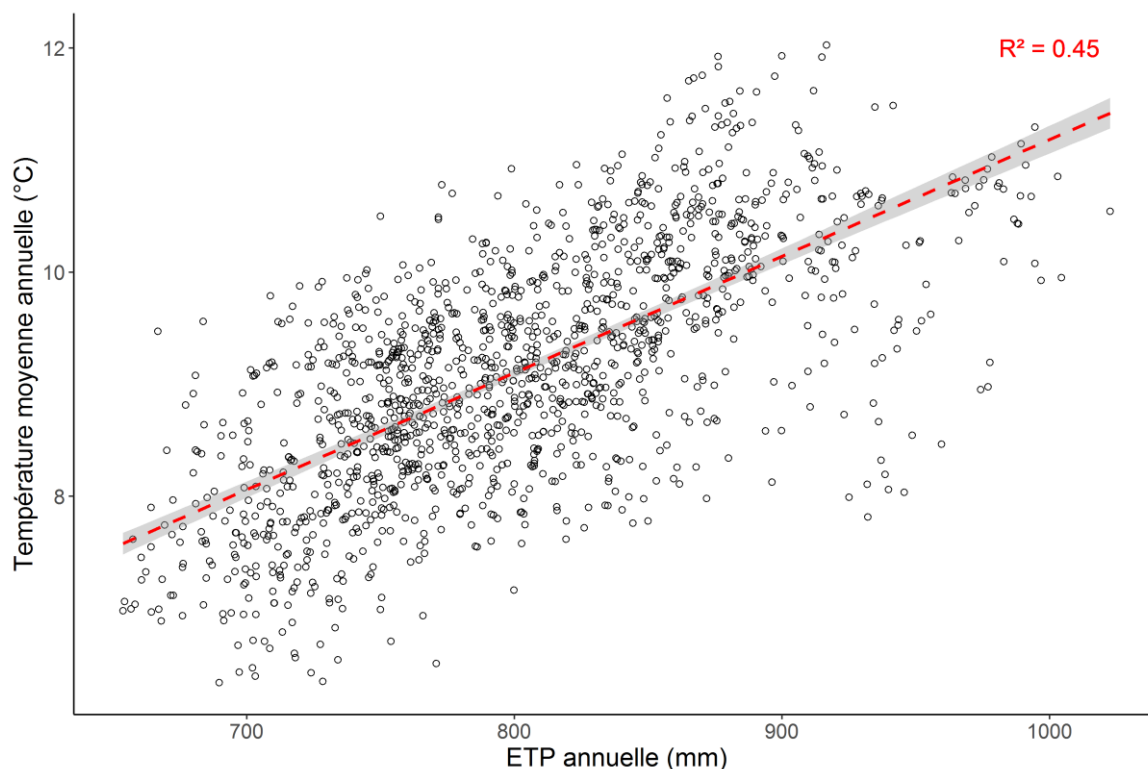


Figure 10. Graphique de corrélation entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) totale annuelle et la température moyenne pour tous les bassins versants.

L'augmentation de température est en fait généralisée sur toute la zone d'étude (tendances significatives pour tous les bassins versants) et celle-ci a été estimée, à l'aide des équations de régression, à 1,6°C en 50 ans (1967-2017) en moyenne sur tous les bassins versants. Le graphique ci-dessous montre un exemple de cette augmentation pour Boussoit.

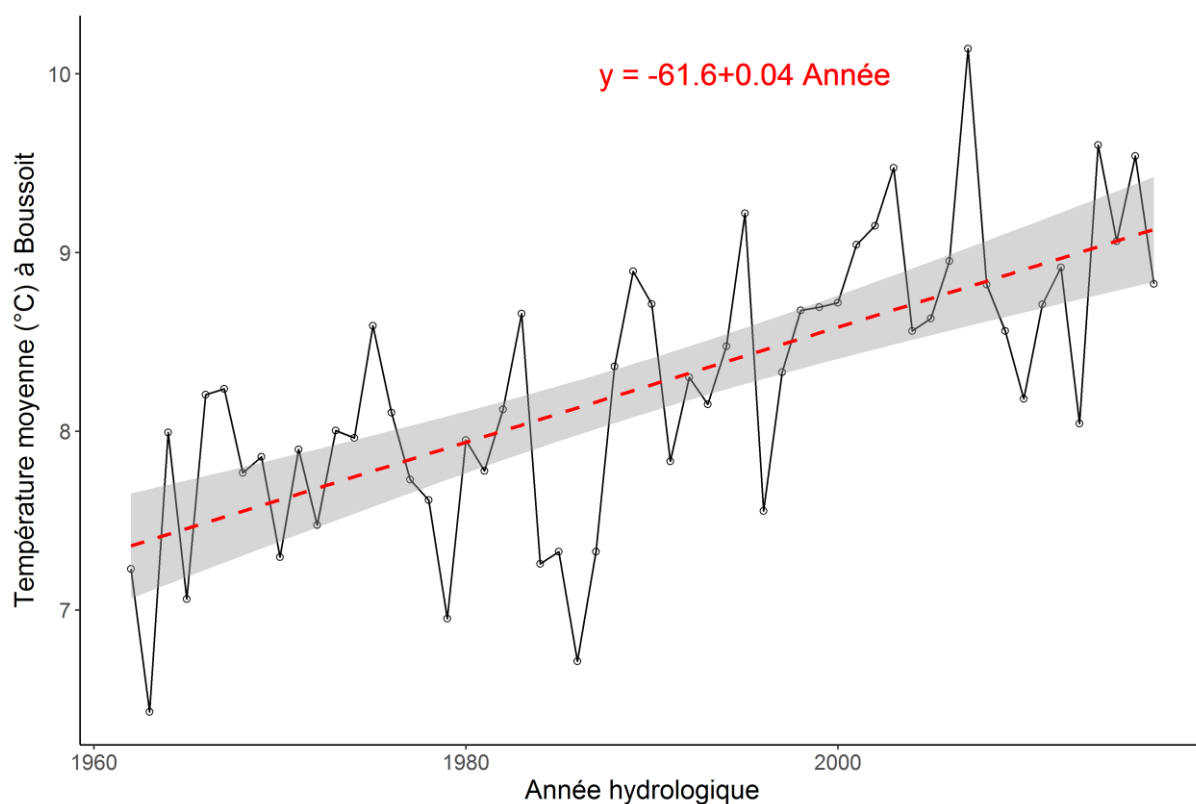


Figure 11. Evolution de la température moyenne annuelle à Boussoit entre 1962 et 2017.

Indice d'humidité extrême

Pour rappel, l'indice d'humidité extrême est le cumul annuel de la différence journalière entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, à partir duquel nous avons calculé le nombre de jours secs, très secs, humides et très humides.

Comme le montre la carte ci-dessous, le nombre de jours humides suit une tendance négative significative pour 9 bassins versants, ces diminutions étant corrélées aux diminutions du nombre de POTs par an pour 6 d'entre eux.

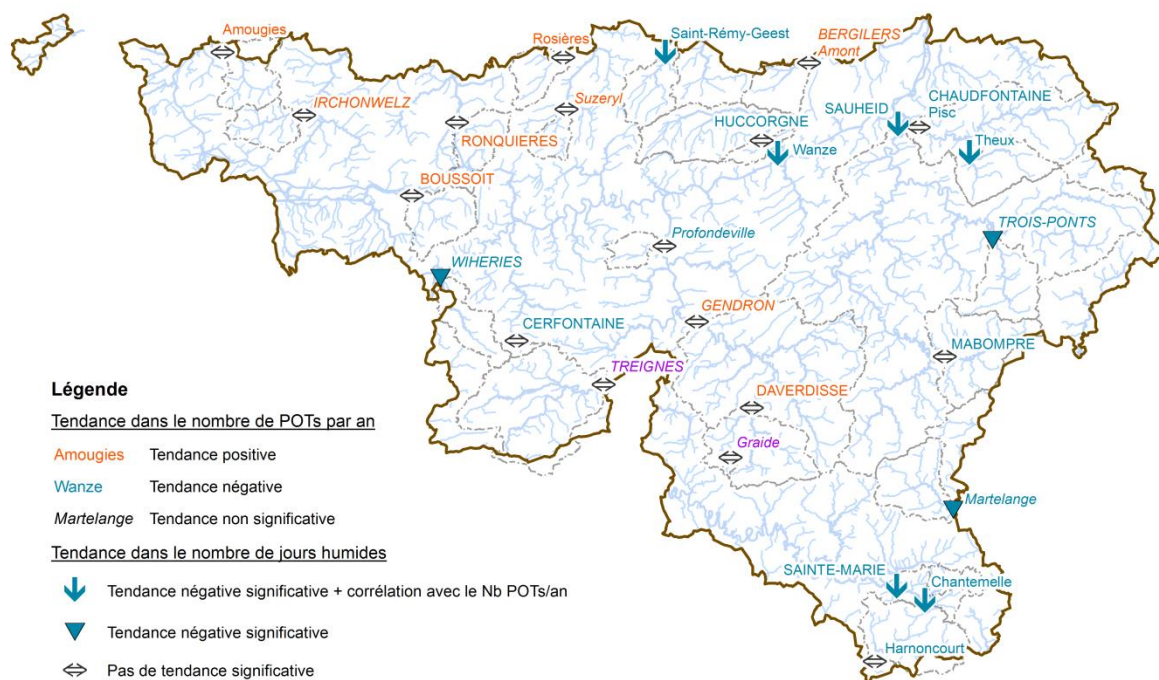


Figure 12. Carte des tendances dans le nombre de jours humides et de leur corrélation avec les tendances dans la fréquence des crues.

Ces tendances sont assez similaires aux tendances négatives dans les précipitations. On constate également une augmentation du nombre de jours secs et/ou très secs pour 4 de ces bassins versants (Saint-Rémy-Geest, Wihéries, Wanze et Sainte-Marie), ainsi que pour 9 autres bassins versants, situés dans le nord de la région (Amougies, Irchonwelz, Boussoit, Ronquières, Rosières, Suzeryl, Huccorgne, Bergilers et Chaudfontaine), correspondant plus ou moins aux augmentations d'évapotranspiration. Une tendance négative significative a également été détectée dans le nombre de jours secs ou très secs pour 3 bassins versants (Trois-Ponts, Martelange et Harnoncourt). Aucune tendance significative n'a par contre été observée pour le nombre de jours très humides.

Les tendances « à plus long terme » sont très différentes : elles sont significativement positives pour 4 bassins versants (Treignes, Sainte-Marie, Chantemelle et Harnoncourt) pour le nombre de jours humides, et pour 3 bassins (Daverdisse, Treignes et Mabompré) pour le nombre de jours très humides. Parmi ces bassins, seuls Treignes et Daverdisse ont également une tendance significativement positive dans les précipitations. Pour le nombre de jours secs et très secs, on observe, tout comme pour l'évapotranspiration, une augmentation du nombre de tendances significatives. La tendance positive est d'ailleurs généralisée à tous les bassins versants sauf 3 (Mabompré, Trois-Ponts et Martelange), pour le nombre de jours secs. On observe tout de même une tendance négative significative dans le nombre de jours très secs à Martelange.

Surfaces bâties

Le graphique ci-dessous représente la proportion de chaque classe de densité du bâti par bassin versant en 2010. Les données manquantes (en gris) correspondent à la surface du bassin versant située en dehors de la région wallonne.

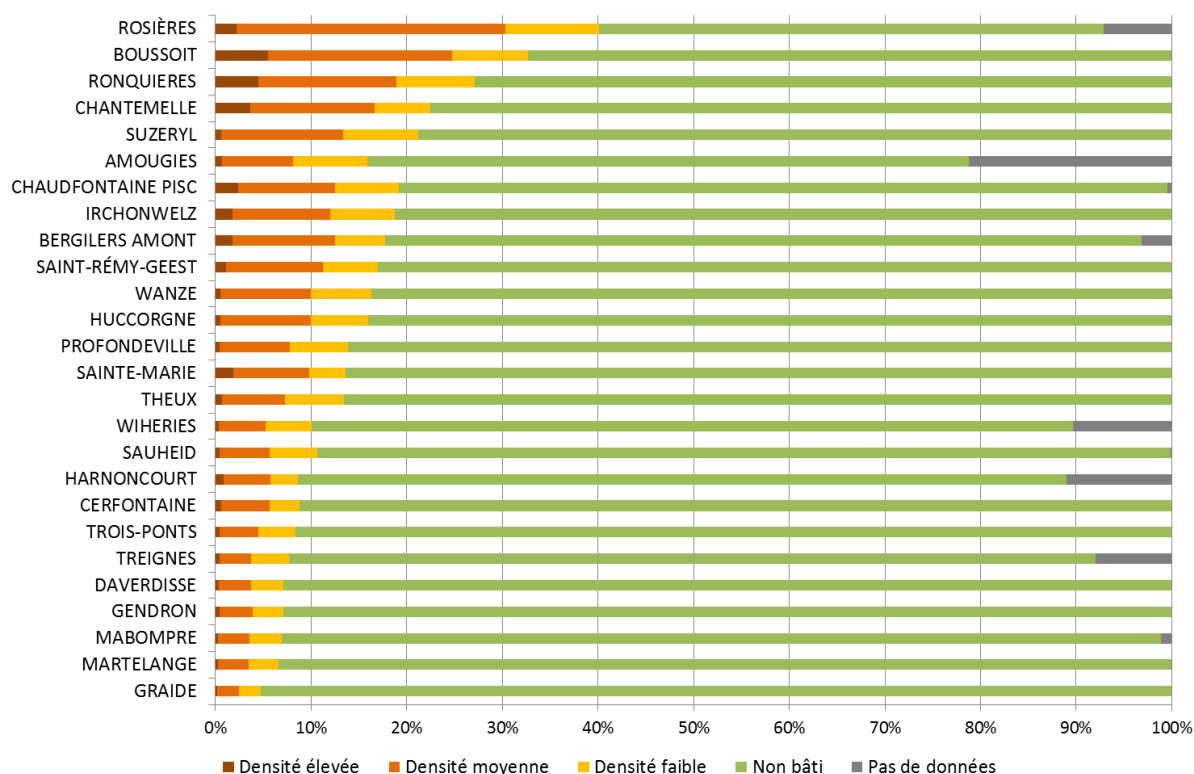


Figure 13. Proportion de chaque classe de densité du bâti par bassin versant en 2010.

Les bassins versants les plus urbanisés, à l'exception de Chantemelle et Chaudfontaine, sont situés dans le nord de la région. Pour la plupart des bassins versants, la proportion de surface bâtie de densité élevée est proportionnelle à la proportion de surface bâtie totale. Suzeryl, Amougies et Rosières ont une proportion de surface bâtie de densité élevée plus faible, alors que le bassin versant de Sainte-Marie est caractérisé par une proportion plus élevée comparativement aux autres bassins.

Le graphique ci-dessous montre, pour chaque bassin versant, l'augmentation de la surface bâtie totale entre 1990 et 2010.

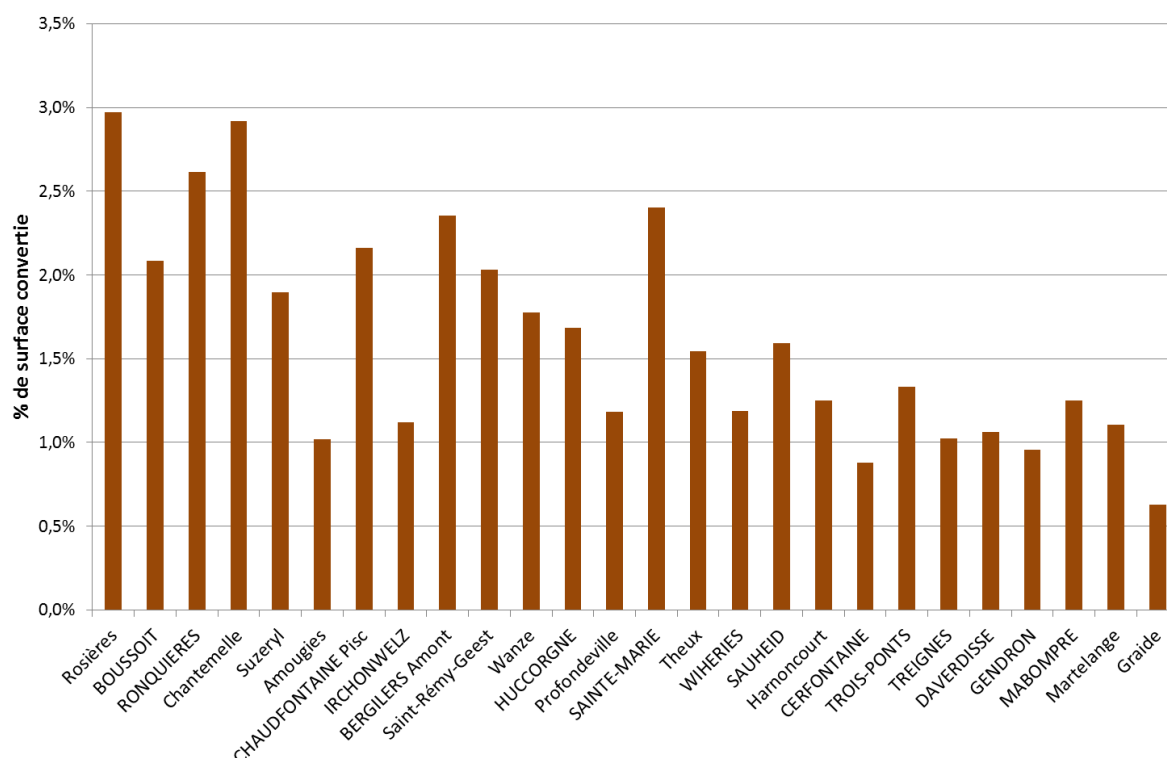


Figure 14. Proportion de la surface de chaque bassin versant convertie en surface bâtie entre 1990 et 2010. Les bassins versants sont ordonnés par ordre décroissant de proportion de surface bâtie totale.

Cette augmentation de la surface bâtie est, en général, plus élevée pour les bassins versants les plus urbanisés. Elle varie entre 0,6% pour Graide (urbanisé à moins de 5%) et 3% pour Rosières (urbanisé à plus de 43%). L'augmentation à Amougies et Irchonwelz est plus faible comparativement aux autres bassins versants similaires du point de vue de leur urbanisation, mais elle est au contraire plus élevée à Sainte-Marie.

D'un point de vue statistique, la tendance positive est significative pour tous les bassins versants, mais peu de corrélations sont significatives. L'augmentation de la surface bâtie est corrélée positivement avec le nombre de POTs par an pour Bergilers et Daverdisse, mais négativement pour Cerfontaine et Wanze, et aussi négativement aux débits maximums annuels pour Mabompré et Harnoncourt. Une corrélation négative voudrait dire qu'une augmentation de la surface bâtie mène à une diminution des débits, ce qui est contraire à ce qu'on retrouve dans la littérature. Il faut toutefois rappeler que ces tests sont basés sur les données de seulement 3 années entre lesquelles les données ont été interpolées de façon linéaire. L'autocorrélation des données est par conséquent forte et influence peut-être tout de même les résultats du test de Mann-Kendall modifié.

Lorsqu'on décompose cette augmentation de la surface bâtie par classe de densité, on remarque que la proportion de surface bâtie de densité faible diminue pour les bassins versants où l'urbanisation est élevée (voir graphique ci-dessous). Pour ces bassins versants, il y a donc une densification de l'habitat en plus de son expansion. On peut également voir, pour tous les bassins versants, que c'est la proportion de surface bâtie de densité moyenne qui augmente le plus ; cette classe étant aussi la classe dominante pour la plupart des bassins versants (voir Figure 13).

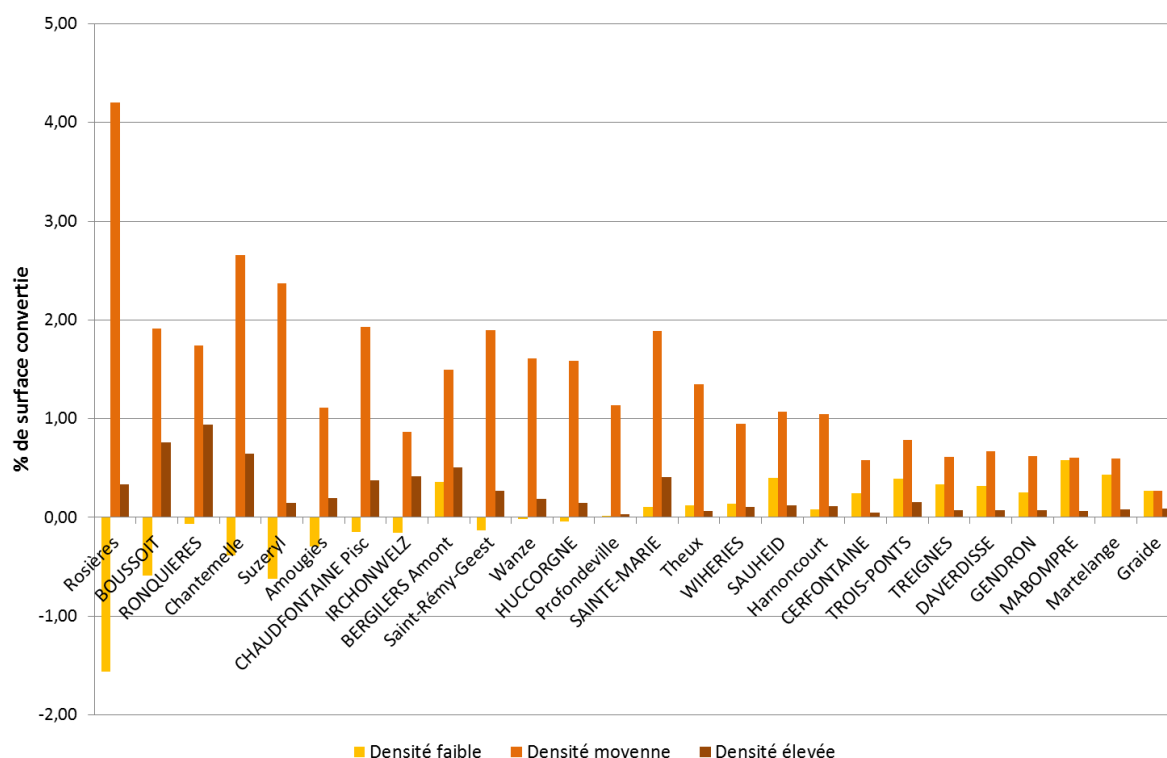


Figure 15. Evolution de la proportion de surface bâtie par bassin versant entre 1990 et 2010 pour chaque classe de densité.

Surfaces agricoles

Les proportions de chaque catégorie de surface agricole par bassin versant pour l'année 2017 sont représentées sur le graphique ci-dessous. La catégorie « autres » regroupe tous les types de cultures qui n'ont pas pu être classifiées par manque d'information. La classe principale de cette catégorie est la classe « cultures inconnues » (code 99), dont les pourcentages ont brusquement augmenté (+ 2,8 % en moyenne) en 2015. Cette augmentation des « cultures inconnues » ne s'est toutefois pas faite aux dépens d'autres types de culture, la surface agricole totale ayant augmenté d'un pourcentage similaire en 2015.

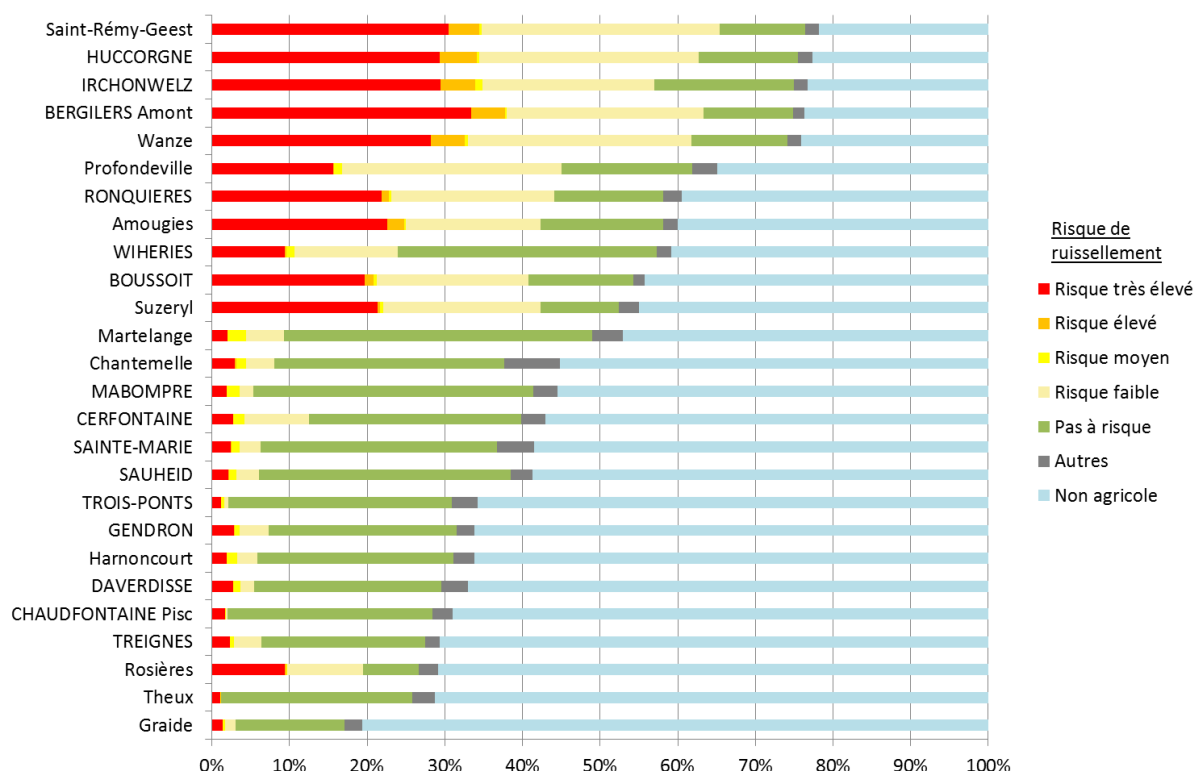


Figure 16. Proportion de chaque catégorie de culture par bassin versant en 2017.

On remarque que les bassins versants les plus agricoles sont situés dans le nord de la région et, à l'exception de Wihéries, les cultures à risque de ruissellement très élevé représentent environ un tiers de leur surface agricole totale. Ceci est aussi le cas pour Rosières malgré sa plus faible proportion de surface agricole. Les bassins versants du sud de la région, ainsi que Wihéries, sont plutôt dominés par les surfaces à risque de ruissellement nul (principalement prairies).

Les graphiques ci-dessous comparent, pour chaque bassin versant, le pourcentage de la surface du bassin versant occupée par les différentes catégories de surface agricole en 1998 et en 2017.

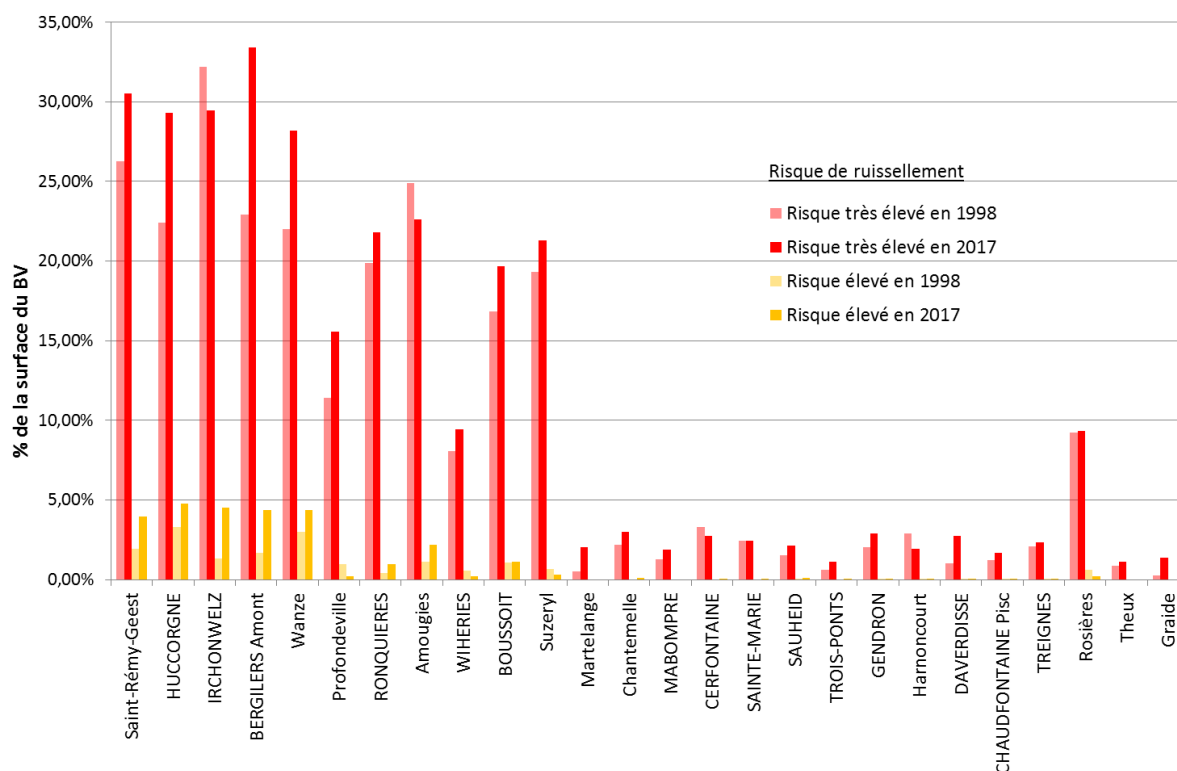


Figure 17. Proportions des surfaces agricoles à risques de ruissellement élevé et très élevé par bassin versant en 1998 et 2017.

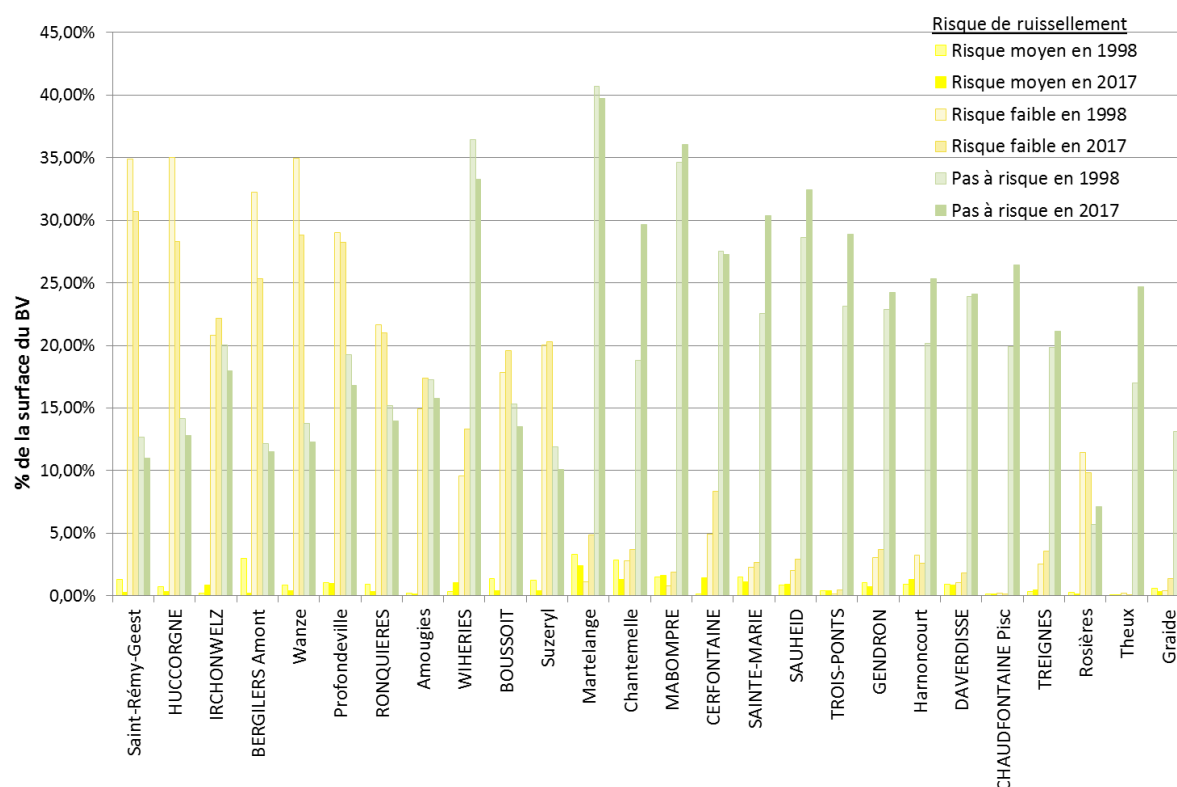


Figure 18. Proportions des surfaces agricoles à risques de ruissellement moyen, faible et nul par bassin versant en 1998 et 2017.

Les surfaces agricoles à risque de ruissellement très élevé ont, en règle générale, augmenté entre 1998 et 2017, sauf pour 5 bassins versants dont Irchnonwelz et Amougies où elles ont légèrement diminué. Cette augmentation est plus marquée pour les bassins les plus agricoles, atteignant plus de 10% pour Bergilers par exemple (passant de 23% à 33,4%).

Les surfaces agricoles à risque de ruissellement élevé ont également augmenté mais dans une moindre mesure (maximum +3,2%, pour Irchnonwelz, passant de 1,3% à 4,5%).

Les changements dans les surfaces à risque moyen sont aussi comparativement assez faibles (maximum -2,8%, pour Bergilers, passant de 3% à 0,2%).

Les changements dans les surfaces agricoles à risque faible sont quant à eux variables en fonction du bassin versant et peuvent aller jusqu'à +3,7% pour Wihéries (passant de 9,6% à 13,3%) et Martelange (passant de 1,1% à 4,8%) ou -7% pour Bergilers (passant de 32,3% à 25,3%).

En ce qui concerne les surfaces à risque nul de ruissellement, celles-ci diminuent légèrement (maximum -3,2%, pour Wihéries, passant de 36,5% à 33,3%) pour les bassins les plus agricoles et augmentent (maximum +10,9%, pour Chantemelle, passant de 18,8% à 29,7%) pour les bassins moins agricoles. Ces augmentations correspondent principalement à des augmentations des prairies. Elles ne sont toutefois pas compensées par des diminutions d'autres cultures et il serait étonnant que des surfaces forestières aient été converties en prairies. L'hypothèse la plus probable est donc une augmentation des déclarations des prairies par les agriculteurs. Ceci illustre une des principales limitations de ce jeu de données : il dépend fortement des déclarations faites par les agriculteurs, et une augmentation/diminution d'une classe n'est pas toujours réelle mais résulte parfois d'une augmentation/diminution des terres déclarées.

Le graphique ci-dessus chiffre les changements entre les deux dates extrêmes pour lesquelles les données sont disponibles, mais cela ne reflète pas toujours les évolutions au fil des années. Une catégorie pourrait avoir une proportion plus faible en 2017 qu'en 1998 alors que la tendance générale est une légère augmentation, comme c'est le cas pour Wanze et Saint-Rémy-Geest pour la catégorie de risque de ruissellement faible par exemple (voir Figure 19 ci-dessous). Nous avons donc recalculé ces différences en utilisant les équations de régression et reproduit ce graphique, représentant mieux la tendance globale (voir Figure 20 ci-dessous).

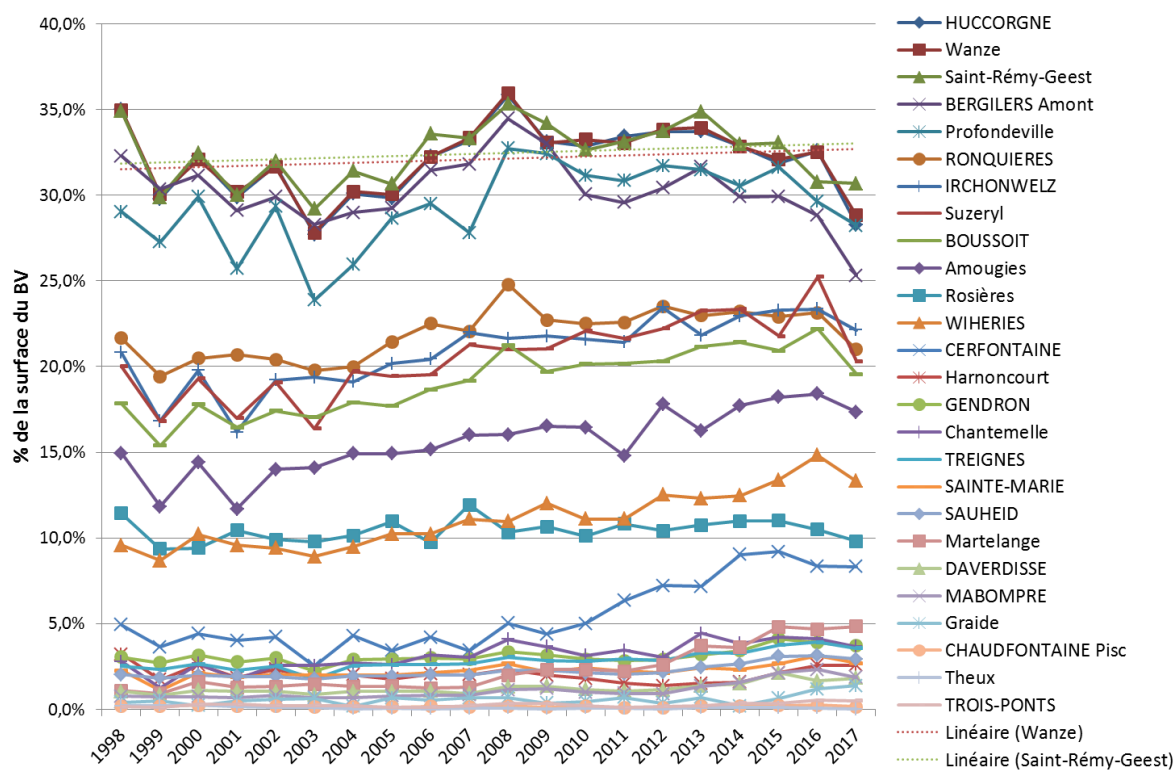


Figure 19. Evolution de la proportion de chaque bassin versant en surface agricole à risque de ruissellement faible entre 1998 et 2017, avec la droite de régression linéaire pour Wanze et Saint-Rémy-Geest.

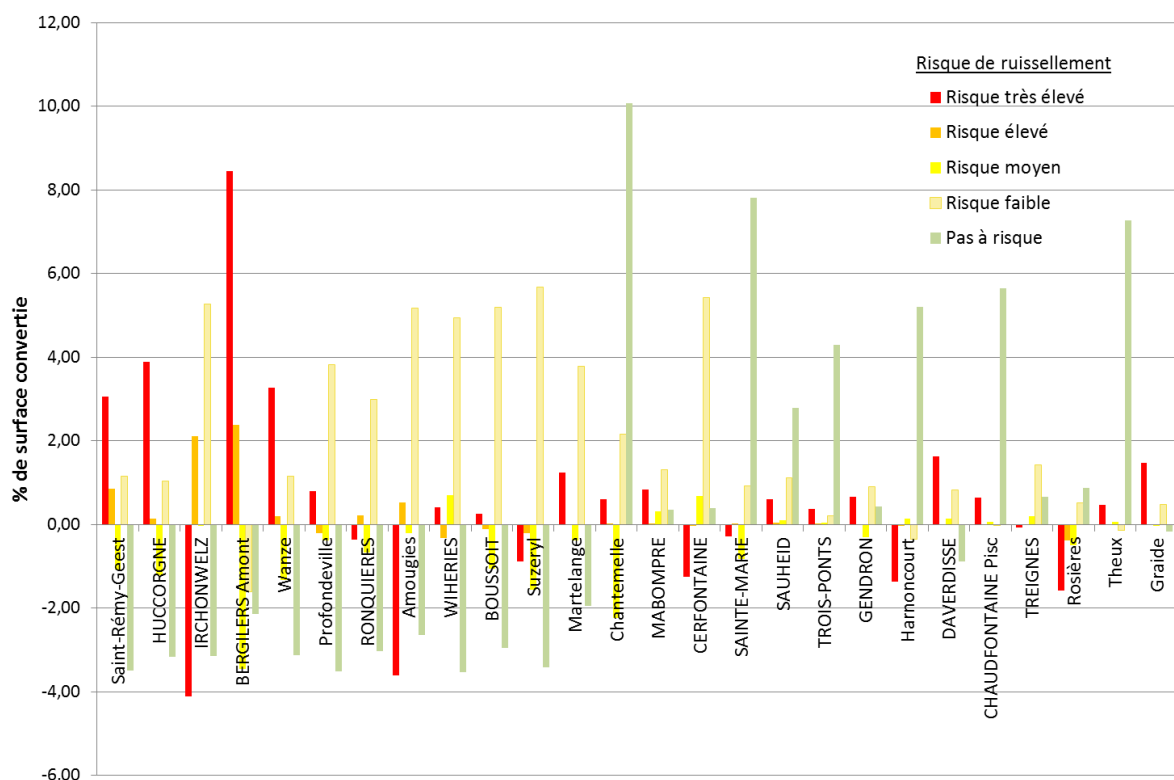


Figure 20. Evolution de chaque catégorie de surface agricole par bassin versant entre 1998 et 2017 estimée à partir des équations de régression.

On observe globalement les mêmes tendances pour tous les bassins versants, excepté pour les surfaces à risque de ruissellement faible. La tendance est en effet opposée pour Saint-Rémy-Geest, Huccorgne, Wanze, Profondeville, Ronquières et Rosières.

La carte ci-dessous montre que les tendances dans les surfaces à risque très élevé sont significatives pour 18 bassins versants mais seules 4 corrélations sont significatives. Ces corrélations sont négatives, ce qui est contraire à la logique étant donné qu'une augmentation des cultures à risque de ruissellement élevé devrait engendrer une augmentation des débits de crue et non une diminution. On voit d'ailleurs très bien sur cette carte que, à quelques exceptions près dont Bergilers, les cultures à risque de ruissellement très élevé augmentent dans les bassins versants où l'on observe une diminution des débits, et inversement.

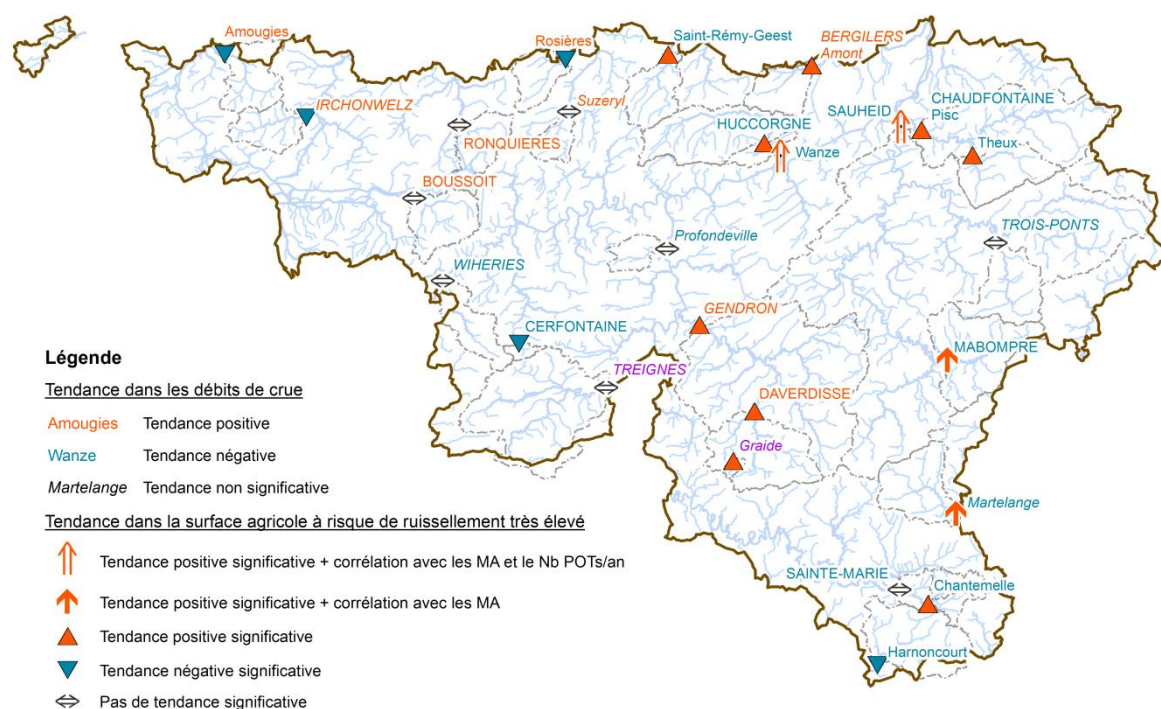


Figure 21. Carte des tendances dans la proportion de surface agricole à risque de ruissellement très élevé et de leur corrélation avec les tendances dans les débits de crue.

Les tendances dans les surfaces à risque de ruissellement élevé sont significatives pour 4 bassins versants (Wihéries, Trois-Ponts, Harnoncourt et Rosières) mais aucune corrélation n'est significative.

Même si les changements dans les surfaces à risque de ruissellement moyen sont plus faibles, ceux-ci sont significatifs pour 12 bassins versants dont 3 sont corrélés aux évolutions dans les débits de crue (corrélation positive avec les maximums annuels pour Wanze et Sainte-Marie, corrélation négative avec le nombre de POTs par an pour Suzeryl et Cerfontaine, et corrélation positive avec le nombre de POTs par an pour Wanze).

Les tendances dans les surfaces à risque de ruissellement faible et leur corrélation avec les débits de crue sont représentées sur la carte ci-dessous. On dénombre 17 tendances et 4 corrélations significatives (positive pour Suzeryl, et négatives pour les autres bassins).

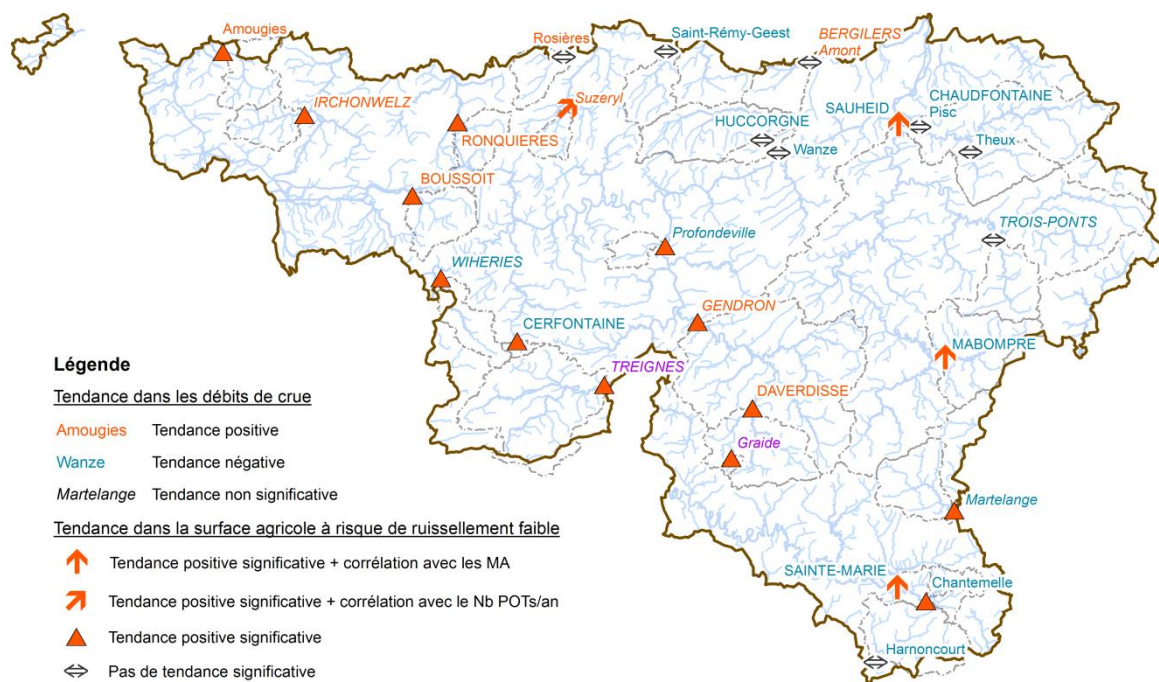


Figure 22. Carte des tendances dans la proportion de surface agricole à risque de ruissellement faible et de leur corrélation avec les tendances dans les débits de crue.

Pour ce qui concerne les surfaces à risque de ruissellement nul, les tendances sont toutes significatives sauf 8 (Martelange, Mabompré, Cerfontaine, Sauheid, Gendron, Daverdisse, Treignes et Graide). Il faut toutefois rappeler que toutes les tendances positives ne sont très probablement pas le reflet d'une augmentation réelle des prairies mais d'une augmentation de leur déclaration. Il n'y a cependant aucune corrélation significative pour les tendances négatives.

Surfaces forestières

Le graphique ci-dessous montre la proportion de surfaces forestières par bassin versant en 2009, 2012 et 2016.

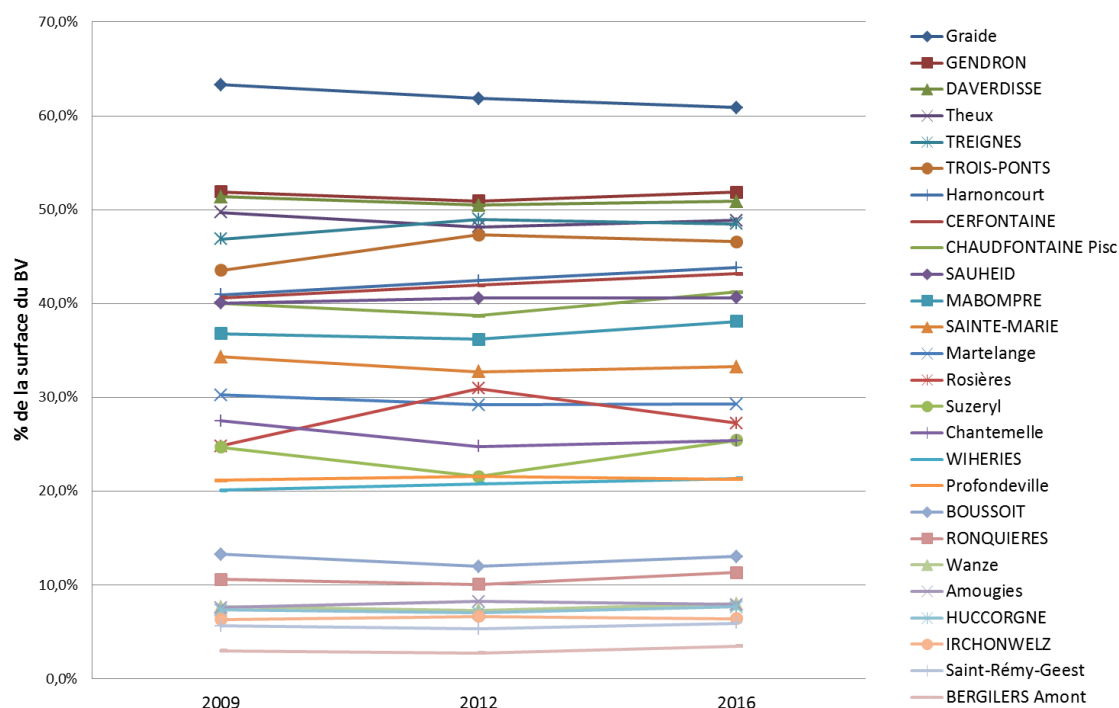


Figure 23. Evolution de la proportion de surfaces forestières par bassin versant entre 2009 et 2016.

Les bassins versants les plus forestiers se situent dans la partie sud de la région. On observe que les changements entre deux années s'opèrent dans les deux sens du fait des coupes rases et régénérations mais que ceux-ci sont faibles par rapport à la surface forestière totale pour la plupart des bassins versants. L'amplitude de ces changements est représentée plus clairement sur le graphique ci-dessous.

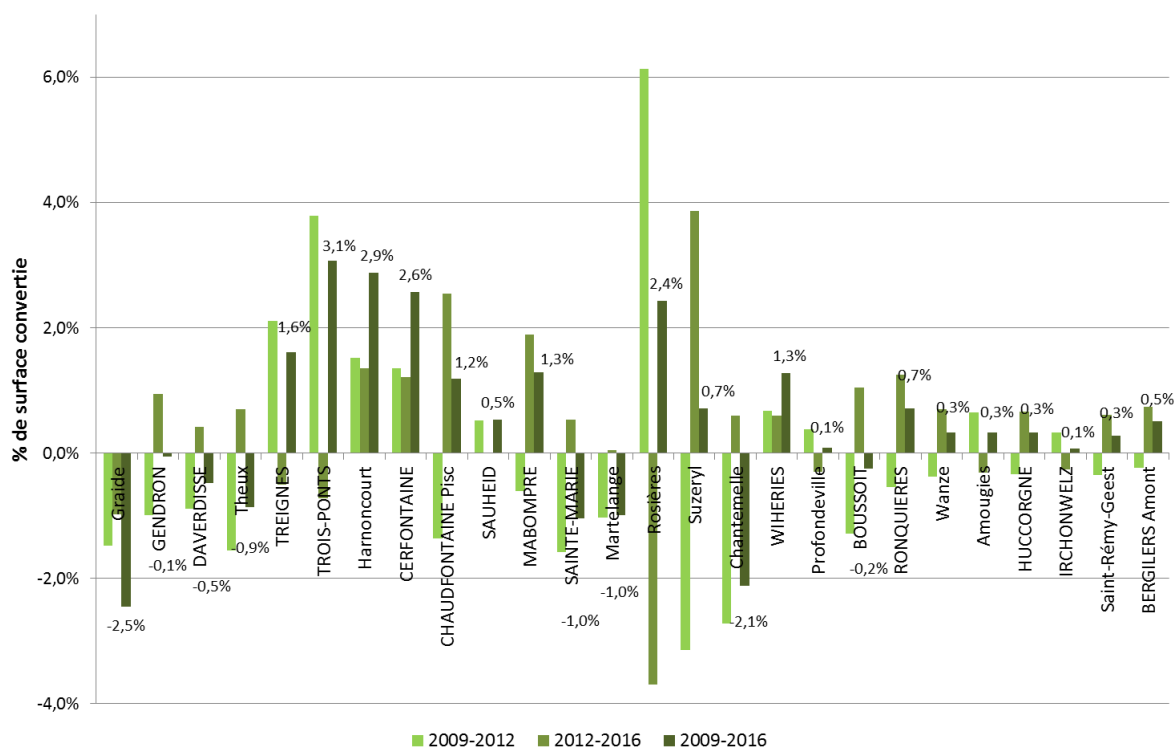


Figure 24. Proportion de la surface de chaque bassin versant ayant subi une déforestation ou afforestation entre 2009, 2012 et 2016. Les bassins versants sont ordonnés par ordre décroissant de proportion de surface forestière totale. Les étiquettes de pourcentages correspondent aux changements entre 2009 et 2016.

Ces tendances sont significatives pour 5 bassins versants : Graide, Harnoncourt, Cerfontaine, Sauheid et Wihéries. Seule l'augmentation à Sauheid est corrélée positivement avec le nombre de POTs par an. Une corrélation positive voudrait toutefois dire que la fréquence des crues augmente avec la surface forestière, ce qui est contraire à ce que l'on retrouve dans la littérature (Bulygina et al., 2013). De plus, le nombre de POTs par an à Sauheid diminue au fil du temps, mais une corrélation positive avec l'augmentation de la surface forestière voudrait dire que le nombre de POTs augmente. Ceci est dû à la durée de la période d'étude qui est ici limitée à 2009-2016.

Ces analyses font ressortir ici encore les limitations de l'utilisation de ces données. Premièrement, la période pour laquelle ces données sont disponibles (2009-2012) est très courte et assez récente ; il n'y a pas de données historiques et il est donc difficile de les mettre en lien avec les débits de crue. Deuxièmement, les pourcentages d'augmentation ou de diminution des surfaces forestières sont assez faibles et une partie de ces changements peuvent provenir du biais lié au traitement des données. Une autre façon d'utiliser ces données de manière plus précise serait d'isoler les surfaces de coupes à blanc et de régénération en superposant les couches cartographiques de 2 années consécutives. Ceci nécessiterait toutefois une série de traitements des données sur ArcGIS qui seraient assez chronophages.

Etant donné ces limitations et le fait que l'évolution des surfaces forestières n'est pas considérée comme un facteur explicatif majeur de l'évolution des crues en Wallonie, il a été décidé de ne pas utiliser ces données dans la suite des analyses.

Analyse PLS

Pour chaque bassin versant, nous obtenons des cercles de corrélation comme les exemples présentés ci-dessous pour Daverdisse. L'ensemble de ces graphiques pour les deux premières composantes est présenté en Annexes 3 et 4.

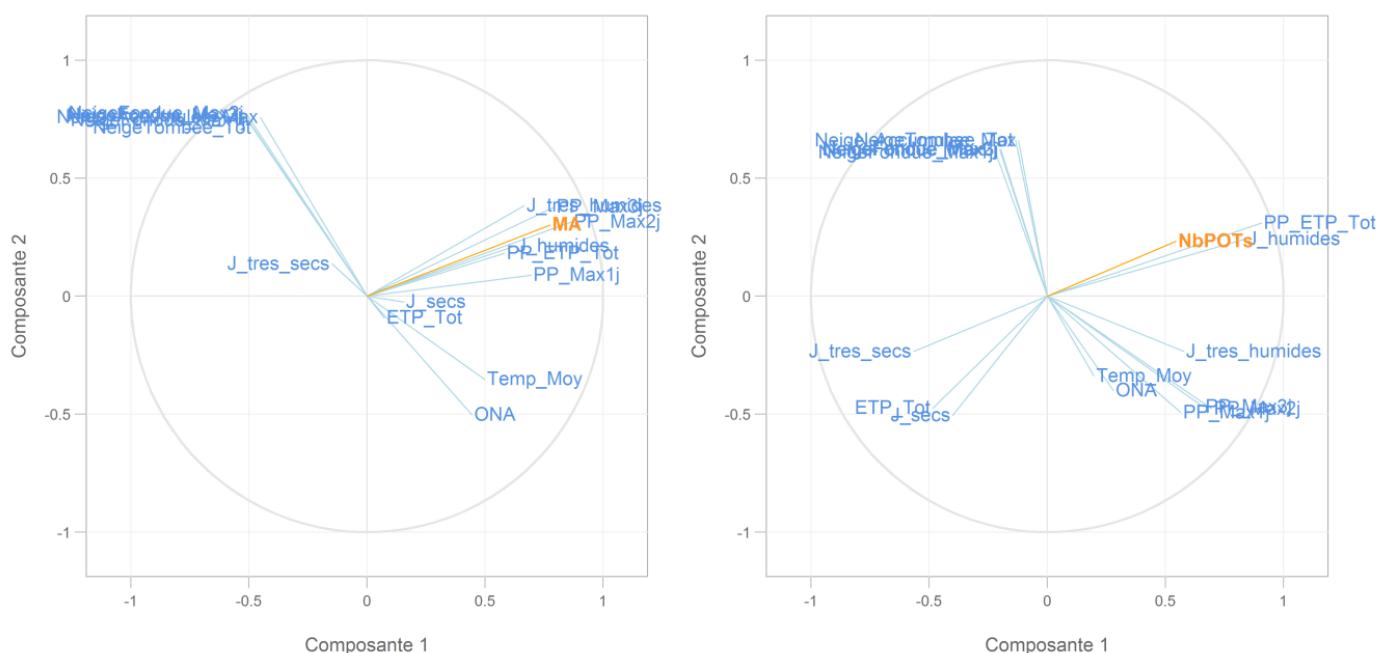


Figure 25. Cercles des corrélations des deux premières composantes de la PLS avec les différentes variables climatiques, et avec les débits maximums annuels (MA) comme variable explicative à gauche et le nombre de POTs par an (Nb POTs) à droite, pour le bassin versant de Daverdisse.

Dans cet exemple, pour les maximums annuels, la première composante, qui explique 60% de la variance des débits, est corrélée positivement aux précipitations (PP) et au nombre de jours humides et très humides, et dans une moindre mesure positivement à l'indice d'humidité extrême (PP_ETP_Tot) et la température ainsi que négativement aux précipitations neigeuses. La deuxième

composante, qui explique 9% de la variance, est quant à elle principalement corrélée positivement aux précipitations neigeuses. Pour le nombre de POTs par an, la première composante explique presque 30% de la variance et est corrélée à l'indice d'humidité extrême et au nombre de jours humides, et dans une moindre mesure aux précipitations et au nombre de jours très humides. La deuxième composante explique un peu plus de 5% de la variance et est principalement corrélée positivement aux précipitations neigeuses.

Cet exemple est assez représentatif de l'ensemble des bassins versants. En moyenne, la première composante explique 45% de la variance des maximums annuels et 40% du nombre de POTs par an, et la deuxième composante environ 8% supplémentaire. La variable qui est en général la plus corrélée à la première composante et qui explique donc le plus la variation des débits de crues est, pour les maximums annuels, une des variables représentant les précipitations et, pour le nombre de POTs par an, l'indice d'humidité extrême. Le tableau ci-dessous détaille ces informations pour chaque bassin versant.

Tableau 6. Pourcentage explicatif des composantes 1 et 2 et variable la plus corrélée à la première composante, pour les maximums annuels et le nombre de POTs par an, pour tous les bassins versants. Les résultats sont en gris lorsqu'il n'y a pas de tendance dans cet indicateur des débits de crue.

Bassin versant	Maximums annuels			Nombre de POTs par an		
	Composante 1	Composante 2	Variable la plus corrélée à la composante 1	Composante 1	Composante 2	Variable la plus corrélée à la composante 1
Amougies	45,3%	9,7%	J_tres_humides	53,3%	5,0%	J_humides
IRCHONWELZ	24,7%	5,3%	J_tres_humides	33,9%	9,1%	PP_ETP_Tot
BOUSSOIT	55,1%	5,8%	PP_Max1j	53,8%	8,5%	PP_ETP_Tot
RONQUIERES	33,9%	8,6%	NeigeFondue_Max1j	51,5%	4,9%	J_tres_humides
Rosières	28,9%	4,7%	PP_Max2j	22,3%	5,2%	J_tres_humides
Suzeryl	26,3%	12,4%	J_tres_humides	26,8%	8,2%	J_tres_humides
Saint-Rémy-Geest	61,6%	5,9%	PP_Max3j	42,1%	7,2%	PP_ETP_Tot
WIHERIES	28,8%	10,3%	PP_Max3j	40,6%	4,7%	PP_ETP_Tot
CERFONTAINE	19,0%	10,7%	PP_Max1j	36,0%	7,0%	PP_ETP_Tot
TREIGNES	36,3%	4,1%	J_tres_humides	35,1%	6,5%	PP_ETP_Tot
HUCCORGNE	39,9%	5,8%	PP-ETP	43,9%	7,5%	PP_ETP_Tot
Wanze	31,8%	14,1%	PP_Max2j	36,7%	9,1%	PP_ETP_Tot
BERGILERS Amont	46,8%	10,3%	PP_Max1j	26,7%	19,5%	PP_ETP_Tot
SAUHEID	38,9%	6,3%	PP-ETP	59,2%	8,1%	PP_ETP_Tot
CHAUDFONTAINE Pisc	45,4%	7,3%	PP_Max1j	44,0%	10,1%	PP_ETP_Tot
Theux	40,6%	12,7%	PP_Max3j	44,3%	12,1%	PP_ETP_Tot
TROIS-PONTS	59,2%	5,4%	J_humides	27,6%	5,7%	J_humides
MABOMPRE	41,4%	11,8%	PP_Max2j	21,3%	5,3%	NeigeFondue_Max3j
Martelange	67,9%	4,4%	PP_Max2j	40,9%	13,9%	J_humides
SAINTE-MARIE	60,5%	3,9%	PP_Max2j	20,9%	4,3%	PP_ETP_Tot
Chantemelle	68,0%	4,6%	PP_Max2j	28,0%	5,5%	PP_ETP_Tot
Harnoncourt	59,7%	8,0%	PP_Max2j	39,1%	12,7%	Neige_Accumulee_Max
GENDRON	41,4%	6,7%	PP_Max2j	30,5%	1,2%	PP_ETP_Tot
DAVERDISSE	60,1%	9,1%	PP_Max2j	29,6%	5,4%	PP_ETP_Tot

Graide	54,8%	5,3%	PP_Max2j	51,2%	3,0%	PP_ETP_Tot
Profondeville	47,4%	17,0%	NeigeFondue_Max3j	55,1%	6,2%	PP_ETP_Tot

Lorsque l'on ajoute les données du bâti, mais que l'on ne considère alors que la période 1990-2010, on augmente les pourcentages de la variance expliquée par les deux premières composantes d'environ 10 %. Les variables du bâti ne sont positivement corrélées à la première composante que pour 4 bassins versants (Irchonwelz, Boussoit, Wanze et Profondeville) pour les maximums annuels et 8 bassins versants (Irchonwelz, Boussoit, Ronquières, Rosières, Wanze, Bergilers, Theux et Profondeville) pour le nombre de POTs par an. Pour Wanze, Rosières, Theux et Profondeville, la corrélation n'est positive qu'avec la proportion de surface bâtie de densité faible et négative avec les autres variables (proportion totale, densités moyenne et élevée).

Lorsque l'on ajoute les données agricoles, mais que l'on restreint alors la période d'analyse à 1998-2017, les pourcentages de la variance expliquée par les deux premières composantes sont augmentés d'environ 15-20 %. La troisième composante explique également plus de 8 % de la variance dans la plupart des cas. Tout comme pour l'urbanisation, cette analyse confirme que les surfaces agricoles ne font pas partie des variables explicatives principales, et que leurs relations avec les maximums annuels et le nombre de POTs par an varient assez bien d'un bassin versant à l'autre (voir corrélations dans Résultats - Surfaces agricoles).

Ces derniers points démontrent à quel point la longueur des chroniques est un enjeu tant pour ce qui concerne les données hydrologiques que pour ce qui concerne les données des variables potentiellement explicatives.

Régression mixte

Etant donné que le nombre de jours secs, le nombre de jours très secs et la température n'influencent pas directement les crues, ces variables n'ont pas été incluses dans la régression. De même, les nombres de jours humides et très humides n'ont été pris en compte que pour le nombre de POTs par an.

Les variables qui ont été retenues dans la régression pour les débits maximums annuels sont les suivantes, par ordre de significativité :

- l'indice d'humidité extrême
- le maximum des précipitations cumulées sur 3 jours
- le maximum de la neige accumulée
- l'indice de l'oscillation nord atlantique
- l'évapotranspiration totale
- le maximum des précipitations journalières

Le maximum des précipitations cumulées sur 2 jours et les autres variables représentant les précipitations neigeuses n'étaient pas significatifs lorsqu'ajoutées à ce modèle de régression.

Pour le nombre de POTs par an, les variables significatives sont :

- le nombre de jours très humides
- l'indice d'humidité extrême
- le nombre de jours humides
- le maximum des précipitations cumulées sur 3 jours (corrélé négativement)
- le maximum des précipitations cumulées sur 2 jours
- le maximum de la neige accumulée
- le maximum de la neige fondue cumulée sur 3 jours (corrélé négativement)
- le maximum de la neige fondue cumulée sur 2 jours.

L'indice de l'oscillation nord atlantique, le maximum des précipitations journalières, les précipitations neigeuses totales, le maximum de la neige fondue sur un jour et l'évapotranspiration totale n'étaient pas significatifs.

Autres analyses

Saisonnalité

Etudier la saisonnalité des crues et la comparer à la saisonnalité des paramètres responsables des crues tels que les précipitations pourrait aussi aider à comprendre les changements dans les débits et leur processus sous-jacents (Hall et al., 2014; Merz et al., 2012).

Le graphique ci-dessous représente la proportion des crues et événements pluvieux ayant eu lieu entre octobre et mars (« hiver ») sur toute la période pour laquelle les données de débits sont disponibles.

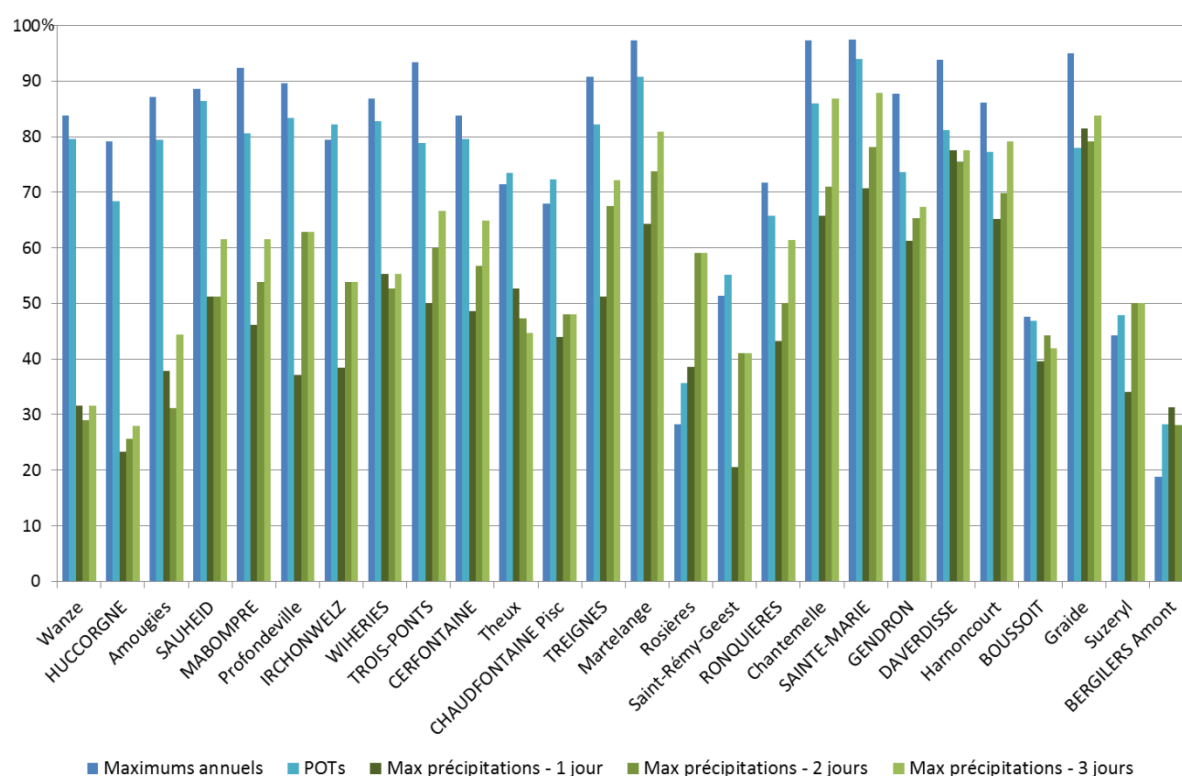


Figure 26. Pourcentage des crues et événements pluvieux ayant eu lieu entre octobre et mars, dans chaque bassin versant, sur toute la période pour laquelle les données de débits sont disponibles. Les bassins sont ordonnés par ordre décroissant de différence entre les pourcentages des crues et des précipitations.

On remarque que la majorité des bassins versants, à l'exception de Rosières, Saint-Rémy-Geest, Boussoit, Suzeryl et Bergilers, sont caractérisés par des crues hivernales. Le maximum des précipitations a également lieu en hiver pour la plupart des bassins versants mais la saisonnalité est moins forte que pour les crues. En moyenne pour tous les bassins versants, 75% des crues ont lieu en hiver, contre environ 50% pour les précipitations maximales.

On peut aussi voir sur le graphique qu'il y a une assez grande différence de saisonnalité (20% ou plus) entre les crues et les précipitations extrêmes pour plus de la moitié des bassins versants, dont ceux de l'Ourthe-Amblève-Vesdre et presque tous les bassins du nord de la région. Pour les bassins du sud de la région (Lesse, Semois), il y a une meilleure concordance de saisonnalité.

La concordance de saisonnalité est aussi en général légèrement plus grande pour les maximums des précipitations cumulées sur 3 jours : 70% en moyenne pour tous les bassins versants, contre 65% pour les maximums des précipitations journalières. Par contre, lorsqu'on compare la date des évènements avec un seuil de 10 jours d'intervalle, le pourcentage de concordance n'est plus que de 40% que ce soit pour les maximums des précipitations journalières ou des précipitations cumulées.

On a ensuite divisé les 30 dernières années en deux périodes égales et comparé leur saisonnalité (Figure 27 et Figure 28).

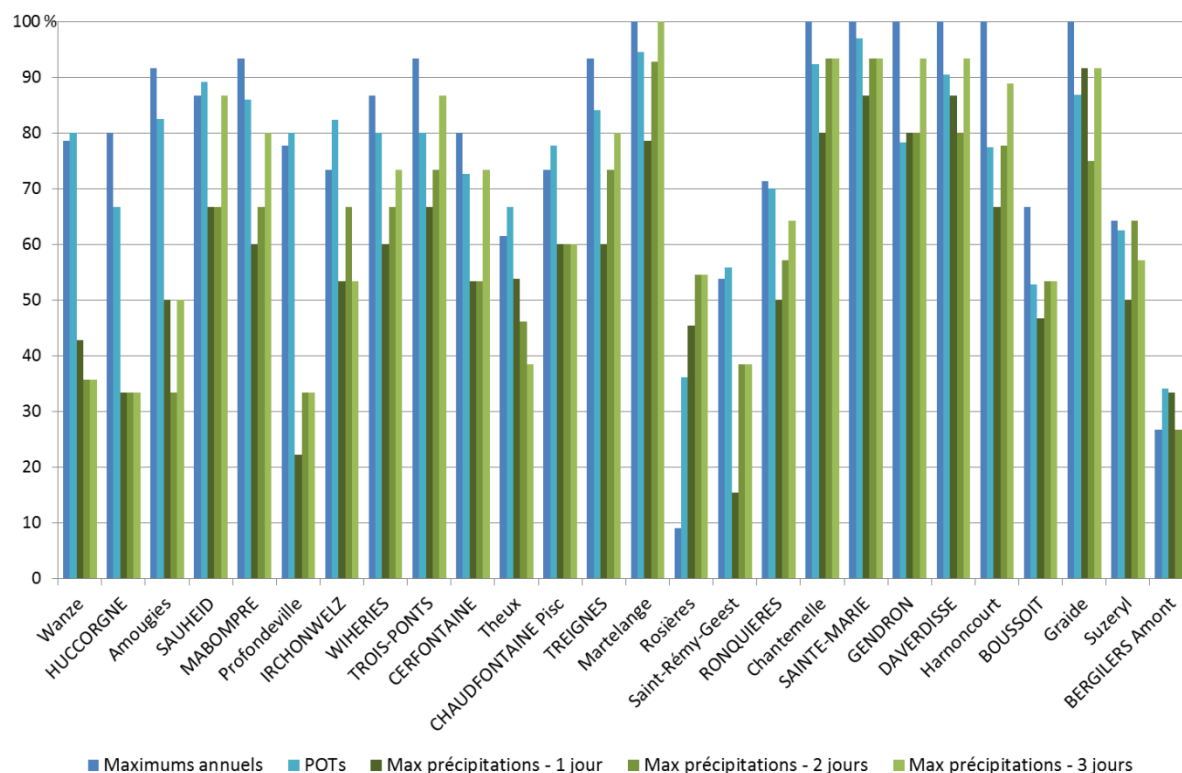


Figure 27. Pourcentage des crues et évènements pluvieux dans chaque bassin versant entre 1988 et 2002 ayant eu lieu entre octobre et mars.

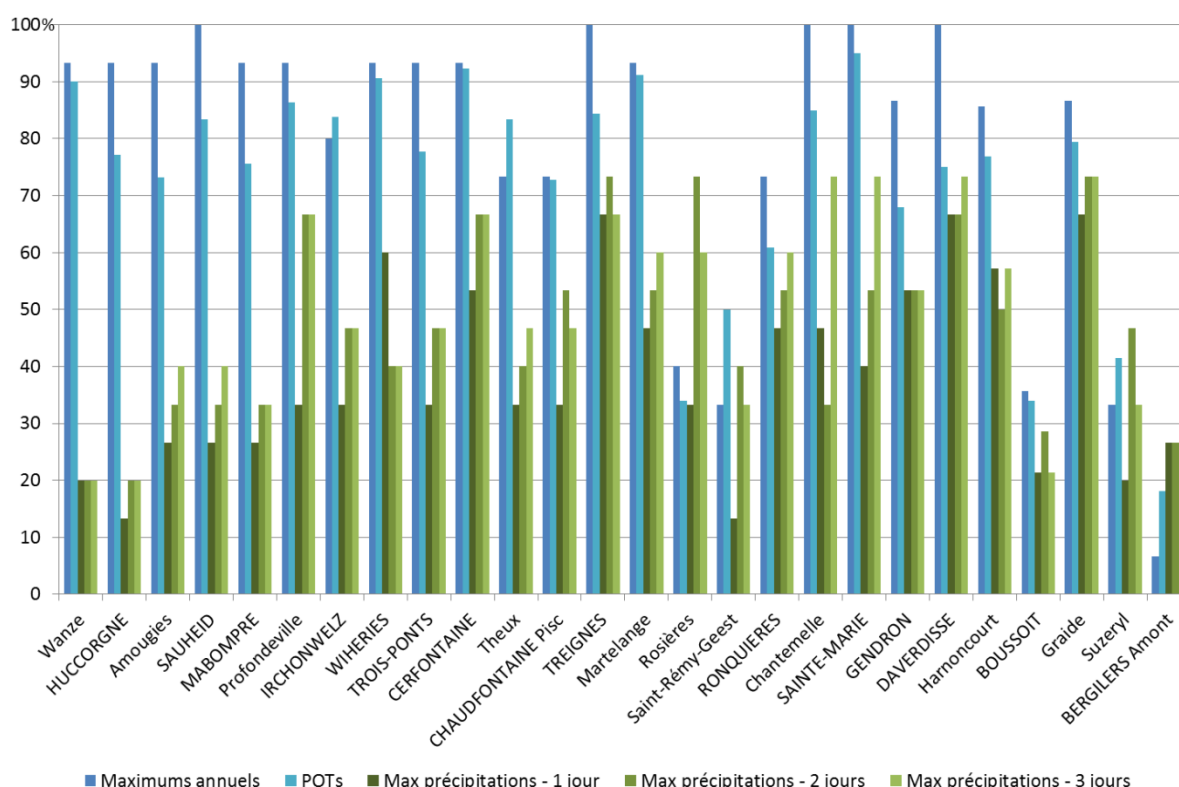


Figure 28. Pourcentage des crues et évènements pluvieux dans chaque bassin versant entre 2003 et 2017 ayant eu lieu entre octobre et mars.

On remarque une légère augmentation de la proportion des crues hivernales pour les bassins versants qui présentaient une plus grande différence de saisonnalité entre les crues et évènements pluvieux sur tout l'historique (sur la gauche du graphique), celle-ci étant plus marquée pour Cerfontaine et Rosières (seulement pour les maximums annuels). Les autres bassins versants, sur la droite du graphique, présentent plutôt une diminution de la proportion des crues hivernales, particulièrement marquée pour Saint-Rémy-Geest (uniquement pour les maximums annuels), Boussoit, Suzeryl et Bergilers. L'évolution de la saisonnalité des crues à Bergilers avait déjà été relatée dans le rapport d'HydroTrend 1.

Au niveau des précipitations, la proportion des évènements extrêmes en hiver diminue pour tous les bassins versants sauf Profondeville. Cette diminution est particulièrement élevée (-35% ou plus) pour Sauheid, Mabompré, Martelange, Chantemelle et Sainte-Marie.

Il en résulte une concordance de saisonnalité plus forte pour la période 1988-2002. L'écart de saisonnalité reste toutefois élevé pour les bassins de Wanze, Huccorgne, Amougies, Profondeville et Rosières (pour les maximums annuels uniquement).

Hypothèse de bypass de Saint-Rémy-Geest

Pour rappel, nous avons émis l'hypothèse que la station de Saint-Rémy-Geest est, depuis 2004, « bypassée » par le réseau d'assainissement qui achemine les eaux usées et de pluie vers la station d'épuration de Jodoigne située juste en aval, et que ceci pourrait en partie expliquer la diminution des débits de crue observée à cette station. Pour tenter de confirmer cette hypothèse, nous avons analysé les débits à la station d'Oorbeek située en aval de la station de Saint-Rémy-Geest et de la station d'épuration de Jodoigne. Les données ont été récoltées sur le site internet [waterinfo](http://waterinfo.fgov.be) du gouvernement flamand. Pour que l'hypothèse soit confirmée, il faudrait que les débits après 2004 à Oorbeek ne soient pas plus faibles que les débits des années antérieures, ce qui engendrerait une absence de tendance.

Tout comme à Saint-Rémy-Geest, on observe, à Oorbeek, une tendance négative dans les trois indicateurs, mais cette tendance est moins forte et donc non significative, comme on peut le voir sur les graphiques ci-dessous pour les maximums annuels.

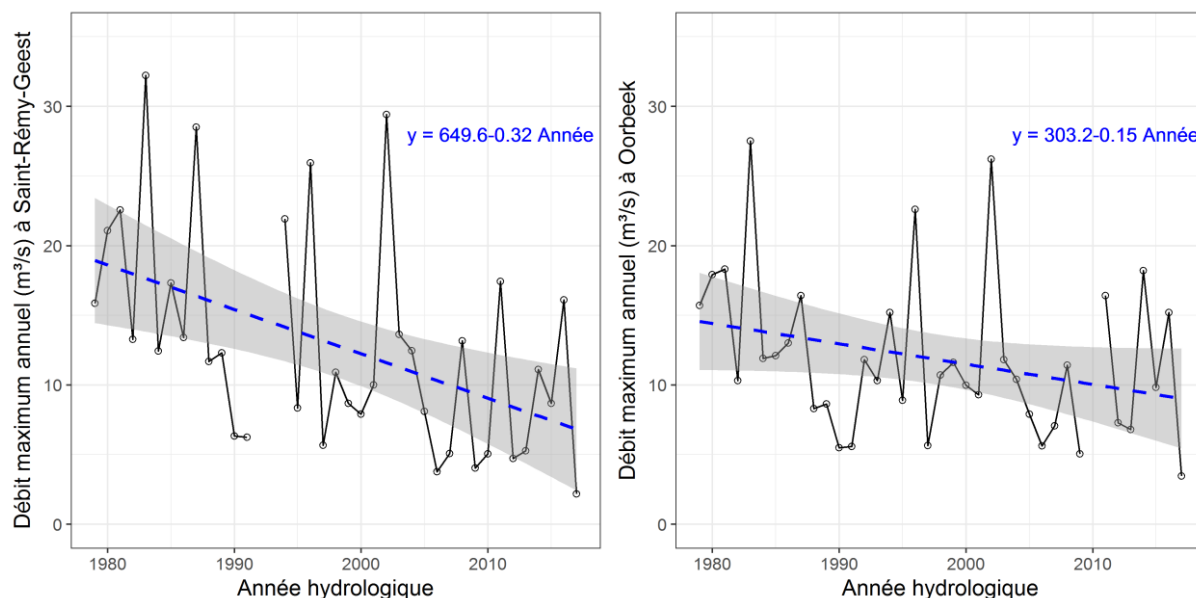


Figure 29. Débits maximums annuels entre 1979 et 2017 et leur tendance pour les stations de mesure de Saint-Rémy-Geest (gauche) et Oorbeek (droite) sur la Gette.

Les débits à Oorbeek sont plus faibles après 2004 mais la différence avec les débits antécédents est moins marquée qu'à Saint-Rémy-Geest. On remarque aussi que les débits à Oorbeek sont généralement plus faibles que ceux de Saint-Rémy-Geest avant 2004 mais similaires après 2004. Le fait que ces débits soient plus faibles en aval peut être expliqué par l'existence de bassins d'orage entre les deux stations ; ceci devra cependant être vérifié. On en conclut que la mise en opération du réseau d'assainissement a probablement contribué à la diminution des débits à Saint-Rémy-Geest mais que ce n'est pas l'unique facteur.

Ajout de données en utilisant les données journalières

Suite à la présentation des résultats du projet HydroTrend 1, il avait été suggéré d'évaluer la possibilité d'utiliser les données historiques de débits journaliers afin d'allonger l'historique de certaines stations. Ces données historiques proviennent en fait d'une lecture de hauteur d'eau sur les échelles limnimétriques tous les jours à 8h. Nous avons donc également sélectionné les débits à 8h dans les données horaires plus récentes. Nous avons ensuite extrait les maximums annuels et les POTs sur tout l'historique puis refait les analyses de tendance. Ceci a été effectué pour deux stations : Latour sur la Vire (L6030) et Athus sur la Messancy (L6020-6022).

Pour la station de Latour sur la Vire, le passage aux données journalières a permis d'ajouter 13 ans de données, passant de 34 à 47 ans (voir hydrogramme ci-dessous). Après avoir analysé ces données, on conclut qu'il n'y a pas de tendance pour l'amplitude des maximums annuels et des POTs alors qu'une tendance négative non significative avait été détectée sur l'historique plus court. Cependant, une tendance légèrement positive non significative a été détectée pour la fréquence alors qu'aucune tendance n'était visible sur l'historique plus court (Figure 30 et Figure 31). En moyenne, les débits journaliers sont 19% plus faibles que les débits horaires. Il y a donc une perte de précision non négligeable en passant au pas de temps journalier.

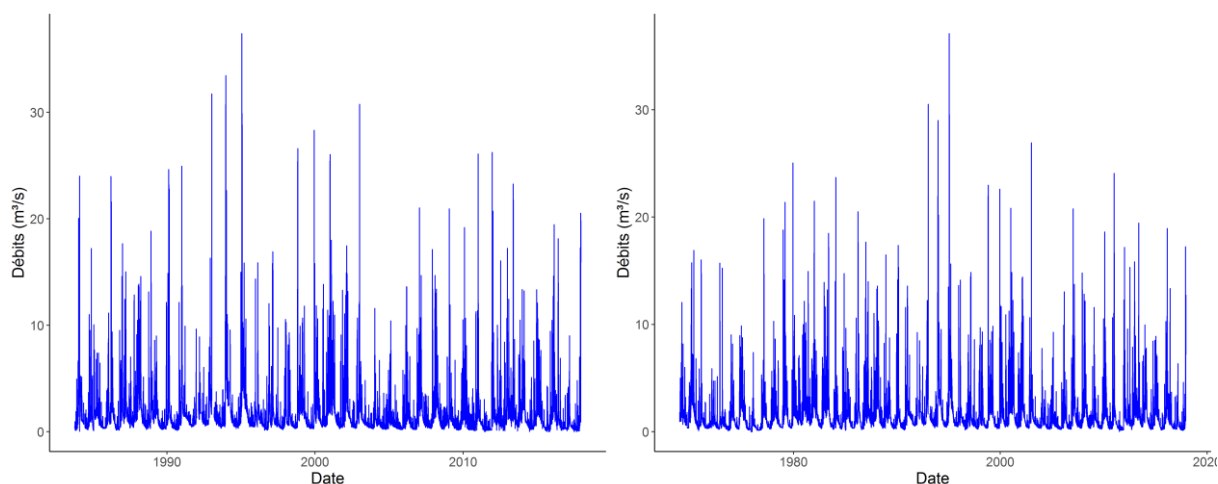


Figure 30. Hydrogramme des débits journaliers à la station de Latour sur la Vire, sans les données historiques à gauche et avec celles-ci à droite.

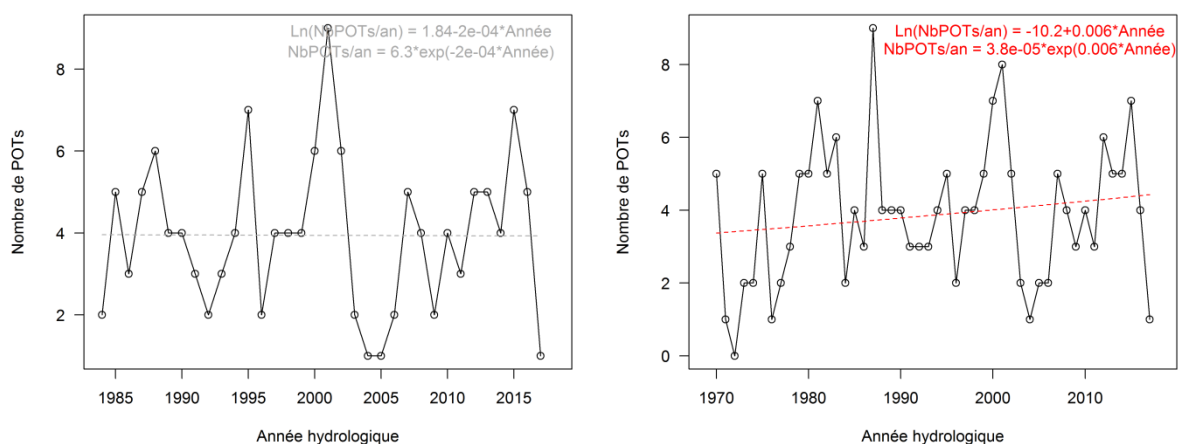


Figure 31. Evolution du nombre de POTs par an à la station de Latour sur la Vire, sans les données historiques à gauche et avec celles-ci à droite.

Cependant, pour la station d'Athus sur la Messancy, les débits journaliers sont en moyenne 51% plus faibles et la date de nombreux maximums annuels diffère selon que l'on utilise les débits journaliers ou horaires. Pour cette station, l'utilisation des débits journaliers a permis d'ajouter 6 ans de données, l'historique passant de 30 à 36 ans. Une tendance négative non significative est détectée dans l'amplitude des maximums annuels alors qu'aucune tendance n'était visible sur l'historique plus court. Etant donné la grande sous-estimation des débits en utilisant le pas de temps journalier, il est difficile de conclure si la détection de cette tendance est due à l'allongement de la série de données ou au fait que les débits soient plus faibles (notamment la crue de 2011).

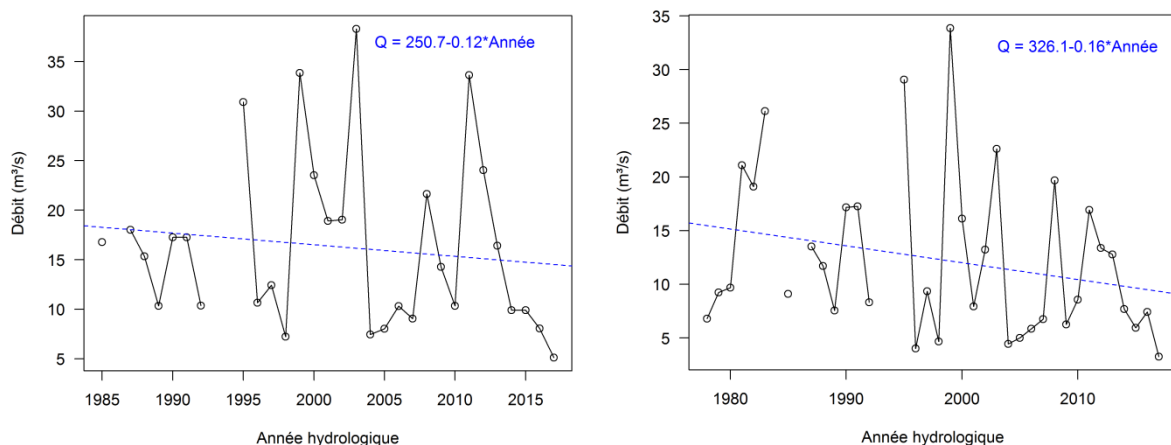


Figure 32. Evolution des débits maximums annuels à la station d'Athus sur la Messancy, sans les données historiques à gauche et avec celles-ci à droite.

Nous avons également fait le test d'égalité des moyennes entre les maximums annuels obtenus à partir des données horaires et les maximums annuels obtenus à partir des données à 8h. L'égalité des moyennes n'a pas été rejetée pour Latour (p-valeur de 0,095) mais bien pour Athus (p-valeur de 0,011), ce qui confirme que les données journalières peuvent être utilisées pour la station de Latour mais que les maximums annuels à Athus sont trop différents selon que l'on utilise les données horaires ou journalières. L'égalité des moyennes du nombre de POTs par an a également été testée et non rejetée pour Latour (p-valeur de 0,945). Celle des POTs a par contre été rejetée (p-valeur de $3,95 \cdot 10^{-6}$).

Données horaires de précipitations

Certains bassins versants, notamment dans le bassin versant de l'Escaut, réagissent plus vite aux pluies et sont donc plus sensibles aux pluies intenses qu'à une lente accumulation des pluies sur plusieurs jours. Pour ces bassins versants et en particulier ceux de Rosières, Ronquières, Amougies et Boussoit, nous avons analysé les tendances dans les précipitations horaires et leur corrélation avec l'augmentation des débits de crue.

Pour cela, nous avons obtenu, auprès de l'Institut Royal Météorologique (IRM), les données horaires de précipitations pour la station d'Uccle pour la période 1973-2018. Nous avons ensuite converti les données journalières des 4 bassins versants ci-dessus en données horaires en les multipliant par le rapport des quantités horaires sur les quantités journalières pour Uccle.

Nous avons analysé l'évolution des maximums, par année hydrologique, des précipitations horaires mais aussi des précipitations cumulées sur 2h, 6h, 12h et 24h, ainsi qu'extrait et analysé les POTs et le nombre de POTs par année. Le tableau ci-dessous présente les résultats de ces analyses ainsi que des analyses de corrélation. Il contient également les résultats des analyses faites précédemment sur les maximums des précipitations journalières.

Tableau 7. Résultats des analyses de détection de tendance dans les précipitations horaires (TS = tendance positive significative) et de leur corrélation avec les débits de crue (C = corrélation significative avec les maximums annuels des débits ou les POTs respectivement).

	Uccle	Rosières	Ronquières	Amougies	Boussoit
MA - 1 jour	/	C	C	TS + C	TS + C
MA - 1h	TS	TS + C	TS	TS	TS + C
MA - 2h	TS	TS + C	TS	TS	TS + C
MA - 6h	TS	C		TS + C	TS + C

MA - 12h	C		TS + C		TS + C
MA - 24h	C		TS + C		C
POTs	TS		TS		TS
Nb POTs/an	TS	C	TS	TS + C	C

Nous observons que les tendances dans les maximums annuels des précipitations horaires et cumulées sur 2 heures sont positives et significatives pour la station d'Uccle et les 4 bassins versants étudiés. Le graphique ci-dessous montre cette tendance pour les précipitations horaires à Uccle. On constate que le maximum des précipitations sur une heure à Uccle augmente de 0,17 mm par an en moyenne, ce qui fait une augmentation d'environ 7,5 mm sur les 45 ans (entre 1973 et 2018).

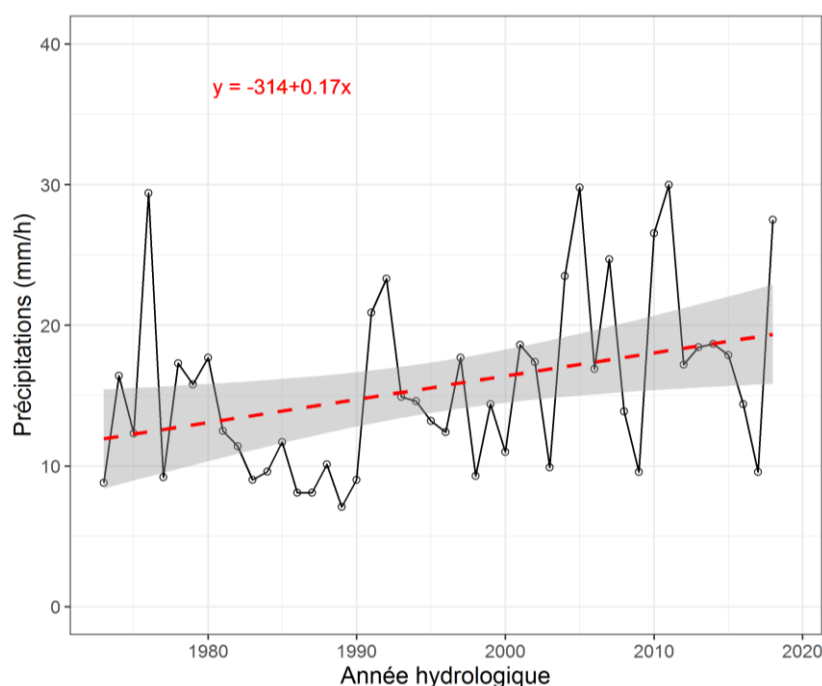


Figure 33. Evolution des maximums annuels des précipitations horaires à Uccle entre 1973 et 2018.

Ces résultats montrent donc une augmentation de l'intensité des pluies et de la fréquence des événements de pluies intenses, et confirment qu'il est important de tenir compte des précipitations horaires pour certains bassins versants, et en particulier Rosières.

Discussion

D'un point de vue climatique, les changements sont assez évidents. Tout d'abord, on observe une augmentation de la température pour tous les bassins versants, à laquelle l'augmentation de l'évapotranspiration est logiquement corrélée. La température influence également la capacité de l'air à contenir de l'eau, et une augmentation de la température engendrerait donc une augmentation des précipitations. On observe en effet une augmentation des cumuls de précipitations mais elle est limitée à certains endroits. Les intensités ne sont pas disponibles partout en Wallonie, mais les données d'Uccle présentent une tendance à l'augmentation nette. Par contre, l'augmentation de la température en hiver, couplée à un indice de l'oscillation nord atlantique plus positif, entraîne une diminution des précipitations neigeuses pour presque tous les bassins versants. Ceci révèle déjà la complexité des phénomènes météorologiques en jeu et de leurs interactions. L'évapotranspiration et les précipitations ont, par exemple, des effets opposés sur l'humidité du sol. Or celle-ci est un facteur important dans la production des crues puisqu'elle influence le ratio

infiltration-ruissellement. Si ces effets opposés conduisent à une stabilité de l'humidité du sol au fil des années, ceci pourrait peut-être expliquer que les changements dans les débits de crue étaient non significatifs pour la majorité des stations (68 stations sur 84).

Les précipitations n'augmentent cependant que dans les régions de la Lesse et de l'Escaut. Elles diminuent dans le sud de la région et pour les bassins de l'Ourthe, Amblève et Vesdre, tout comme le nombre de jours humides. Plus précisément, c'est le maximum annuel des précipitations journalières et/ou horaires qui augmente alors que c'est plutôt le maximum annuel des cumuls sur 3 jours qui diminue. Une hypothèse serait que l'intensité des précipitations a augmenté à certains endroits, mais pas leur volume total sur plusieurs jours ; ce dernier ayant même diminué à d'autres endroits.

Quant aux précipitations neigeuses, bien que leur diminution soit généralisée à l'ensemble des bassins versants, il est normal que cela ne se reflète pas partout dans les débits de crue étant donné que la fonte des neiges n'est pas un facteur de génération des crues partout en Wallonie. Des événements pluvieux longs et/ou intenses sont le plus souvent à l'origine des plus grandes crues annuelles en Wallonie.

Nous avons également constaté que la longueur de l'historique des données influence la significativité et parfois même le signe de certaines tendances. Pour les précipitations en particulier, aucune tendance négative n'est significative lorsque l'on tient compte des données depuis 1962 plutôt que des données correspondantes à l'historique des débits. Nous pouvons émettre deux hypothèses : soit les tendances sont plus récentes et seront d'avantage marquées dans le futur, soit les précipitations sont liées aux circulations atmosphériques telle que l'ONA et suivent donc une oscillation pluridécennale, comme suggéré par Willems (2013).

En ce qui concerne les relations entre ces variables climatiques et les débits de crue, très peu de corrélations significatives ont été observées, sauf pour les précipitations et l'indice d'humidité extrême (cumul annuel des différences journalières entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle). Les analyses globales (PLS et régression mixte) nous permettent d'ailleurs de conclure que ces deux variables sont celles qui expliquent le plus la variabilité de l'amplitude et de la fréquence des crues. Il faut toutefois rappeler que les corrélations n'impliquent pas nécessairement des relations de cause à effet ; certaines corrélations observées étaient d'ailleurs contraires aux processus physiques. La causalité ne peut être déterminée que par l'analyse des processus physiques via, par exemple, la modélisation hydrologique.

L'analyse de saisonnalité des crues et des précipitations extrêmes a démontré que, même si les précipitations est le facteur qui influence le plus les crues, les crues ne sont pas toutes liées aux événements pluvieux extrêmes, leur saisonnalité étant différente. Il a également été observé que la concordance de saisonnalité est plus faible pour la période 2003-2017 que pour 1988-2002. La comparaison de ces deux périodes a aussi montré une augmentation ou diminution des crues hivernales selon le bassin versant, et une diminution des précipitations extrêmes hivernales, particulièrement forte pour Sauheid, Mabompré, Martelange, Chantemelle et Sainte-Marie. Il ne semble cependant pas y avoir de lien entre l'évolution de la saisonnalité des crues et l'évolution de leur amplitude ou fréquence. Il faut toutefois être prudent et ne pas établir de conclusions hâtives concernant l'évolution de saisonnalité des crues et précipitations extrêmes, étant donné la longueur limitée des périodes considérées pour la comparaison (15 ans). Des tendances négatives significatives dans les maximums des précipitations hivernales des séries de données complètes ont toutefois été détectées pour les bassins versants cités plus haut. De plus, ces bassins sont ceux où une tendance négative significative dans les précipitations avait été détectée. On peut donc supposer que la diminution des précipitations dans ces bassins est essentiellement due à la diminution des précipitations hivernales.

Du point de vue de l'occupation du sol, l'historique des données est plus court (environ 20 ans), ce qui limite les analyses, en particulier l'analyse des relations avec les débits. Des changements ont toutefois été détectés. Les surfaces bâties sont en hausse partout mais plus fortement dans les

bassins versants les plus urbanisés, dans le nord de la région, où l'on observe aussi une densification de l'habitat en plus de son expansion. Pour les types de cultures, on observe, dans les bassins versants les plus agricoles, de nouveau principalement dans le nord de la région, une diminution des surfaces agricoles à risque de ruissellement nul (essentiellement des prairies) au profit des surfaces agricoles à risques de ruissellement faible et très élevé. Il y a cependant quelques exceptions telles qu'Amougies et Irchonwelz où les surfaces agricoles à risque de ruissellement très élevé diminuent. Il est toutefois difficile de faire le lien avec les évolutions dans les débits de crue car l'augmentation significative des surfaces plus à risque de ruissellement n'intervient pas nécessairement dans les bassins versants où une tendance positive dans les débits de crue avait été détectée. Nous pouvons en déduire que l'influence des changements d'occupation du sol sur les débits de crue est plus faible que celle des changements climatiques.

Enfin, l'exemple de Saint-Rémy-Geest montre que d'autres facteurs tels que l'installation du réseau d'assainissement peuvent également influencer l'évolution des débits de crue.

Modélisation hydrologique

Introduction

Le but de la modélisation hydrologique est de tenter de mieux comprendre les processus physiques à l'origine des tendances.

Le modèle utilisé est GR4J. C'est un modèle pluie-débit de type conceptuel et global, développé par l'Inra (Institut national français de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement). C'est un modèle conceptuel car le fonctionnement hydrologique du bassin versant y est représenté de façon simplifiée (évapotranspiration, ruissellement, pertes souterraines), il ne tient pas compte des caractéristiques physiques du bassin. Il intègre les processus hydrologiques sur les trois dimensions spatiales du bassin versant pour calculer un débit à son exutoire ; son échelle est celle du bassin versant, et c'est donc un modèle à une dimension, non spatialisé, d'où le terme « global ». Il est aussi appelé modèle à réservoirs, car le bassin versant est représenté comme un ensemble de réservoirs interconnectés dont le fonctionnement est décrit par des équations de bilan et des lois de vidange, souvent empiriques. Il est composé d'un module de production et d'un module de transfert, qui assurent respectivement les bilans en eau (rapport stockage/évapotranspiration/écoulements) et la dynamique temporelle des écoulements sur le bassin (voir Figure 34).

Il est décrit par 4 paramètres : le volume du réservoir de production (X_1 , en mm/jour), le coefficient d'échanges souterrains (X_2 , en mm) qui a une valeur positive dans le cas d'un gain et négative pour une perte, la capacité à un jour du réservoir de routage (X_3 , en mm), et le temps de base de l'hydrogramme unitaire (X_4 , en jours) définissant le délai entre la précipitation d'une goutte d'eau sur le bassin considéré et son arrivée à l'exutoire.

Il existe également un module supplémentaire pour tenir compte du couvert neigeux sur le bassin et de sa fonte : CemaNeige. Celui-ci comporte 2 paramètres : le facteur degré-jour (mm/°C.jour), lié à la vitesse de fonte de la neige et donc fonction directe de la température, et le coefficient de pondération de l'état thermique du manteau neigeux (adimensionnel), lié à l'énergie nécessaire pour faire fondre la neige du manteau et donc à sa température. Afin de tenir compte des différences d'évolution du manteau neigeux en fonction de l'altitude, le bassin versant est discrétisé en 5 zones altitudinales d'égales surfaces. Les données d'entrée sont ensuite extrapolées à chaque bande d'altitude.

Les données d'entrée du modèle sont les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et les débits, le tout au pas de temps journalier. La température moyenne doit aussi être fournie lorsque CemaNeige est utilisé.

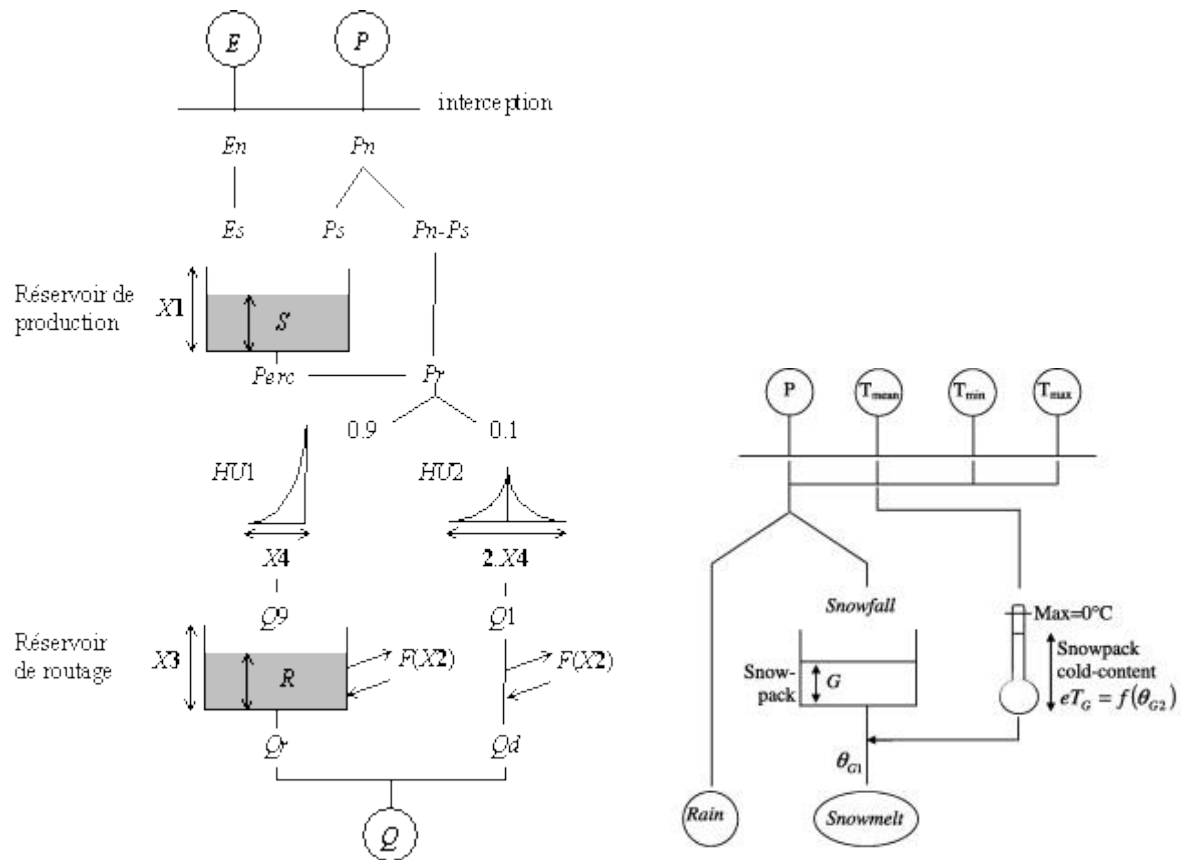


Figure 34. Schémas du modèle GR4J et du module CemaNeige (Sources : (Perrin, 2020) et (Valéry et al., 2014))

Le modèle GR4J peut être exécuté sur Excel ou sur R (Perrin, 2020). Il existe deux packages R : airGR, l'original, et airGRteaching, version simplifiée de airGR conçue principalement pour l'enseignement (requiert peu de connaissance en programmation). Nous avons utilisé le package airGR.

Sélection des bassins versants

Les bassins versants à modéliser ont été sélectionnés selon les critères suivants :

- Absence d'influences humaines : rectification du cours d'eau, transferts d'eau vers/depuis d'autres cours d'eau, barrages
➔ Élimination d'Amougies, Boussoit, Ronquières, Chaudfontaine, et Treignes
- Priorité aux bassins versants où une tendance significative dans les débits a été détectée.
➔ Élimination d'Irchonwelz, Suzeryl, Wihéries, Treignes, Bergilers, Trois-Ponts, Martelange, Gendron, Graide, et Profondeville
- Priorité aux bassins versants où les tendances dans les différents facteurs (climatiques et d'occupation du sol) ont une influence opposée sur les débits, afin de pouvoir les discerner.
➔ Élimination de Rosières, Cerfontaine, Harnoncourt
- Pas de redondance au niveau des facteurs étudiés. Si plusieurs bassins versants montrent des tendances dans les mêmes facteurs, seul un de ces bassins sera sélectionné, sauf si on suspecte d'autres influences humaines. En effet, celles-ci pourront être confirmées/rejetées en comparant

les résultats des deux bassins versants. C'est le cas de Sauheid et Mabompré. Pour s'assurer que les barrages sur l'Ourthe et ses affluents avaient peu d'influence sur les débits à Sauheid (vu la distance élevée entre la station et ces barrages), nous avons également sélectionné Mabompré, située en amont des barrages. Etant donné leur différence de superficie (2915 km² pour Sauheid et 320 km² pour Mabompré), comparer ces deux bassins versants permettra également d'étudier l'influence de la taille du bassin. De plus, Mabompré est le seul bassin versant où la tendance « à long terme » dans les précipitations neigeuses n'est pas significative.

➔ Élimination d'Huccorgne, Theux, Chantemelle

Les bassins sélectionnés sont donc Daverdisse, Sauheid, Mabompré, Sainte-Marie, Wanze et Saint-Rémy-Geest. Les tableaux ci-dessous reprennent les caractéristiques de ces bassins versants ainsi que les tendances observées dans les différents facteurs analysés.

Tableau 8. Caractéristiques des bassins versants sélectionnés pour la modélisation.

	Daverdisse	Sauheid	Mabompré	Sainte-Marie	Wanze	Saint-Rémy-Geest
Cours d'eau	Lesse	Ourthe	Ourthe orientale	Semois	Mehaigne	Grande Gette
Superficie du BV	302 km ²	2915 km ²	320 km ²	143 km ²	353 km ²	142 km ²
Occupation du sol	■ Surf bâties de densité élevée ■ Surf bâties de densité moyenne ■ Surf bâties de densité faible ■ Surf agricole à risque très élevé ■ Surf agricole à risque élevé ■ Surf agricole à risque moyen ■ Surf agricole à risque faible ■ Surf agricole à risque nul ■ Autres surf agricoles ■ Surf forestières ■ Autres ■ Pas de données					
Saisonnalité (% des évènements en hiver)	Q : 94% MA et 81% POTs P : 78% MA 1j	Q : 89% MA et 86% POTs P : 51% MA 1j (62% pour MA cumul 3j)	Q : 92% MA et 81% POTs P : 46% MA 1j (62% pour MA cumul 3j)	Q : 97% MA et 94% POTs P : 71% MA 1j (88% pour MA cumul 3j)	Q : 84% MA et 80% POTs P : 32% MA	Q : 51% MA et 55% POTs P : 21% MA 1j (41% pour MA cumul 3j)

Tableau 9. Rappel des tendances dans les différents facteurs pour les bassins versants sélectionnés pour la modélisation.

	Daverdisse	Sauheid	Mabompré	Sainte-Marie	Wanze	Saint-Rémy-Geest
Débits	MA : Positive significative POTs : Positive non significative Nb POTs : Positive non significative	MA : Négative significative POTs : Négative non significative Nb POTs : Négative non significative	MA : Négative significative POTs : Négative significative Nb POTs : Pas de tendance	MA : Négative non significative POTs : Pas de tendance Nb POTs : Négative significative	MA : Négative significative POTs : Pas de tendance Nb POTs : Négative significative	MA : Négative significative POTs : Négative non significative Nb POTs : Négative significative
Précipitations	1969-2017 : Positive significative (MA 1j) 1962-2017 : Positive significative (MA 1j et cumul 2j)	1979-2017 : Négatives significatives (MA cumul 3j) 1962-2017 : Négatives non significatives	1979-2017 : Négative significative (MA cumul 3j) 1962-2017 : Négatives non significatives	1977-2017 : Négative significative (MA cumul 3j) 1962-2017 : Pas de tendance	Négatives non significatives	Négatives non significatives
Neige	Négatives significatives	Négatives significatives (Neige tombée et neige accumulée)	Négatives non significatives	Négatives significatives	1979-2017 : Négatives non significatives 1962-2017 : Négative significative (Total annuel)	1978-2017 : Négatives non significatives 1962-2017 : Négatives significatives
ETP	1969-2017 : Positive non significative 1962-2017 : Positive significative	Positive non significative	Positive non significative	Positive non significative	Positive significative	Positive significative
Surfaces bâties (1990-2010)	Positive significative (+1,1%)	Positive significative (+1,6%)	Positive significative (+1,3%)	Positive significative (<u>+2,4%</u>)	Positive significative (+1,8%)	Positive significative (+2%)

	Daverdisse	Sauheid	Mabompré	Sainte-Marie	Wanze	Saint-Rémy-Geest
Surfaces agricoles (1998-2017)	Risque de ruissellement très élevé: Positive significative (+1,8%) Risque faible : Positive significative (+0,8%)	Risque de ruissellement très élevé: Positive significative (+0,6%) Risque faible : Positive significative (+0,9%)	Risque de ruissellement très élevé: Positive significative (+0,6%) Risque faible : Positive significative (+1,1%)	Risque de ruissellement moyen: Négative significative (-0,4%) Risque faible : Positive significative (+0,4%)	Risque de ruissellement très élevé: Positive significative (+6,2%) Risque moyen : Négative significative (-0,4%) Risque nul : Négative significative (-1,5%)	Risque de ruissellement très élevé: Positive significative (+4,3%) Risque moyen : Négative significative (-1%) Risque nul : Négative significative (-1,6%)
Influences humaines	/	En aval de plusieurs barrages	/	/	Écrêtement naturel par des ponts entre Ambresin et Wanze STEP d'Amay (mise en service en 2013)	STEP de Jodoigne (mise en service en 2004) ZIT de Jodoigne (opérationnelle depuis 2016)

Pour les 3 premiers bassins versants, le modèle devrait pouvoir reproduire les débits observés étant donné que seuls les changements dans les facteurs climatiques sont significatifs. Pour les 3 autres bassins, on s'attend à voir une différence entre les débits simulés et observés qu'on pourrait alors attribuer aux changements dans l'occupation du sol. En outre, les changements d'occupation du sol observés pour ces bassins engendreraient une augmentation du ruissellement. Les débits simulés devraient donc diminuer, sous l'effet des changements climatiques (diminution des précipitations ou augmentation de l'ETP), mais de façon plus importante que les débits observés étant donné que l'augmentation du ruissellement ne peut être représentée dans le modèle. Les différentes influences humaines devront également être prises en compte dans l'analyse des résultats de la modélisation.

Paramètres de la modélisation

Pour chaque bassin versant, le modèle a d'abord été calibré sur une période de 10 ans (en général, les 10 premières années) puis validé sur le reste des données. Le modèle a également été exécuté sur la série complète de données (« simulation »). La période de calibration doit comprendre au minimum une année plus sèche, une année plus humide et une année moyenne.

Nous avons choisi le critère KGE (Kling-Gupta efficiency) comme fonction objective. Le KGE est une version améliorée du Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), plus connu. Il a été développé car le NSE induit une sous-estimation de la variabilité des débits. Le KGE a tout de même tendance à sous-estimer les hauts débits et surestimer les bas débits, mais pas autant que le NSE. Ces critères sont les plus appropriés pour la modélisation des crues car ils donnent plus d'importance aux hauts débits par rapport aux bas débits (Gupta et al., 2009; Krause et al., 2005; Pushpalatha et al., 2012).

Pour évaluer la calibration, la validation et la simulation, nous avons utilisé les indices de performance NSE et KGE.

Le NSE se calcule comme suit :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Qsim_t - Qobs_t)^2}{\sum_{t=1}^n (Qobs_t - \overline{Qobs})^2}$$

Cet indice permet d'évaluer la performance du modèle en comparant la qualité de l'ajustement à la variance des données observées. Il peut prendre des valeurs variant entre $-\infty$ et 1, 1 indiquant que les débits simulés sont égaux aux débits observés (Nash and Sutcliffe, 1970).

La formule du KGE est :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

avec r = coefficient de corrélation linéaire entre $Qsim$ et $Qobs$, $\alpha = \sigma_{sim}/\sigma_{obs}$ (σ = écart-type), et $\beta = \mu_{sim}/\mu_{obs}$ (μ = moyenne) (Gupta et al., 2009).

L'un des principaux avantages de KGE est qu'il peut être décomposé en 3 parties pour analyser séparément la capacité du modèle à reproduire la moyenne des débits, leur variance et leur dynamique temporelle (corrélation).

Résultats

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous puis détaillés, par bassin versant, dans les paragraphes suivants.

Tableau 10. Synthèse des résultats de la modélisation.

Nom du bassin versant	Tendances observées	Facteur(s) explicatif(s) pris en compte par le modèle	Résultats de la modélisation
DAVERDISSE	précipitations (pluie) ↑ précipitations (neige) ↓ ETP ↑ (à long terme)	↑ précipitations (pluie)	Facteur explicatif confirmé par la modélisation
SAUHEID	précipitations (pluie et neige) ↓	↓ précipitations (pluie et neige)	Facteur explicatif confirmé par la modélisation
MABOMPRE	↓ précipitations (pluie)	↓ précipitations (pluie)	Facteur explicatif confirmé mais non suffisant, apport supplémentaire probable de changements d'occupation du sol
SAINTE-MARIE	précipitations (pluie et neige) ↓ surfaces bâties ↑ (+2,4%)	↓ précipitations (pluie et neige)	Facteur explicatif confirmé mais non suffisant, apport supplémentaire probable de changements d'occupation du sol
Wanze	ETP ↑ précipitations (neige) ↓ (à long terme) surfaces bâties ↑ (+1,8%) surfaces agricoles à risque de ruissellement très élevé ↑ (+ 6,2%)	↑ ETP	Facteur explicatif confirmé par la modélisation, pas d'influence visible de l'occupation du sol
Saint-Rémy-Geest	ETP ↑ précipitations (neige) ↓ (à long terme) surfaces bâties ↑ (+2%) surfaces agricoles à risque de ruissellement très élevé ↑ (+ 4,3%)	↑ ETP	Facteur explicatif confirmé mais non suffisant, apport supplémentaire probable de changements d'occupation du sol

Daverdisse

La calibration du modèle sur les 10 premières années engendre une sous-estimation des hauts débits. Nous avons donc choisi de calibrer le modèle sur une période incluant les pics de crues les plus élevés : 1987-1996. Nous avons également testé la calibration avec le module CemaNeige, et même si les indices de performance étaient légèrement supérieurs (Tableau 11), les débits de crue n'étaient pas toujours mieux estimés (Figure 36).

On peut voir sur l'hydrogramme ci-dessous (Figure 35) que les débits simulés sont très proches des débits observés. Les valeurs des indices de performance sont d'ailleurs élevées, un NSE supérieur à 0,75 indiquant une très bonne performance (D. N. Moriasi et al., 2007). Les maximums annuels sont également très bien estimés (Figure 36) ; seuls 1976 et 2011, années exceptionnelles, ont des erreurs relatives plus élevées (voir Figure 37). L'année 1976 (pic surestimé) a en effet été très sèche et la

crue de 2011 (pic sous-estimé) est le résultat d'intenses précipitations couplées à la fonte des neiges (ce pic est d'ailleurs moins sous-estimé avec CemaNeige).

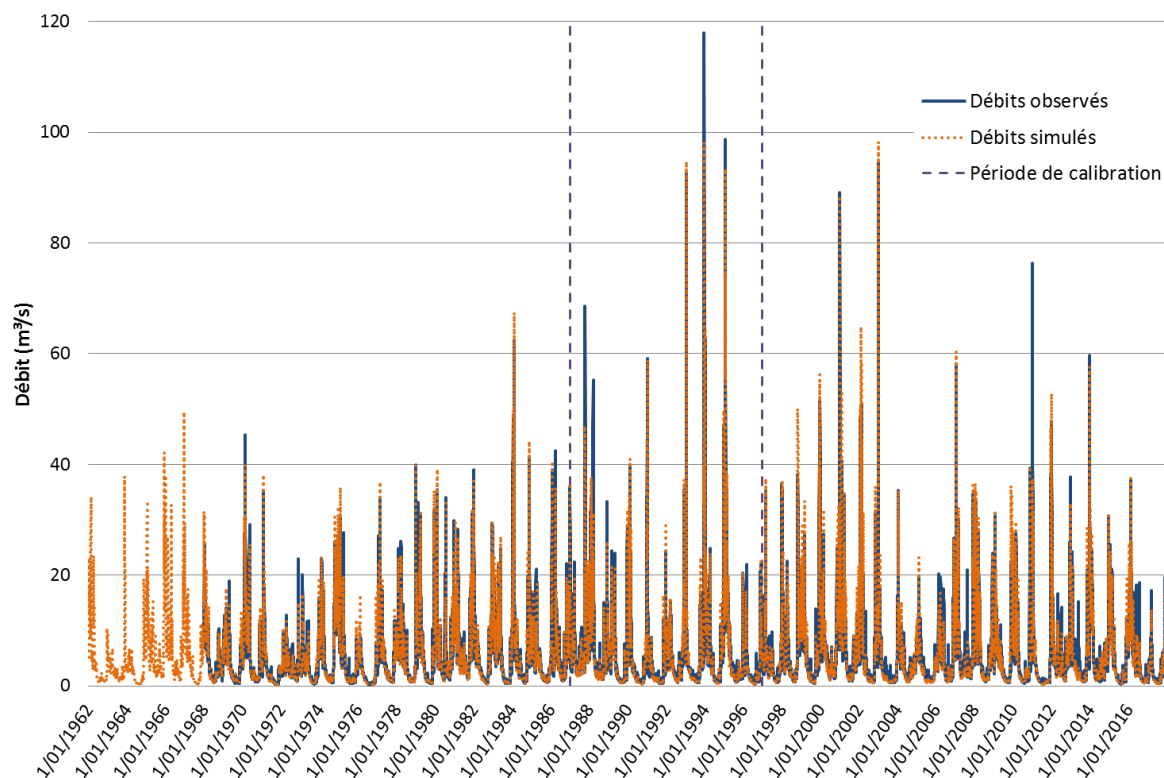


Figure 35. Hydrogrammes observés et simulés à Daverdisse.

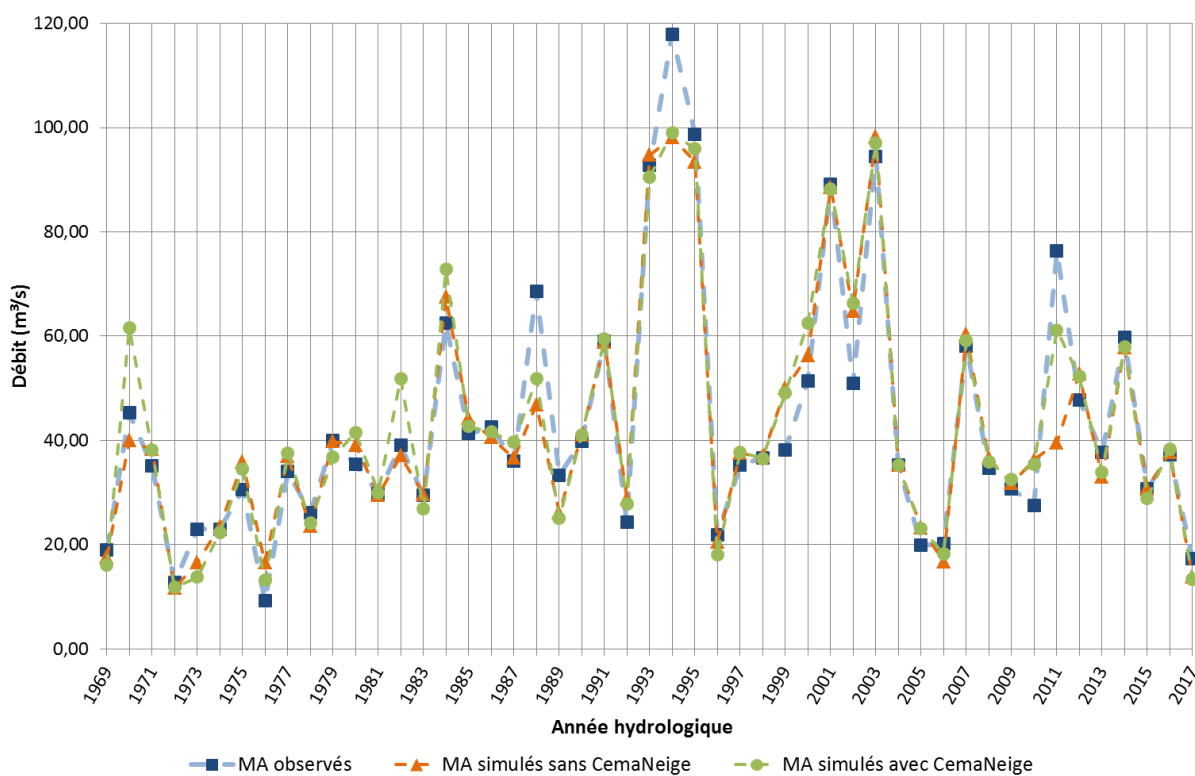


Figure 36. Maximums annuels observés et simulés avec et sans CemaNeige à Daverdisse.

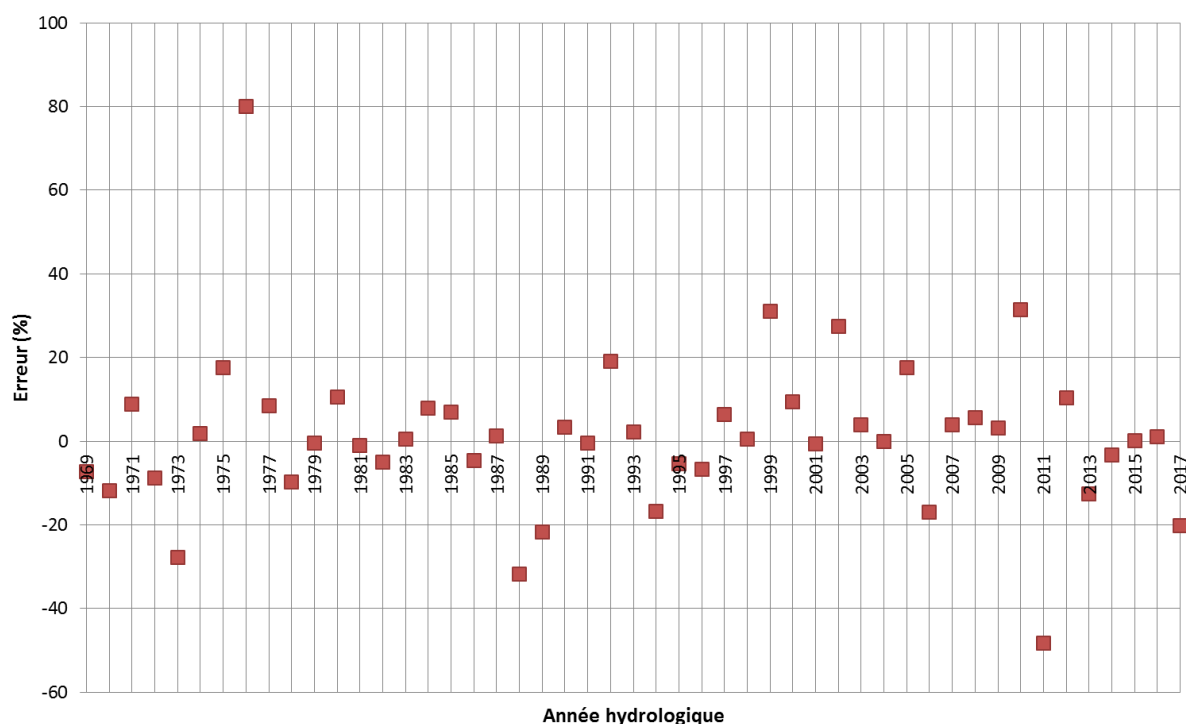


Figure 37. Erreur relative entre les maximums annuels simulés et observés à Daverdisse.

Tableau 11. Indices de performance pour les différents tests de modélisation du bassin versant de Daverdisse.

	Période	Sans CemaNeige		Avec CemaNeige	
		NSE	KGE	NSE	KGE
Calibration	1987-1996	0,938	0,969	0,958	0,979
Validation	1968-1986 + 1997-2017	0,881	0,928	0,906	0,932
Simulation	1962-2017	0,899	0,942	0,922	0,948
Calibration	1968-1977	0,876	0,937	Pas testé	
Validation	1978-2017	0,905	0,917		
Simulation	1962-2017	0,902	0,921		

Tout comme pour les maximums annuels observés, on détecte une tendance positive au cours du temps dans les débits simulés (Figure 38). Celle-ci n'est cependant pas significative, mais elle ne l'était pas non plus pour les maximums annuels extraits des données journalières observées. La tendance avec les données journalières est en fait plus faible qu'avec les données horaires (la pente de la régression linéaire passe de 0,54 à 0,36) et n'est, de ce fait, pas significative (Figure 39).

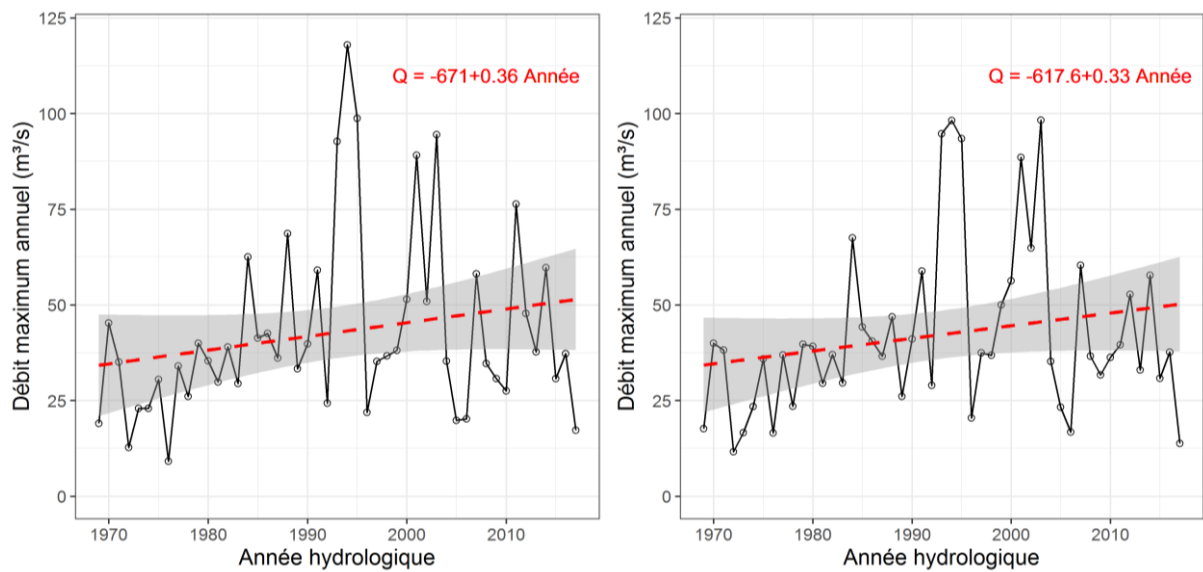


Figure 38. Maximums annuels observés (gauche ; débits journaliers) et simulés (droite) à Daverdisse avec régression linéaire.

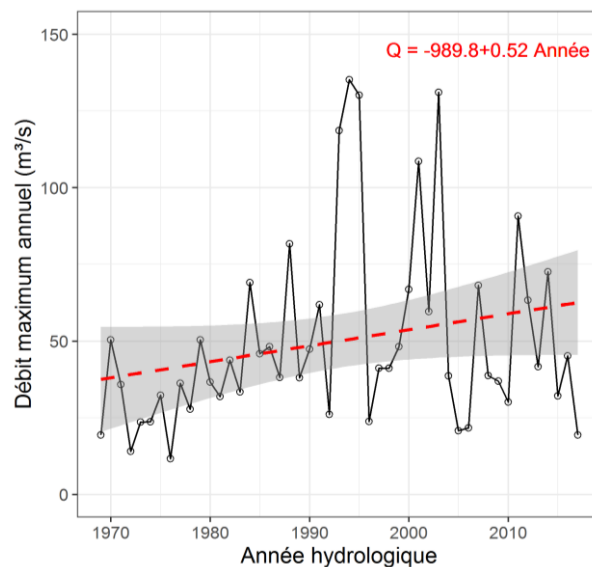


Figure 39. Maximums annuels observés (débits horaires) à Daverdisse.

Etant donné que de très bons résultats sont obtenus en ne considérant que les données climatiques dans le modèle, on peut conclure que d'autres facteurs ne contribueraient pas de façon significative, et que l'augmentation des précipitations est donc le facteur principal responsable de l'augmentation des débits de crue à Daverdisse.

Sauheid

Pour Sauheid, la période de calibration est plus longue (1978-1992) étant donné les données manquantes entre 1981 et 1986. L'hydrogramme montre une assez bonne concordance entre les débits simulés et les débits observés (Figure 40). La plupart des maximums annuels sont bien reproduits (Figure 41), sauf quelques pics pour lesquels l'erreur relative est plus élevée (Figure 42). Les indices de performance sont légèrement inférieurs à ceux de Daverdisse mais sont néanmoins plus grands que 0,75, signe d'une très bonne performance du modèle (Tableau 12). Pour ce bassin, la modélisation avec CemaNeige donne de meilleurs résultats.

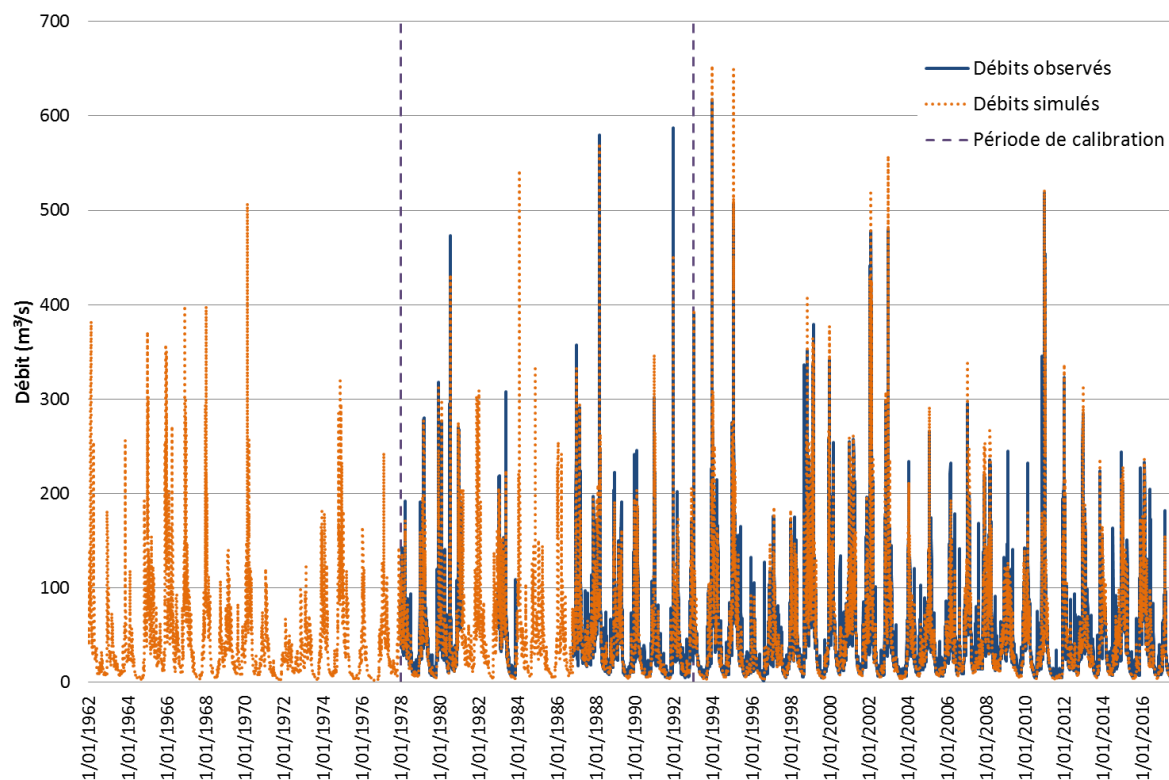


Figure 40. Hydrographes observés et simulés à Sauheid.

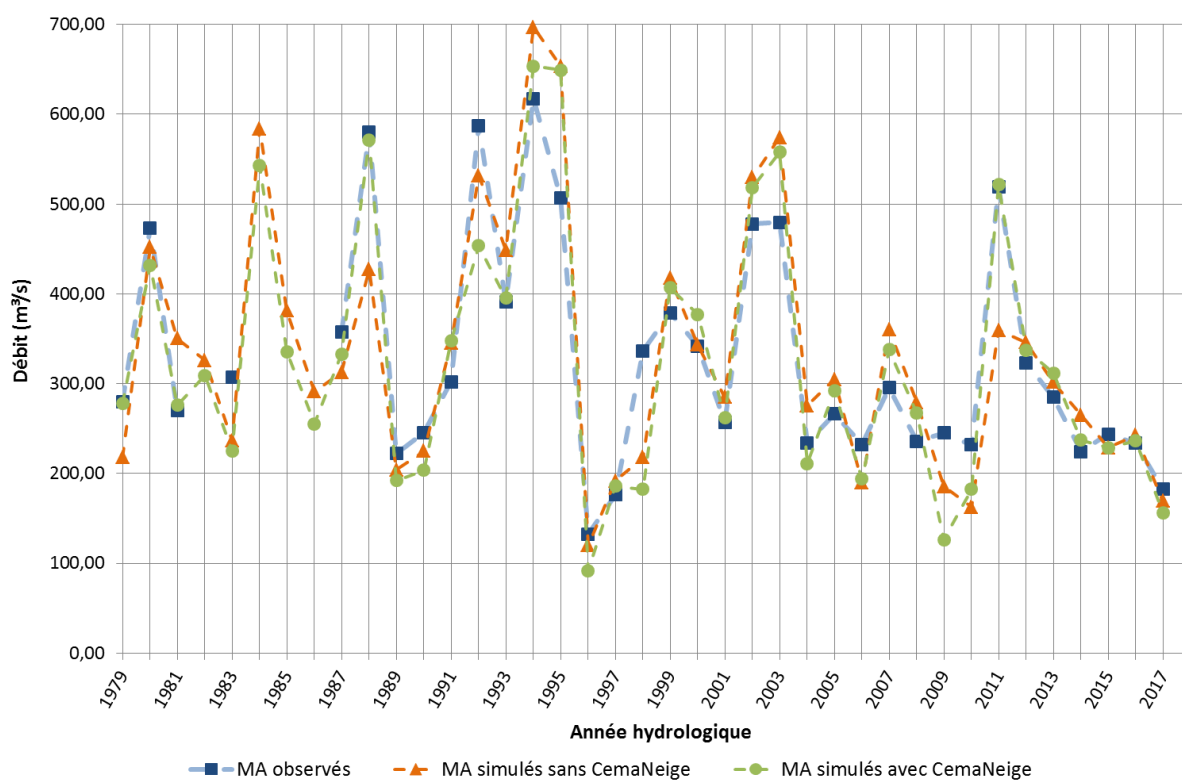


Figure 41. Maximums annuels observés et simulés avec et sans CemaNeige à Sauheid.

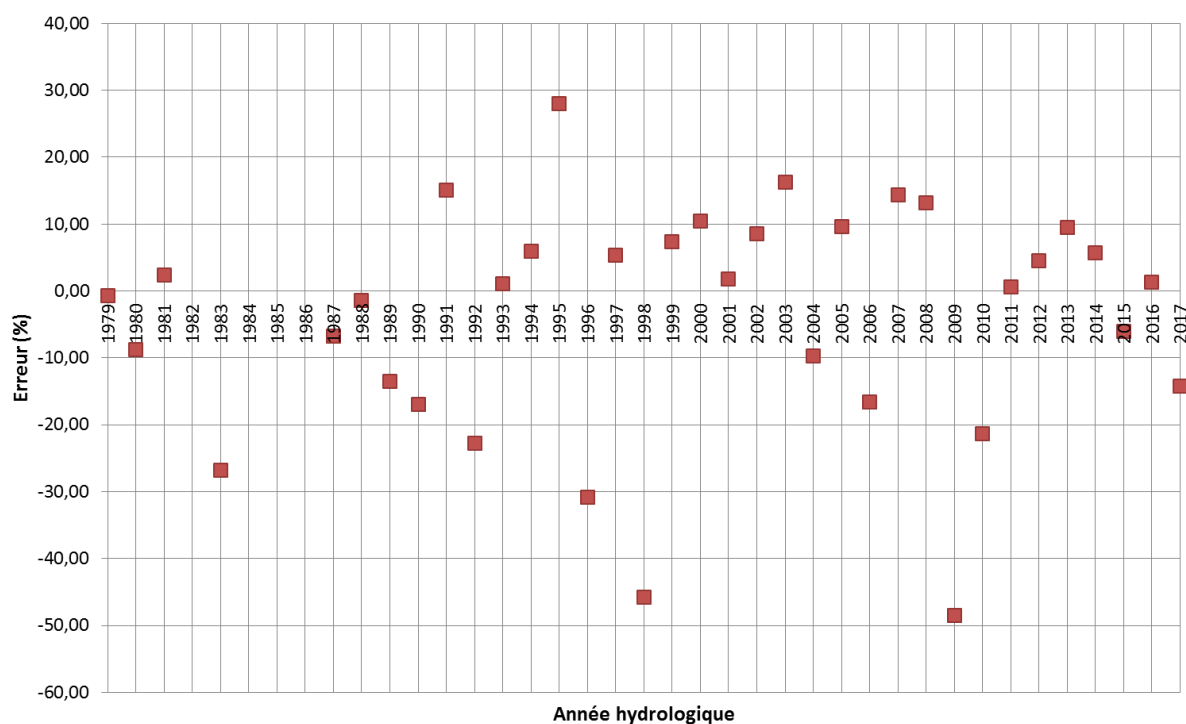


Figure 42. Erreur relative entre les maximums annuels simulés et observés à Sauheid.

Tableau 12. Indices de performance pour les différents tests de modélisation du bassin versant de Sauheid.

	Période	Sans CemaNeige		Avec CemaNeige	
		NSE	KGE	NSE	KGE
Calibration	1978-1992	0,867	0,934	0,937	0,968
Validation	1993-2017	0,879	0,893	0,915	0,914
Simulation	1962-2017	0,876	0,913	0,922	0,935

La tendance dans les maximums annuels simulés semble similaire à celle dans les maximums annuels observés (Figure 43), mais la pente est en fait plus faible, ce qui rend la tendance non significative. La pente de la tendance était déjà plus faible avec les données journalières (pente de -3,4 pour la régression linéaire et p-valeur de 0,038 pour le test de Mann-Kendall) par rapport aux données horaires (pente de -4,3 et p-valeur de 0,023).

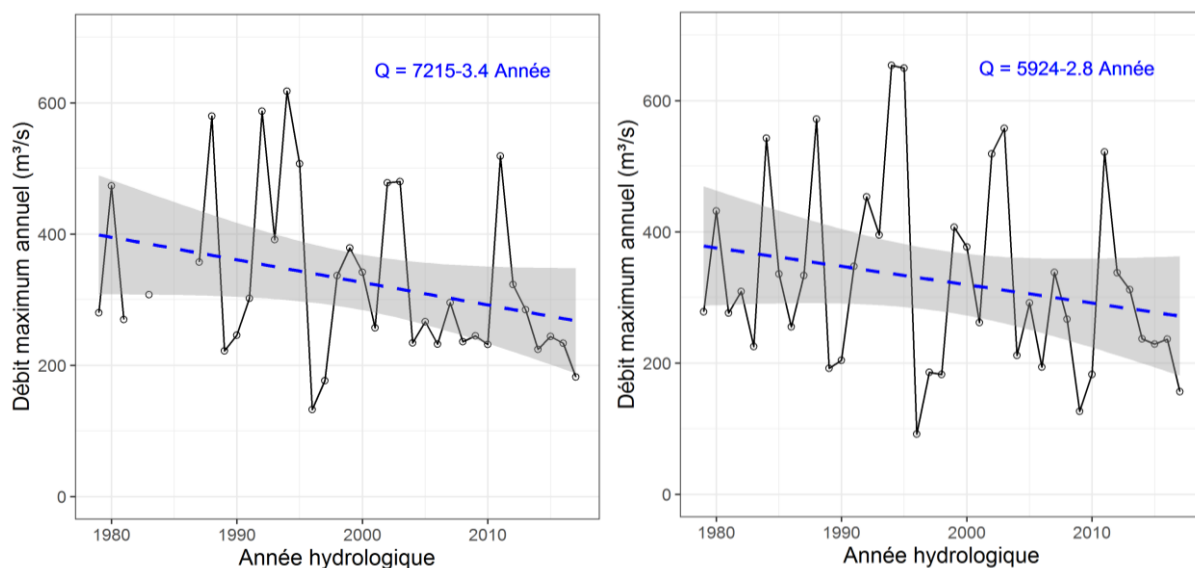


Figure 43. Maximums annuels observés (gauche ; débits journaliers) et simulés (droite) à Sauheid pour la période d'observation 1979-2017, avec régression linéaire.

Tout comme pour les précipitations, il n'y a pas de tendance à plus long terme (à partir de 1963) dans les maximums annuels simulés (Figure 44).

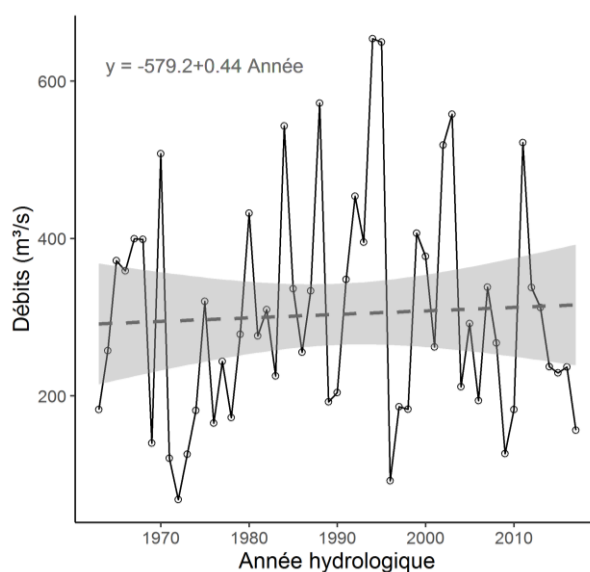


Figure 44. Maximums annuels simulés entre 1963 et 2017 à Sauheid pour la période 1963-2017, avec régression linéaire.

On peut néanmoins conclure, comme pour Daverdisse, que la très bonne performance du modèle indique que d'autres facteurs que le climat ne contribueraient pas de façon significative aux débits de crue. La diminution des précipitations (pluie et neige) est donc le facteur principal responsable de la diminution des débits de crue à Sauheid entre 1980 et 2017.

Mabompré

Pour Mabompré, nous avons fait la modélisation sur 3 périodes de calibration différentes (1978-1987, 1990-1999 et 2002-2011). Les meilleurs résultats sont obtenus avec CemaNeige et la période de calibration 2 (Tableau 13). Les résultats sont toutefois très différents selon la période de calibration utilisée, surtout entre la première période de calibration et les deux autres (Figure 45). On remarque que plus la calibration se fait tôt dans la série de données, plus les débits sont élevés ; la différence est particulièrement marquée pour la première période de calibration (1978-1987). Les maximums annuels sont systématiquement sous-estimés au début de la série et surestimés à la fin,

quelle que soit la période de calibration (Figure 46). De plus, l'erreur relative n'est pas aléatoire mais augmente avec le temps (tendance positive significative pour les 3 périodes de calibration, avec pente plus élevée pour la période de calibration 1) (Figure 47). Le point d'inflexion entre sous- et surestimations semble se situer vers 1990.

Tableau 13. Indices de performance pour les différents tests de modélisation du bassin versant de Mabompré.

	Période	Sans CemaNeige		Avec CemaNeige	
		NSE	KGE	NSE	KGE
Calibration	1978-1987	0,806	0,902	0,912	0,956
Validation	1988-2017	0,761	0,731	0,838	0,734
Simulation	1962-2017	0,773	0,793	0,857	0,803
Calibration	1990-1999	0,890	0,945	0,938	0,969
Validation	1978-1989	0,789	0,747	0,887	0,788
	2000-2017	0,835	0,905	0,888	0,918
Simulation	1962-2017	0,838	0,898	0,904	0,933
Calibration	2002-2011	Pas testé		0,912	0,955
Validation	1978-2001 + 2012-2017			0,907	0,889
Simulation	1962-2017			0,908	0,908

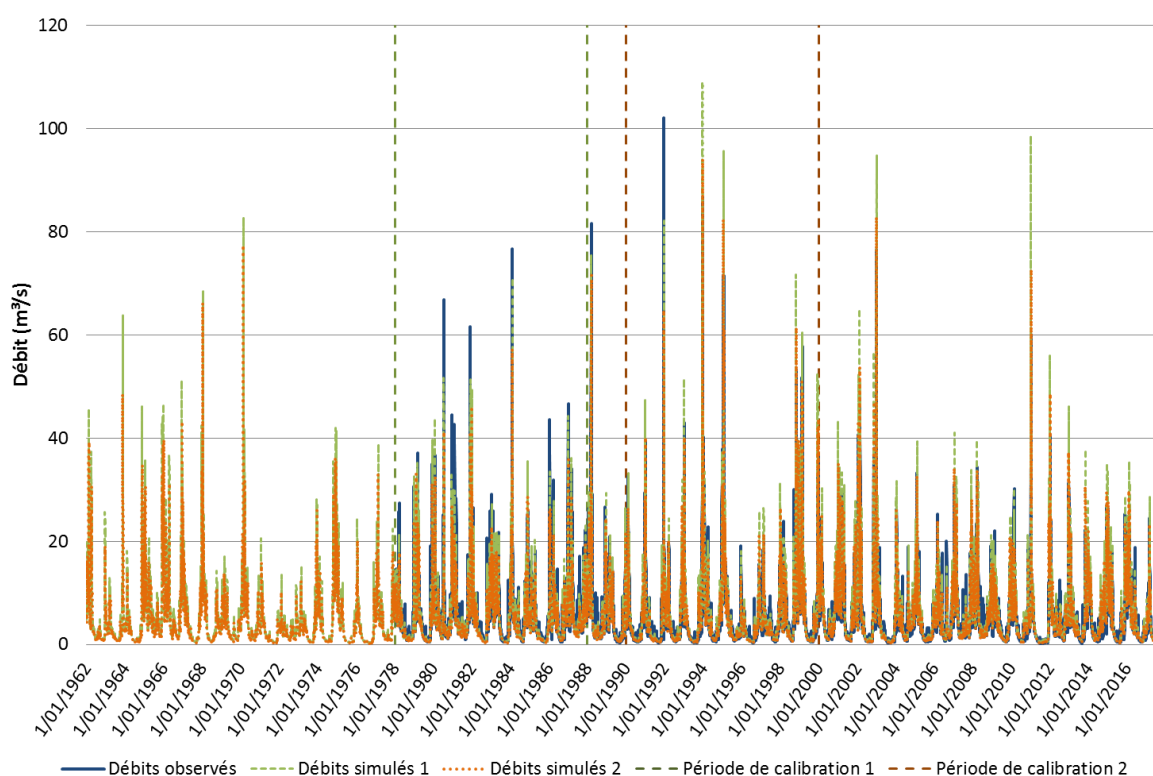


Figure 45. Hydrogrammes observés et simulés à Mabompré.

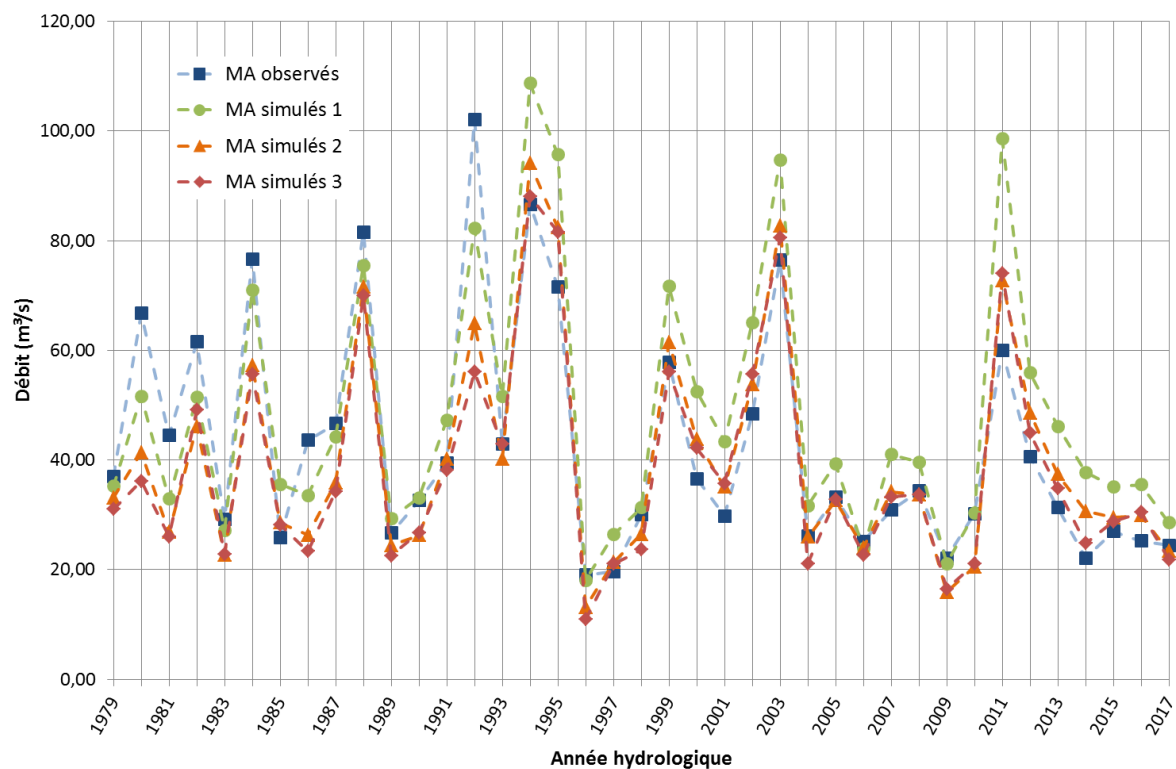


Figure 46. Maximums annuels observés et simulés avec CemaNeige à Mabompré.

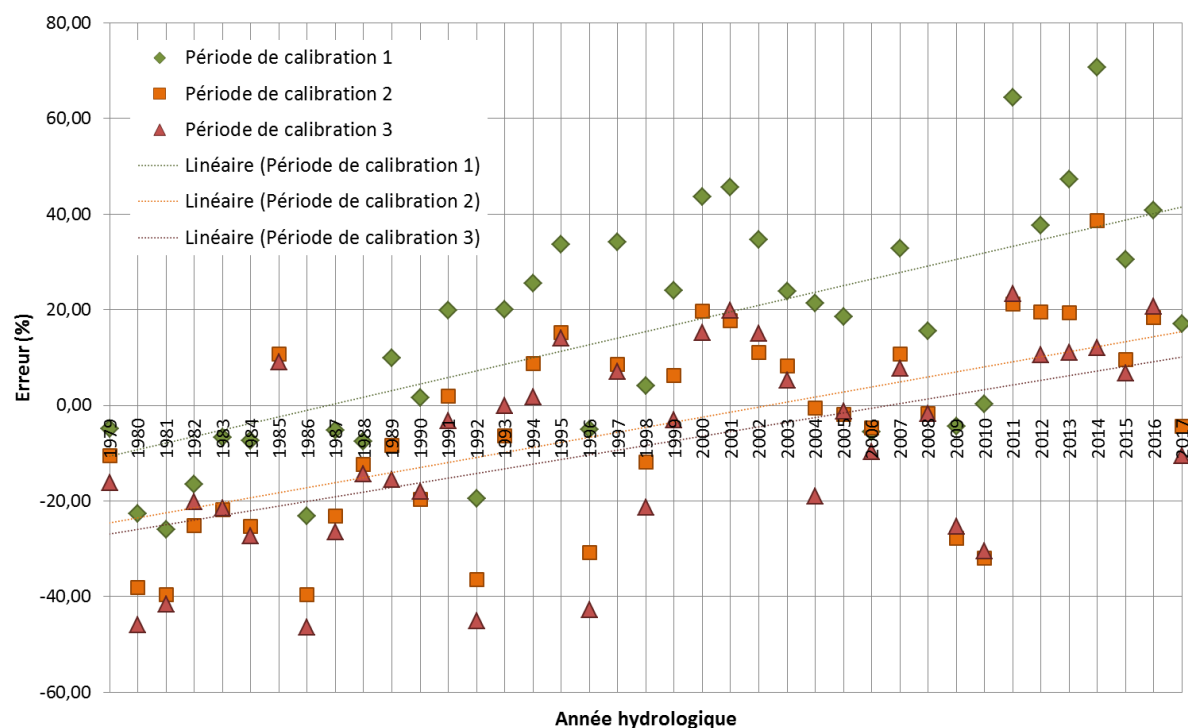


Figure 47. Erreur relative entre les maximums annuels simulés et observés à Mabompré.

Etant donné que les débits sont d'abord sous-estimés puis surestimés, il n'y a pas de tendance significative dans les maximums annuels simulés (Figure 48), ni dans les POTs (Figure 49).

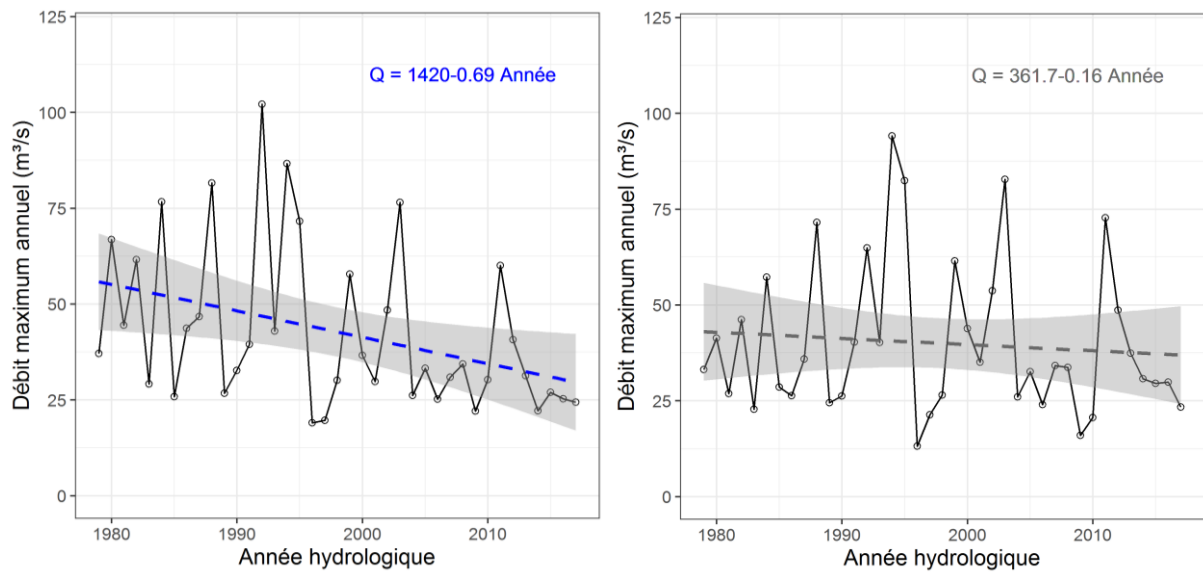


Figure 48. Maximums annuels observés (gauche ; débits journaliers) et simulés (droite, période de calibration 2) à Mabompré, avec régression linéaire.

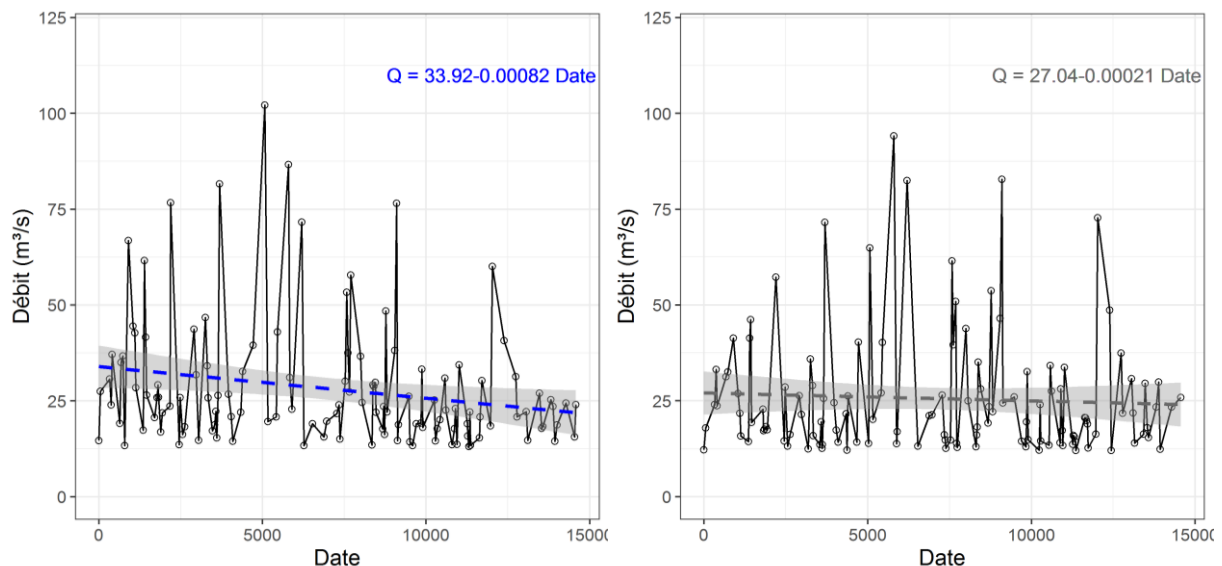


Figure 49. POTs observés (gauche ; débits journaliers) et simulés (droite ; période de calibration 2) à Mabompré, avec régression linéaire. Le 0 sur l'axe des abscisses correspond au 03/02/1978 pour les POTs observés et au 02/02/1978 pour les POTs simulés.

Tous ces résultats montrent que les données climatiques ne suffisent pas à modéliser les débits de façon satisfaisante ; au moins un autre facteur a une influence non négligeable et doit dès lors être pris en compte.

Pour tenter de savoir si le(s) facteur(s) manquant(s) influence(nt) plutôt les volumes ruisselés ou les temps de transferts dans le bassin versant, nous avons calculé le coefficient de ruissellement, c'est-à-dire le rapport entre les cumuls annuels (par année hydrologique) des débits et des précipitations. On constate que le coefficient calculé à partir des débits observés diminue de façon significative au cours du temps mais que cette tendance n'est pas reproduite dans le coefficient avec les débits simulés, quelle que soit la période de calibration (Figure 50). On observe également qu'il y a un changement brusque en 1989. Les coefficients calculés à partir des débits simulés dont la calibration a été faite sur la période 1978-1987 sont d'ailleurs proches des coefficients calculés à partir des débits observés avant 1989 puis systématiquement surestimés après. De façon similaire, les coefficients calculés à partir des débits simulés dont la calibration a été faite sur la période 1990-

1999 ou 2002-2011 sont proches des coefficients calculés à partir des débits observés après 1989 mais systématiquement sous-estimés avant.

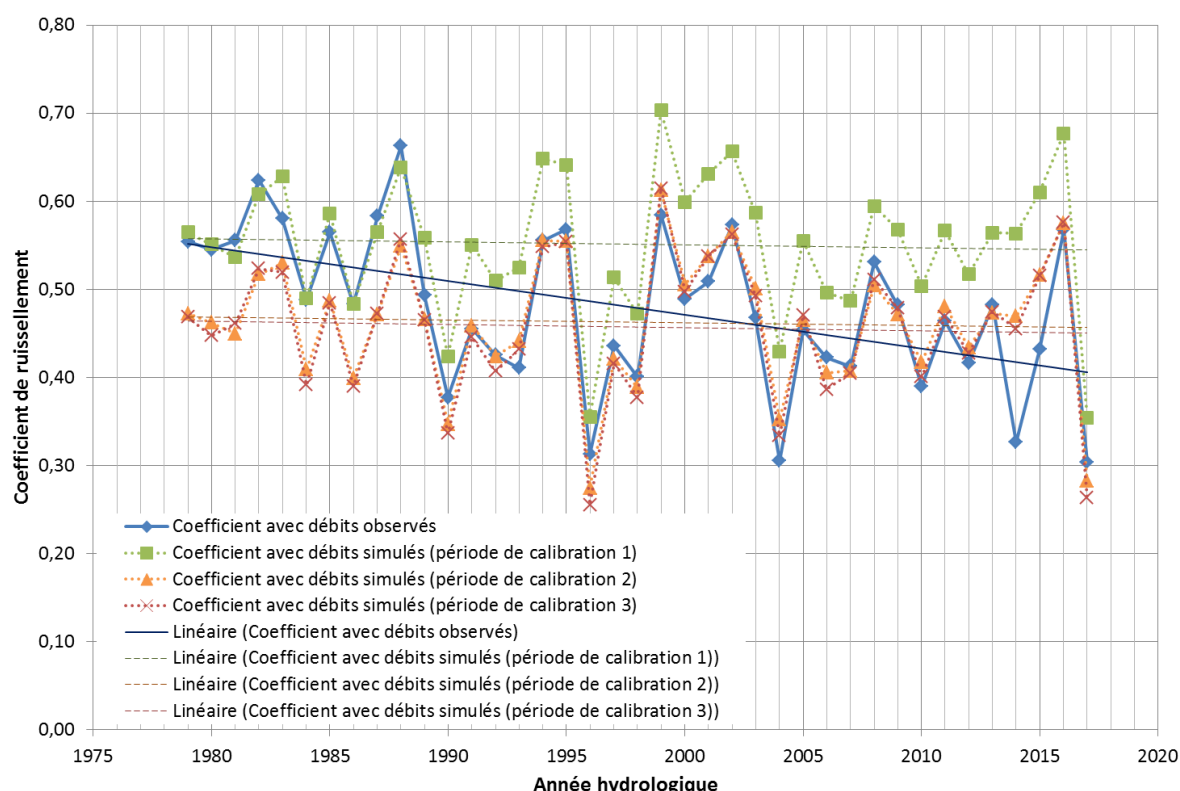


Figure 50. Coefficients de ruissellement à Mabompré, calculés à partir des débits observés ou simulés.

Lorsqu'on analyse les paramètres du modèle pour les différentes périodes de calibration, on constate que, plus la période de calibration est tard dans la série de données, plus le volume d'eau total des deux réservoirs augmente. Un stockage plus grand signifie donc une quantité plus faible d'eau à l'exutoire et des débits qui diminuent. Le temps de base de l'hydrogramme unitaire est aussi légèrement plus long, ce qui veut dire que l'hydrogramme est plus aplati et les pics moins élevés. Ces deux constats sont en accord avec nos observations. Les autres paramètres sont plus liés à la dynamique de l'écoulement qu'aux volumes dans le bassin versant.

Tableau 14. Paramètres du modèle GR4J appliqué au bassin versant de Mabompré en utilisant différentes périodes de calibration.

	1978-1987	1990-1999	2002-2011
Capacité du réservoir de production (mm)	165,3	169,0	247,2
Coefficient d'échanges souterrains (mm/jour)	1,25	0,16	0,34
Capacité à un jour du réservoir de routage (mm)	93,5	114,8	90,0
Temps de base de l'hydrogramme unitaire (jours)	2,02	2,04	2,06
Facteur degré-jour (mm/°C/jour)	0,001	0,020	0,002
Coefficient de pondération de l'état thermique du manteau neigeux	5,57	11,75	8,43
Capacité totale des 2 réservoirs (mm)	258,8	283,8	337,2

Il semblerait donc que des changements diminuant les volumes d'eau dans le bassin versant, et donc probablement d'occupation du sol, aient eu lieu vers 1989.

Sainte-Marie

Pour Sainte-Marie, nous avons également testé différentes modélisations : avec ou sans CemaNeige, et avec la période de calibration au début de la série de données ou au milieu (période qui comprend les pics les plus élevés). C'est la modélisation avec calibration au début de la période (période de calibration 1) et avec CemaNeige qui donne les meilleurs résultats globaux (Tableau 15), même s'il y a peu de différence au niveau du nombre de POTs par an (Figure 54). Concernant la performance du modèle, on remarque une légère sous-estimation systématique des bas débits (Figure 51). Ceci ne devrait pas avoir d'incidences sur les hauts débits mais bien sur les cumuls annuels. Les NSE sont supérieurs à 0,75, mais ils sont toutefois plus faibles que pour Daverdisse et Sauheid. On voit en effet sur l'hydrogramme (Figure 52) que les débits simulés ne correspondent pas aussi bien aux débits observés. Ceci se confirme sur le graphique comparant le nombre de POTs simulés par an au nombre de POTs observés par an : environ 2/3 des points sont discordants (Figure 53). L'erreur semble même augmenter au cours du temps (Figure 54), mais cette tendance n'est pas significative.

Tableau 15. Indices de performance pour les différents tests de modélisation du bassin versant de Sainte-Marie.

	Période	Sans CemaNeige NSE	Sans CemaNeige KGE	Avec CemaNeige NSE	Avec CemaNeige KGE
Calibration	1976-1986	0,839	0,920	0,871	0,935
Validation	1987-2017	0,853	0,908	0,863	0,917
Simulation	1962-2017	0,849	0,914	0,865	0,924
Calibration	1987-1996	0,869	0,934	0,878	0,939
Validation	1976-1986 + 1997-2017	0,835	0,869	0,852	0,872
Simulation	1962-2017	0,845	0,892	0,860	0,896

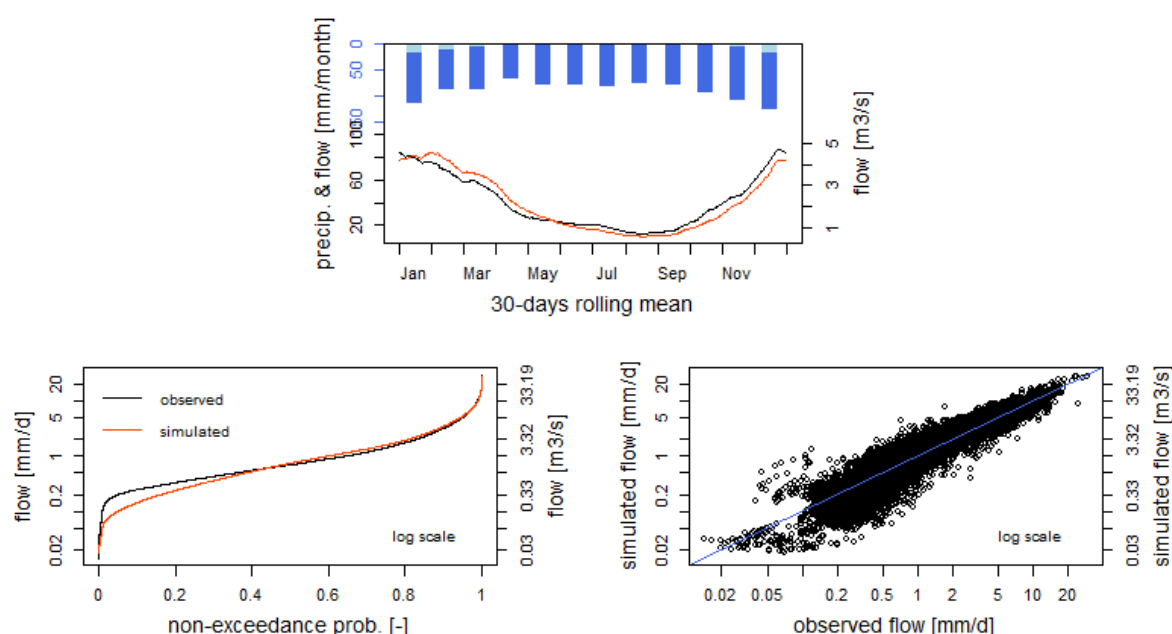


Figure 51. Diagrammes de performance en simulation du modèle à Sainte-Marie (période de calibration 1) : moyennes interannuelles journalières des débits observés et simulés et moyennes mensuelles interannuelles des précipitations, courbe des débits classés observés et simulés, et diagramme de corrélation entre débits observés et simulés.

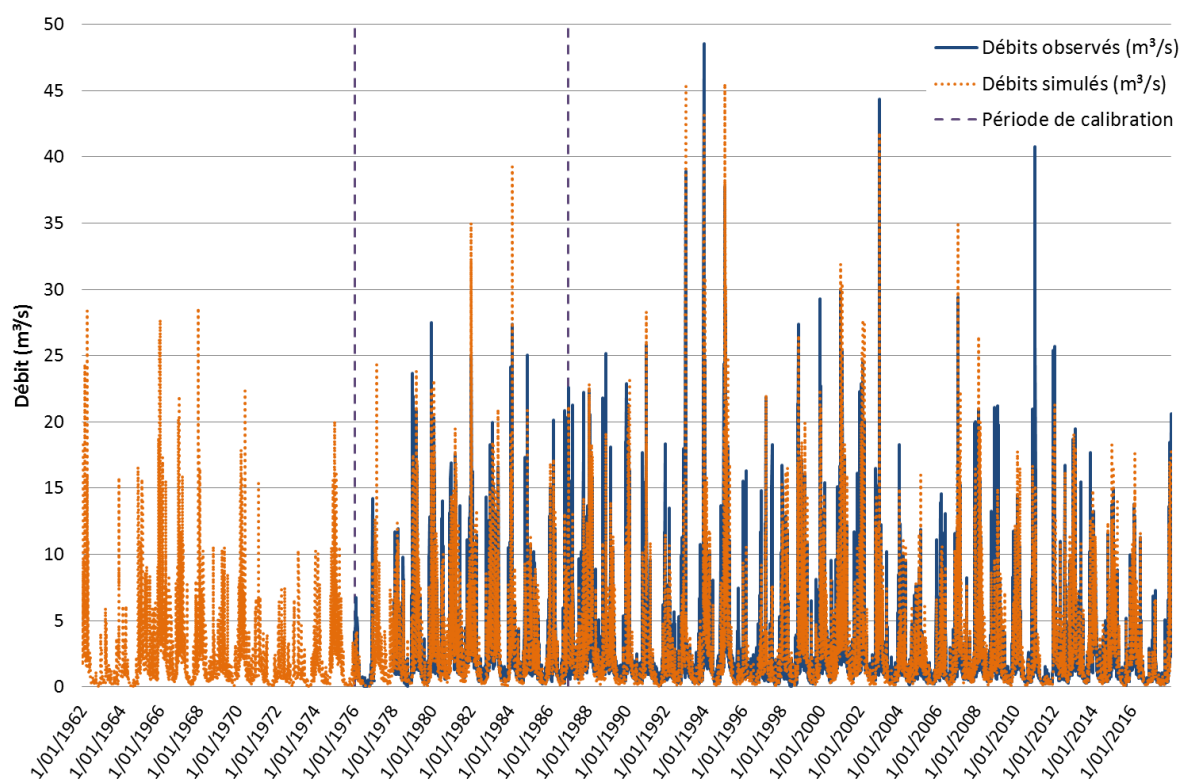


Figure 52. Hydrogrammes observés et simulés à Sainte-Marie.

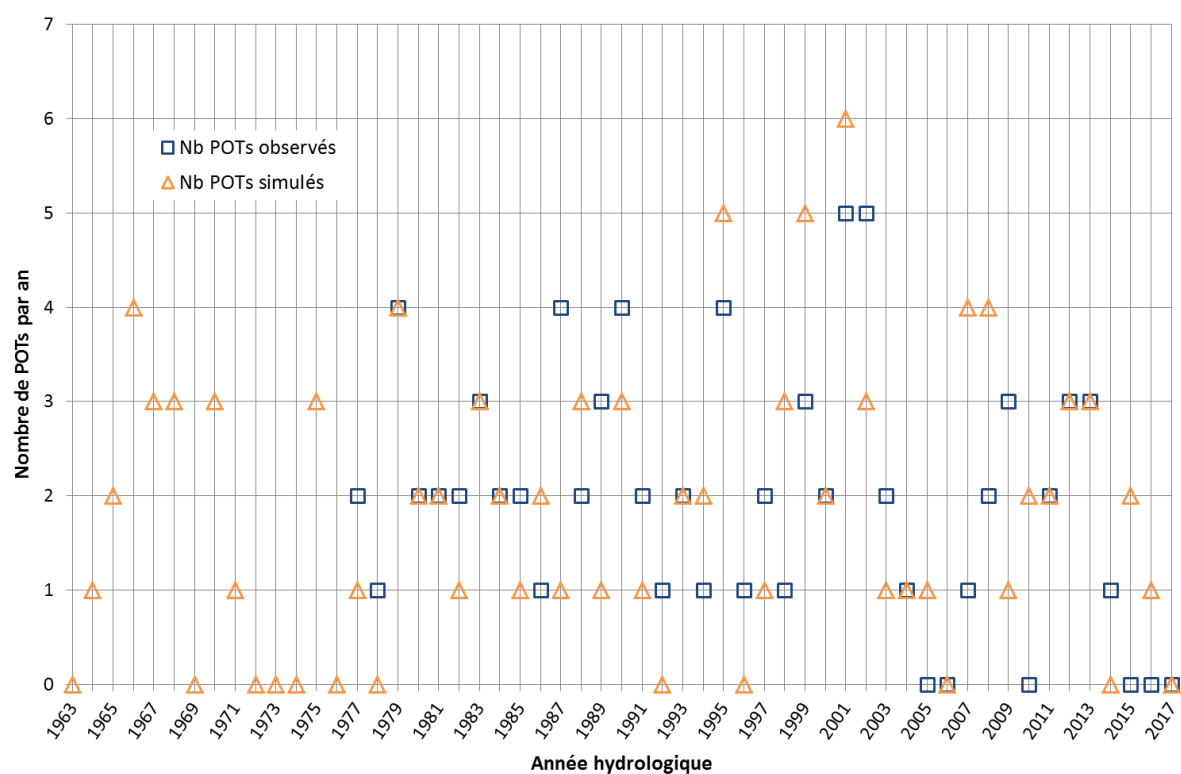


Figure 53. Nombre de POTs observés et simulés par an à Sainte-Marie.

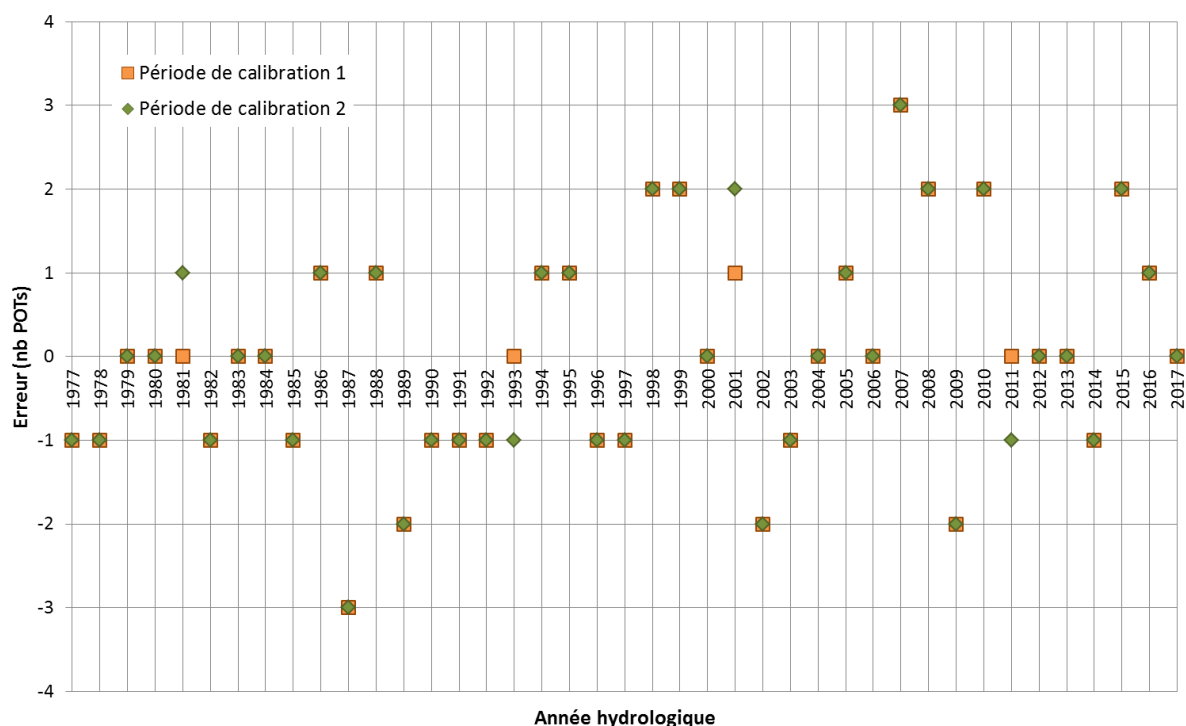


Figure 54. Différence entre le nombre de POTs simulés et observés par an à Sainte-Marie.

Au niveau des tendances, aucune tendance n'a été détectée dans le nombre de POTs simulés par an, contrairement au nombre de POTs observés (Figure 55). Cette dernière n'est toutefois pas significative ; comme à Daverdisse, le passage aux données journalières engendre une diminution de la pente de la tendance et une perte de sa significativité.

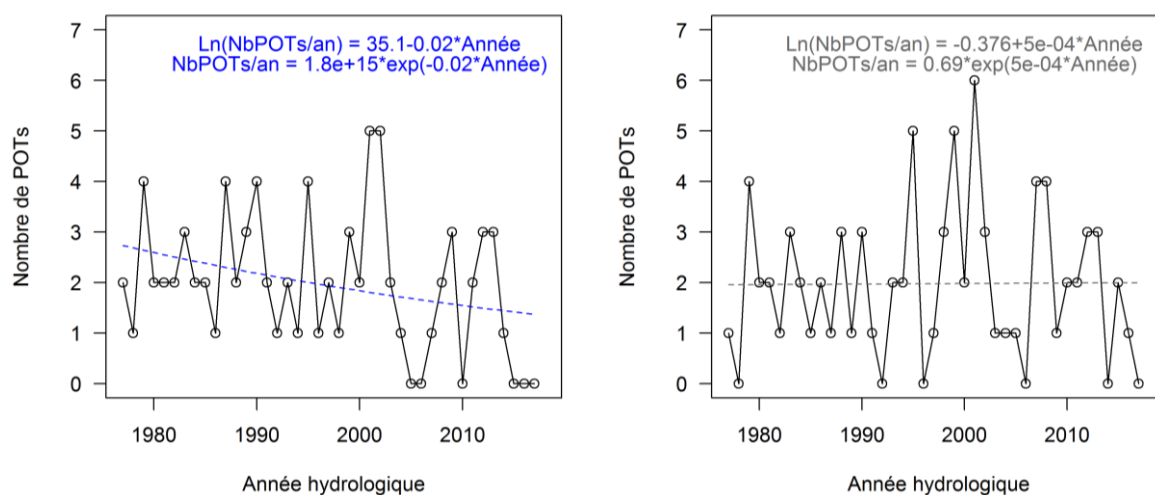


Figure 55. Nombre de POTs observés par an (gauche ; débits journaliers) et simulés (droite) à Sainte-Marie, avec régression linéaire.

La tendance dans les coefficients de ruissellement annuels calculés à partir des débits simulés est également plus faible que dans celle dans les coefficients calculés à partir des débits observés (Figure 56), qui est, elle, significative.

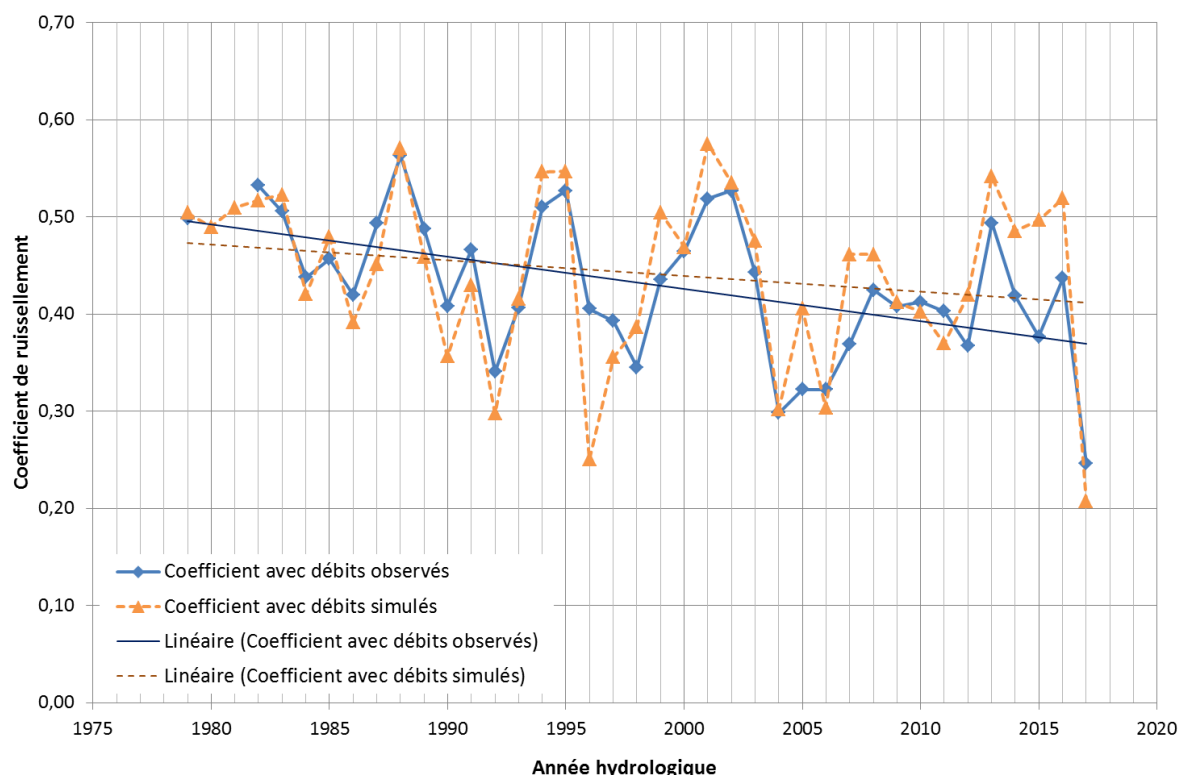


Figure 56. Coefficients de ruissellement à Sainte-Marie, calculés à partir des débits observés ou simulés.

Ces résultats nous permettent de conclure que la diminution des précipitations est en partie responsable de la diminution de la fréquence des crues à Sainte-Marie, mais qu'il existe au moins un autre facteur, probablement lié à l'occupation du sol, qui influence également. De plus, on note que l'augmentation de l'urbanisation est négligeable ou, en tout cas, masquée par les autres facteurs qui engendrent la diminution de la fréquence des crues.

Wanze

Pour Wanze, l'inclusion du module CemaNeige donne des résultats légèrement meilleurs (Tableau 16). Nous avons fait la calibration au début de la série de données (1979-1988), mais aussi sur la période 1989-1998 qui présente des débits plus variables (Figure 57). La performance du modèle est similaire en calibration, mais pas en validation : les indices de performance sont plus élevés avec la période de calibration 1 (Tableau 16) mais les maximums annuels sont, globalement, légèrement meilleurs avec la période 2 car la plupart des pics sont sous-estimés et les débits simulés avec le modèle calibré sur la période 2 sont légèrement plus élevés que ceux simulés avec le modèle calibré sur la période 1 (Figure 58 et Figure 59). Cependant, le modèle sous-estime grandement les bas-débits (Figure 61) ; c'est très certainement une des raisons pour lesquelles les indices de performance sont inférieurs à ceux des autres bassins versants. Une autre particularité que l'on n'observait pas pour les autres bassins versants est le fait que les débits simulés à la date des débits maximums annuels observés sont, dans certains cas, très différents des maximums annuels extraits des débits simulés (Figure 60 comparée à Figure 58). Ceci signifie que la dynamique temporelle des débits n'est pas tout à fait bien reproduite par le modèle. Si l'on décompose le KGE, on constate que les indices liés à la reproduction de la moyenne et de l'écart-type sont proches de 1 alors que celui de la corrélation entre débits observés et simulés est plus faible (proche de la valeur du KGE). Les NSE sont toutefois supérieurs à 0,75, ce qui indique une performance globale très bonne du modèle.

Tableau 16. Indices de performance pour les différents tests de modélisation du bassin versant de Wanze.

	Période	Sans CemaNeige NSE	Sans CemaNeige KGE	Avec CemaNeige NSE	Avec CemaNeige KGE
Calibration	1979-1988	0,789	0,895	0,833	0,917
Validation	1989-2017	0,817	0,903	0,827	0,903
Simulation	1962-2017	0,813	0,904	0,833	0,910
Calibration	1989-1998	0,823	0,912	0,833	0,916
Validation	1979-1988 + 1999-2017	0,781	0,835	0,793	0,825
Simulation	1962-2017	0,792	0,859	0,804	0,853

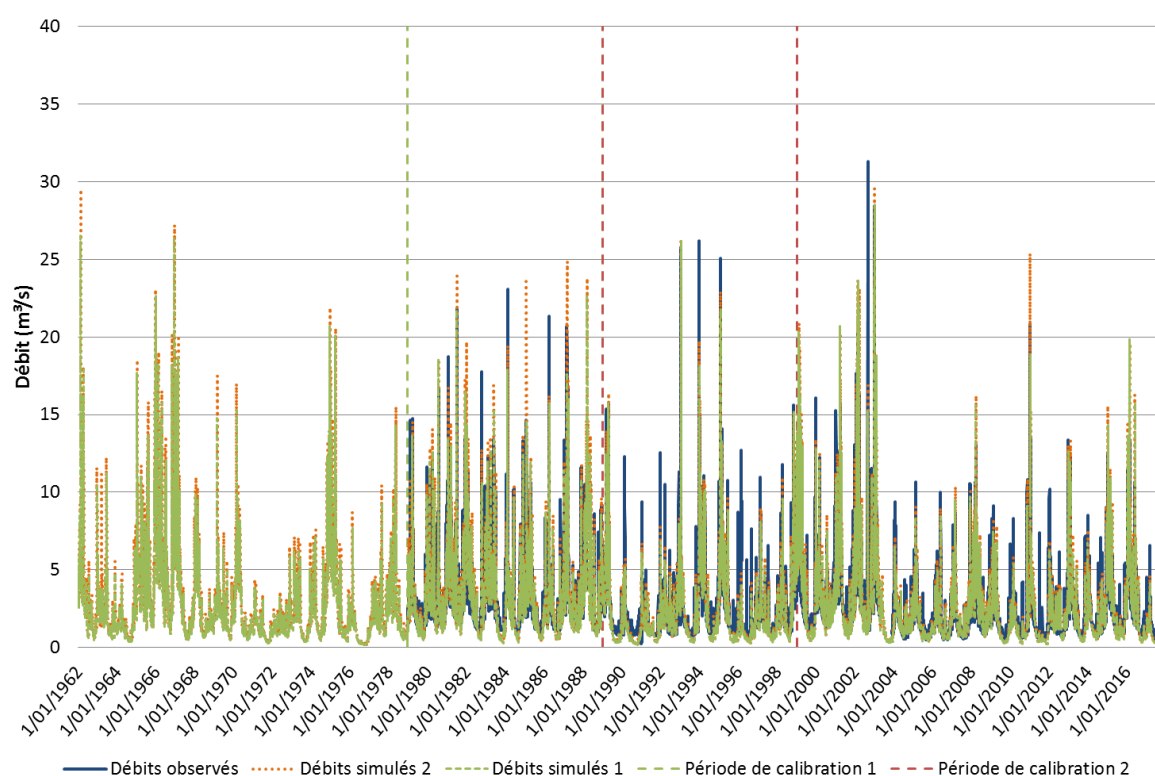


Figure 57. Hydrogrammes observés et simulés à Wanze.

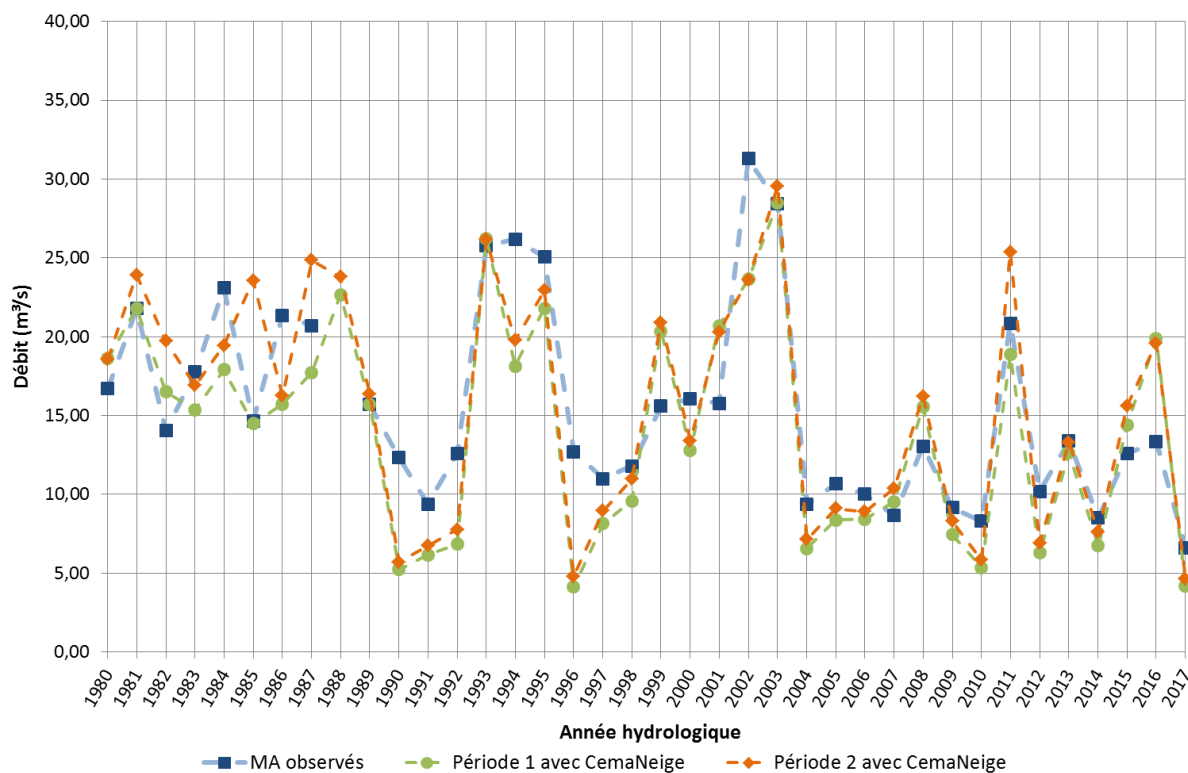


Figure 58. Maximums annuels observés et simulés avec CemaNeige à Wanze.

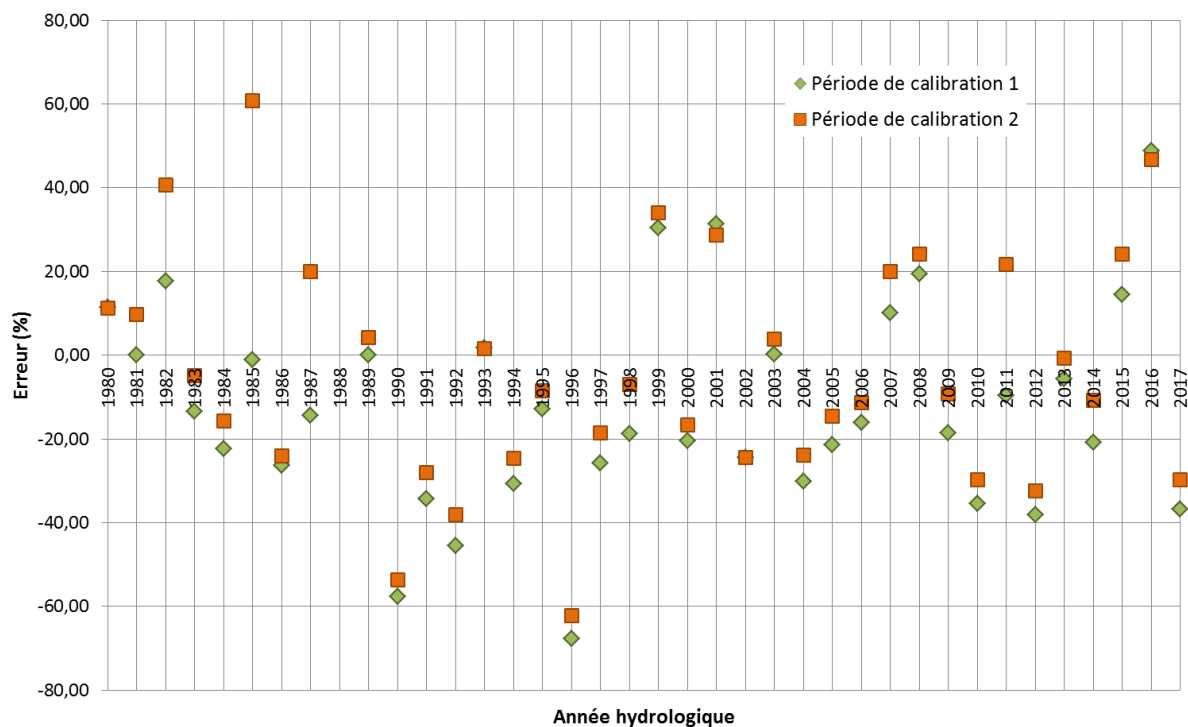


Figure 59. Erreur relative entre les maximums annuels simulés et observés à Wanze.

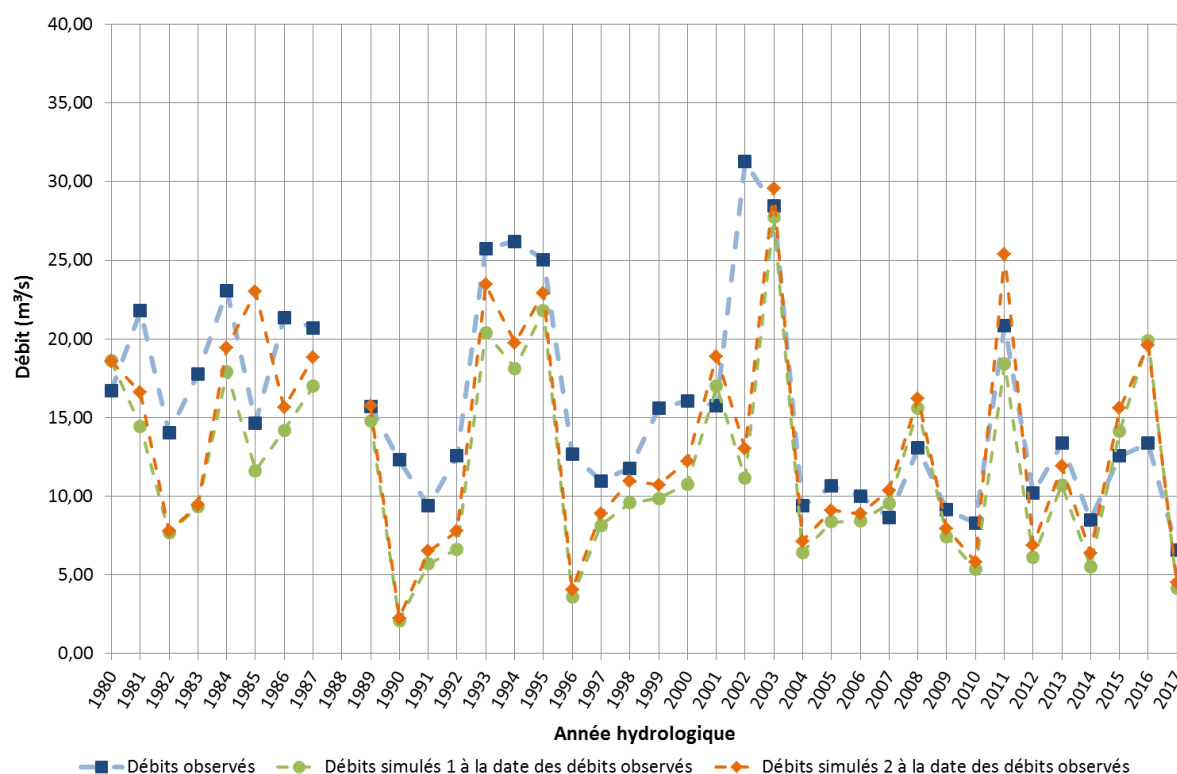


Figure 60. Maximums annuels observés et débits simulés, avec CemaNeige, aux mêmes dates que les maximums annuels observés à Wanze.

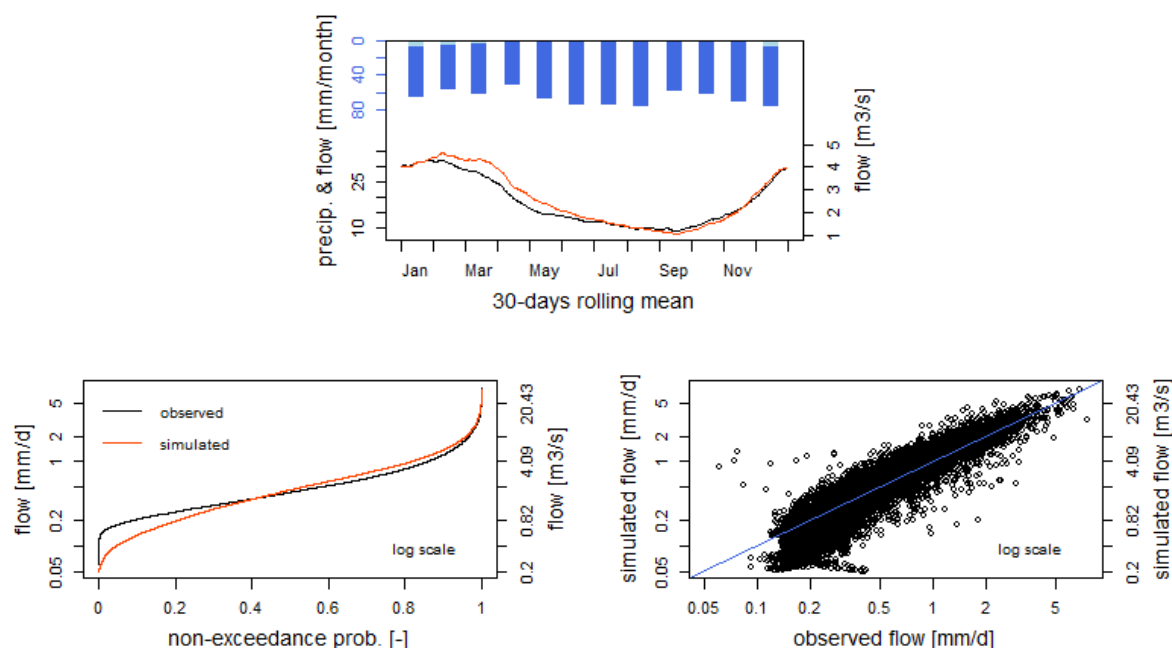


Figure 61. Diagrammes de performance en simulation du modèle à Wanze (période de calibration 2, avec CemaNeige) : moyennes interannuelles journalières des débits observés et simulés et moyennes mensuelles interannuelles des précipitations, courbe des débits classés observés et simulés, et diagramme de corrélation entre débits observés et simulés.

On détecte une tendance significative aussi bien dans les débits maximums annuels simulés que dans le nombre de POTs simulés par an, comme c'était le cas dans les débits observés (Figure 62 et Figure 63). Les graphiques montrent les résultats avec la période de calibration 2, mais la tendance est aussi observée avec les débits simulés par le modèle calibré sur la première période. La tendance

« à long terme » (depuis 1963) dans les MA n'est pas significative, mais elle l'est pour le nombre de POTs par an, avec une pente plus faible (Figure 64).

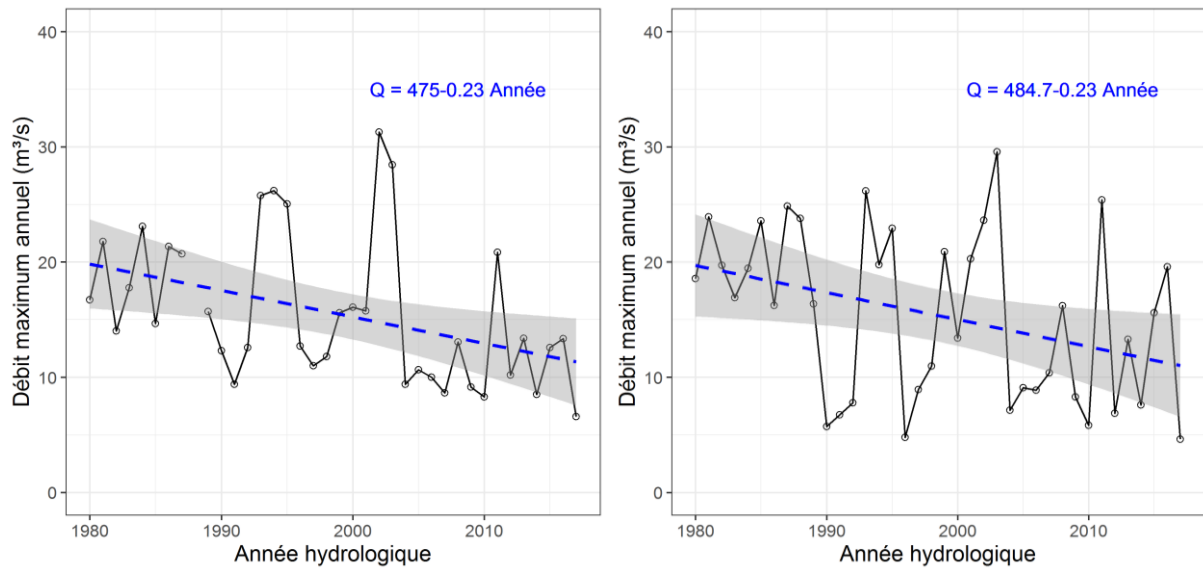


Figure 62. Maximums annuels observés (gauche ; débits journaliers) et simulés (droite, période de calibration 2) à Wanze pour la période d'observation 1980-2017, avec régression linéaire.

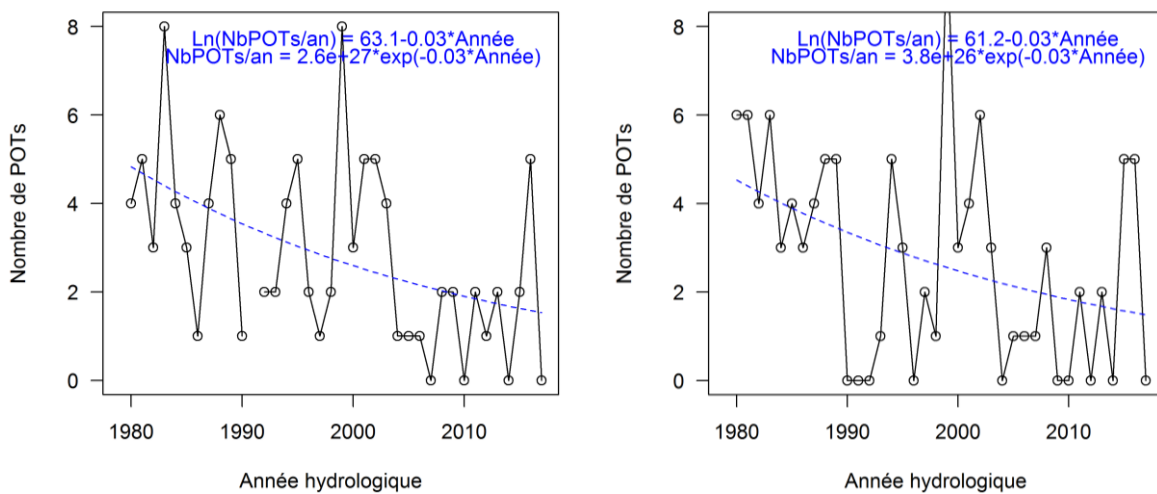


Figure 63. Nombre de POTs observés par an (gauche ; débits journaliers) et simulés (droite) à Wanze, avec régression de Poisson.

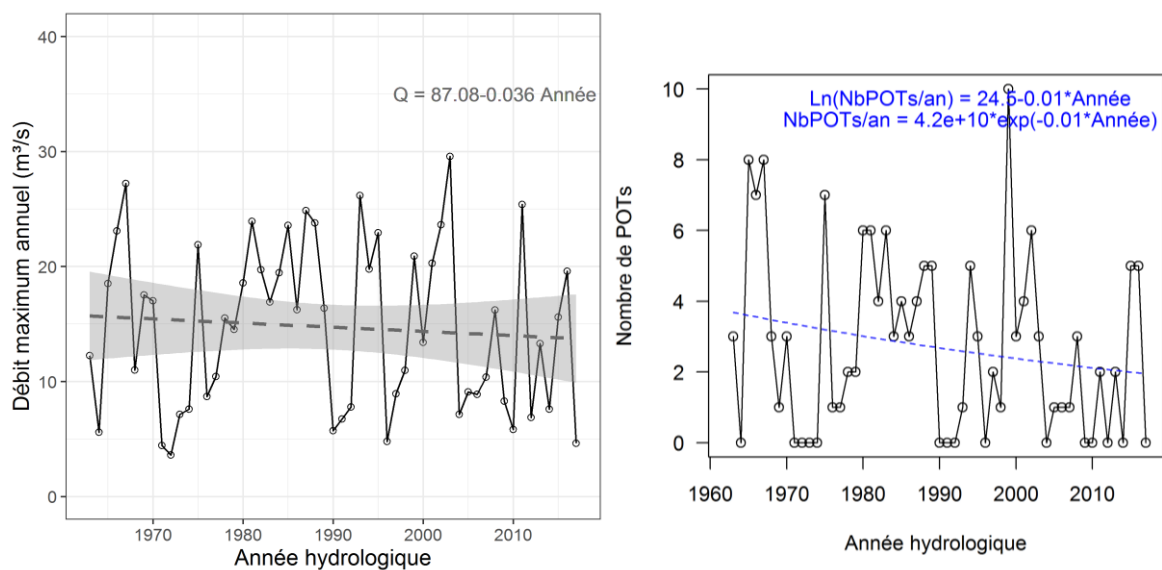


Figure 64. Maximums annuels simulés et nombre de POTs simulés par an à Wanze pour la période 1963-2017, avec régression linéaire et régression de Poisson respectivement.

Le graphique des coefficients de ruissellement confirme qu'il n'y a pas de différence entre les débits observés et simulés au niveau des volumes (Figure 65).

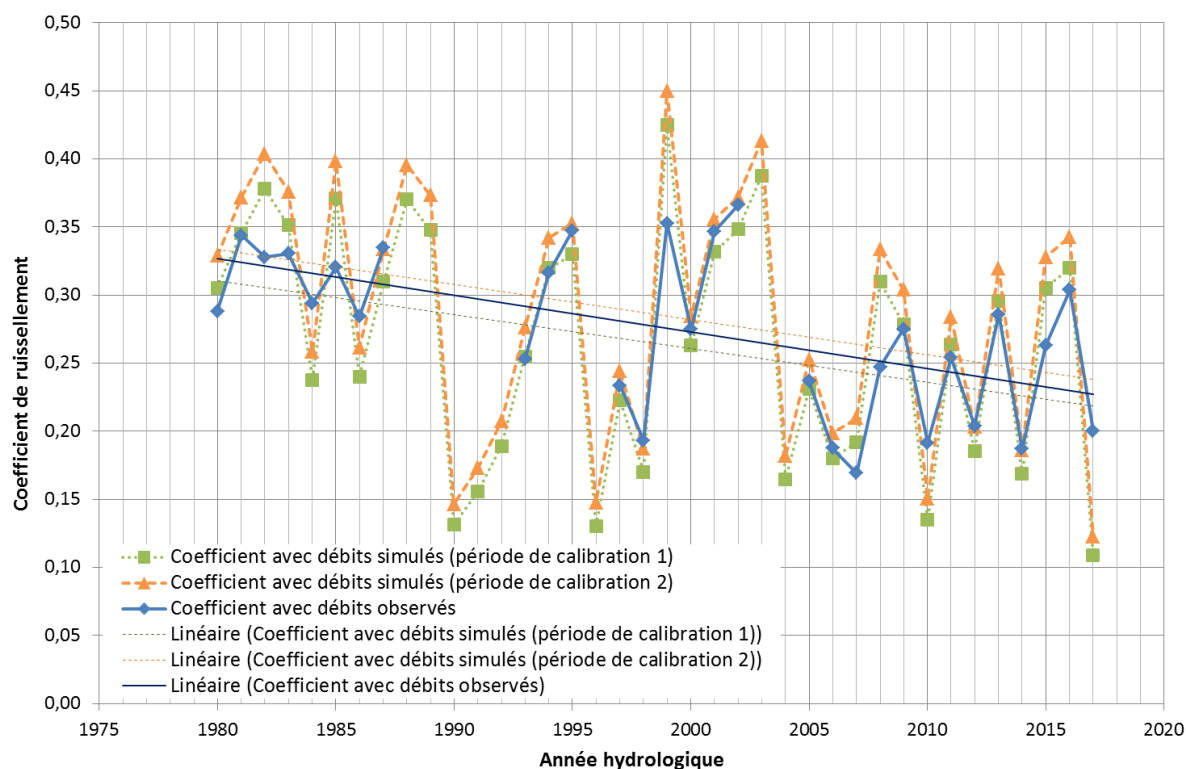


Figure 65. Coefficients de ruissellement à Wanze, calculés à partir des débits observés ou simulés.

Nous pouvons donc conclure que les facteurs climatiques, et en particulier l'augmentation de l'évapotranspiration, permettent d'expliquer la diminution des débits à Wanze entre 1980 et 2017. Comme à Sainte-Marie, les facteurs climatiques ont une influence plus forte sur les débits que l'augmentation des surfaces bâties et du caractère ruisselant des occupations agricoles.

La calibration du modèle pour Saint-Rémy-Geest s'est faite sur les 13 premières années de la série de données. Nous avons choisi une période un peu plus longue afin d'inclure 2 années durant lesquelles les maximums annuels étaient plus faibles ; cette période comprend néanmoins les plus hauts pics de la série (Figure 66). L'hydrogramme montre de nombreuses sous-estimations des pics, en particulier au début de la série. Les indicateurs de performance confirment que le modèle n'est pas satisfaisant ($NSE < 0,5$ en validation) (Tableau 17). L'utilisation de CemaNeige n'apporte toutefois pas d'améliorations significatives, les maximums annuels simulés sont très similaires (Figure 67) ; nous continuons donc les analyses sur les résultats de la modélisation sans CemaNeige. Comme à Wanze mais de manière plus prononcée, nous observons, d'une part, une sous-estimation des bas-débits (Figure 68) et, d'autre part, un décalage au niveau de la dynamique temporelle des débits aussi bien en comparant le graphique des maximums annuels simulés (Figure 67) au graphique des débits simulés aux dates des maximums annuels observés (Figure 69) qu'en décomposant le KGE (indice de corrélation faible). Ces deux caractéristiques peuvent en partie expliquer les faibles indices de performance du modèle. On sait cependant que cette station de mesure est affectée par le développement d'algues en période estivale, ce qui expliquerait la sous-estimation des bas débits. On peut également voir que l'erreur sur les maximums annuels n'est pas aléatoire et que ces débits sont en fait systématiquement sous-estimés avant 1997 (Figure 71).

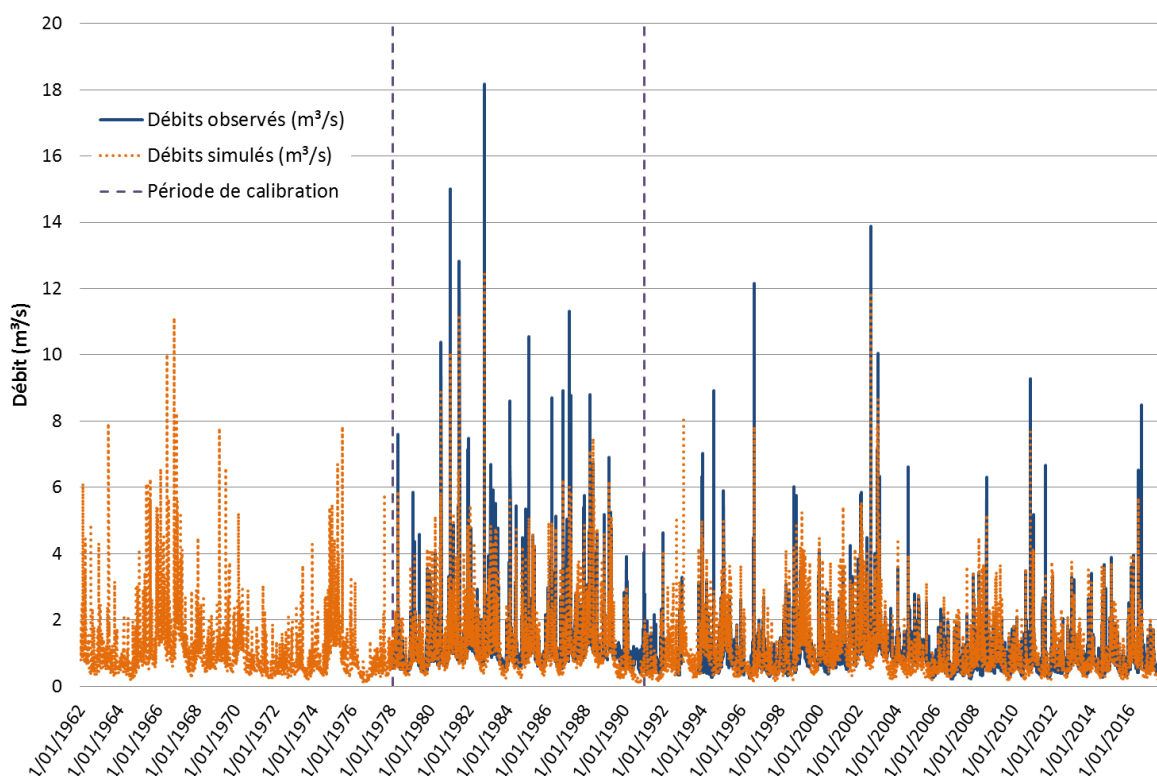


Figure 66. Hydrogrammes observés et simulés à Saint-Rémy-Geest.

Tableau 17. Indices de performance pour les différents tests de modélisation du bassin versant de Saint-Rémy-Geest.

	Période	Sans CemaNeige		Avec CemaNeige	
		NSE	KGE	NSE	KGE
Calibration	1978-1990	0,670	0,835	0,686	0,844
Validation	1991-2017	0,460	0,727	0,452	0,725
Simulation	1962-2017	0,583	0,794	0,587	0,796

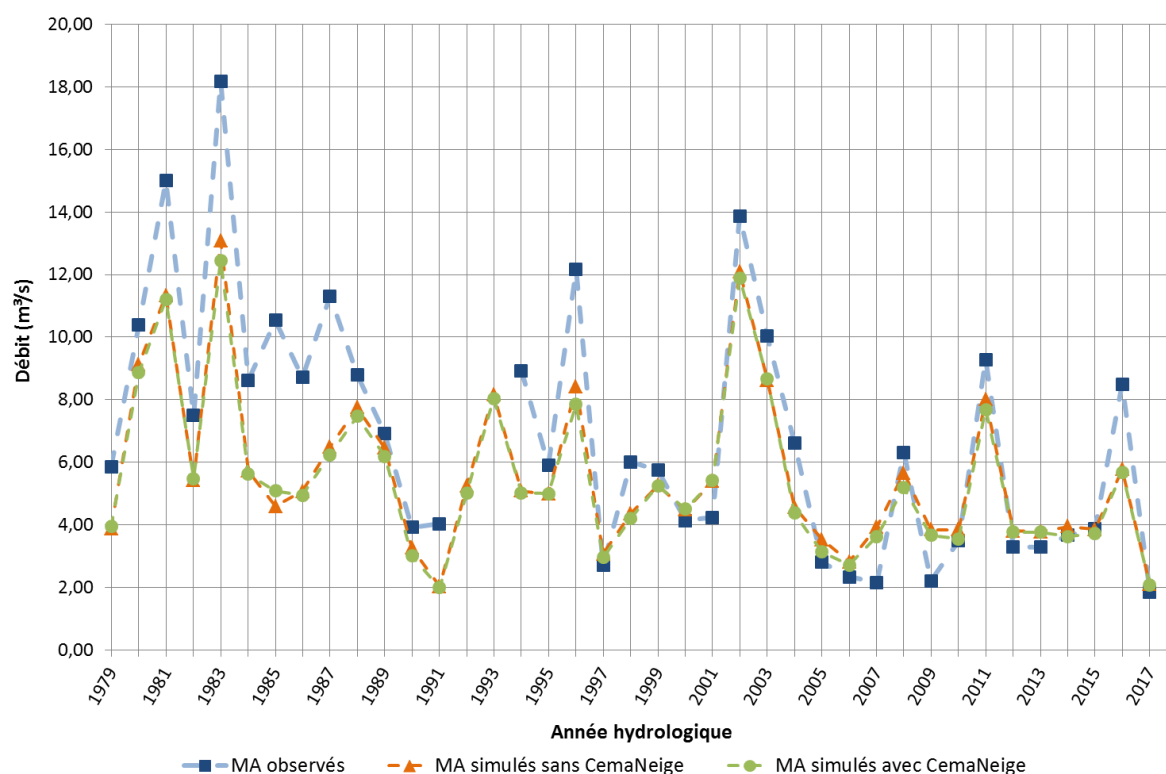


Figure 67. Maximums annuels observés et simulés avec et sans CemaNeige à Saint-Rémy-Geest.

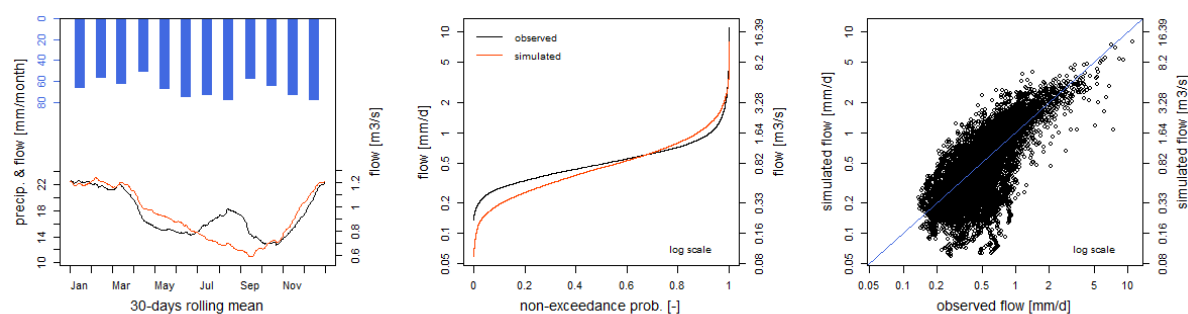


Figure 68. Diagrammes de performance en simulation du modèle à Saint-Rémy-Geest : moyennes interannuelles journalières des débits observés et simulés et moyennes mensuelles interannuelles des précipitations, courbe des débits classés observés et simulés, et diagramme de corrélation entre débits observés et simulés.

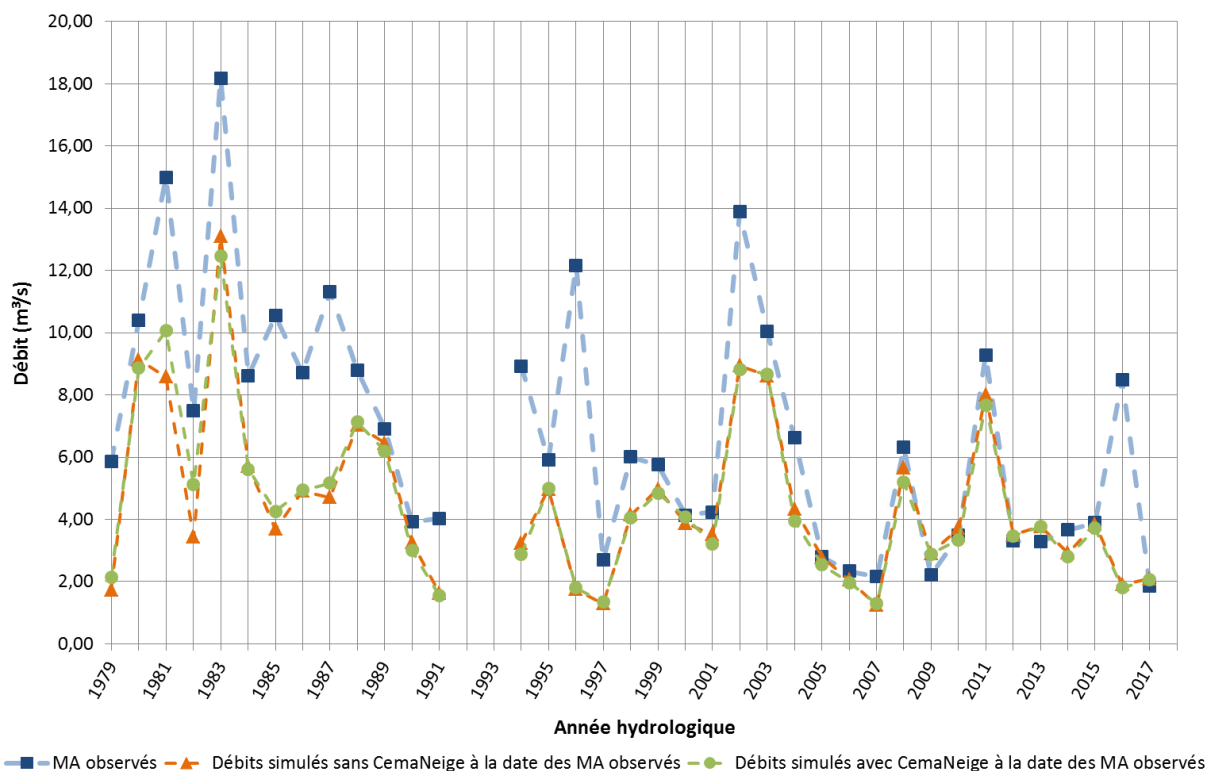


Figure 69. Maximums annuels observés et débits simulés aux mêmes dates que les maximums annuels observés à Saint-Rémy-Geest.

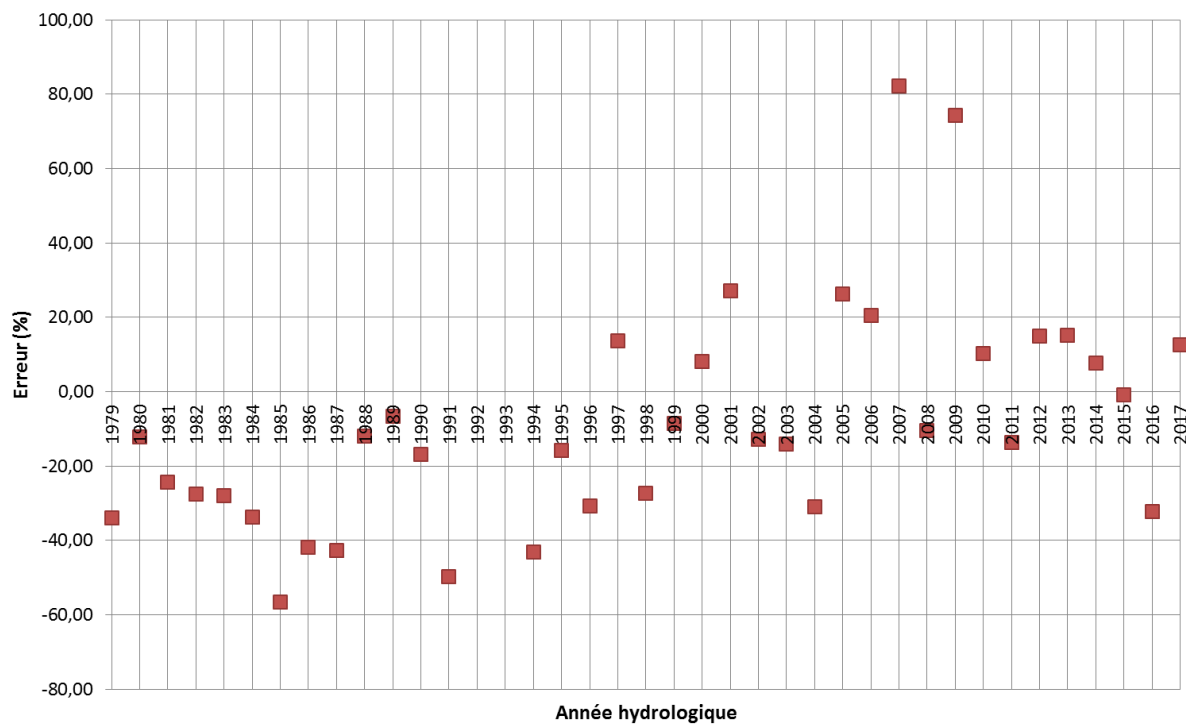


Figure 70. Erreur relative entre les maximums annuels simulés et observés à Saint-Rémy-Geest.

La tendance dans les débits maximums simulés est significative, malgré la pente plus faible (Figure 71), et le reste lorsqu'on considère tout l'historique des données (Figure 73). La tendance dans le nombre de POTs simulés par an est aussi significative entre 1979 et 2017 (Figure 72), mais pas entre 1963 et 2017 (Figure 73).

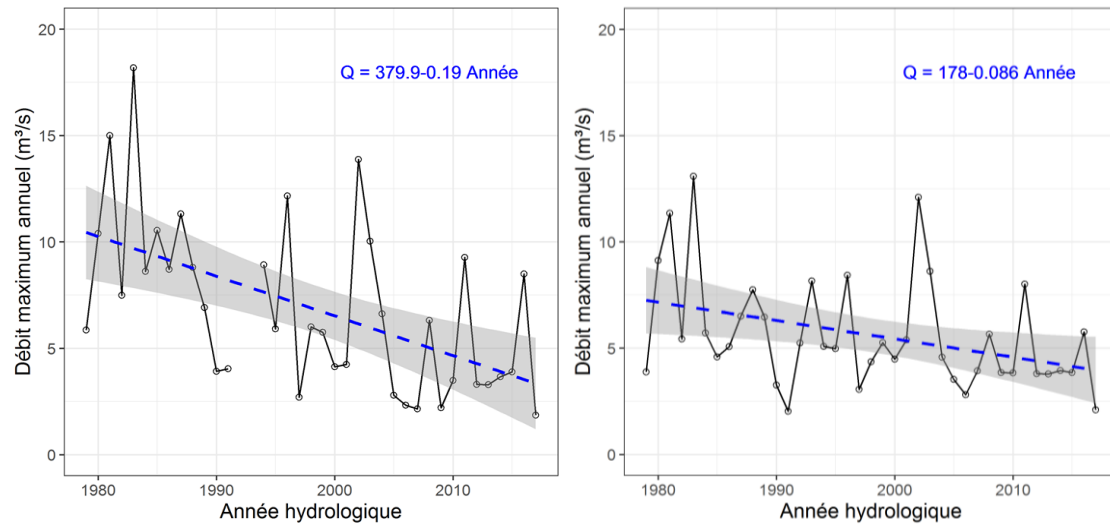


Figure 71. Maximums annuels observés (gauche ; débits journaliers) et simulés (droite) à Saint-Rémy-Geest pour la période 1979-2017, avec régression linéaire.

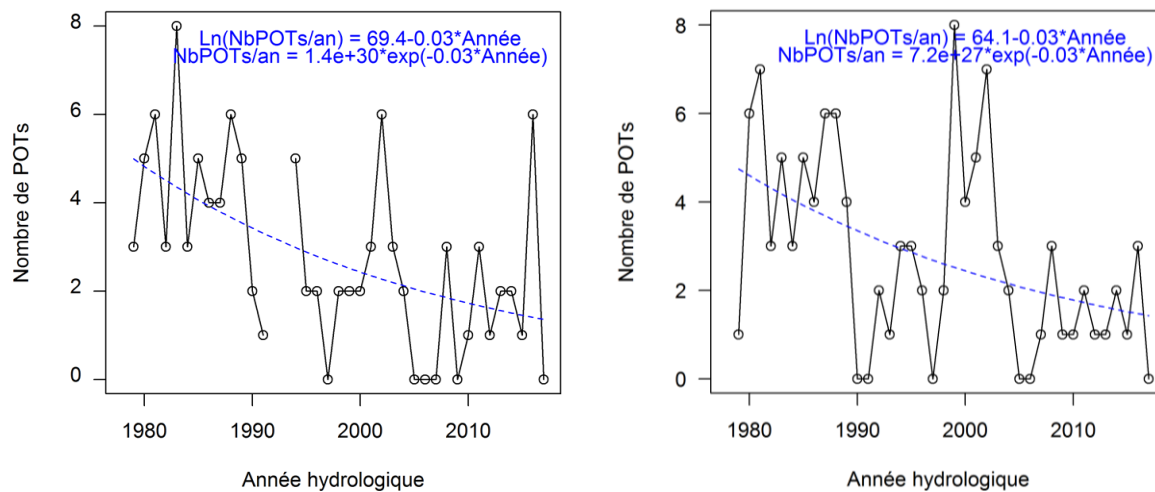


Figure 72. Nombre de POTs observés par an (gauche ; débits journaliers) et simulés (droite) à Saint-Rémy-Geest pour la période 1979-2017, avec régression de Poisson.

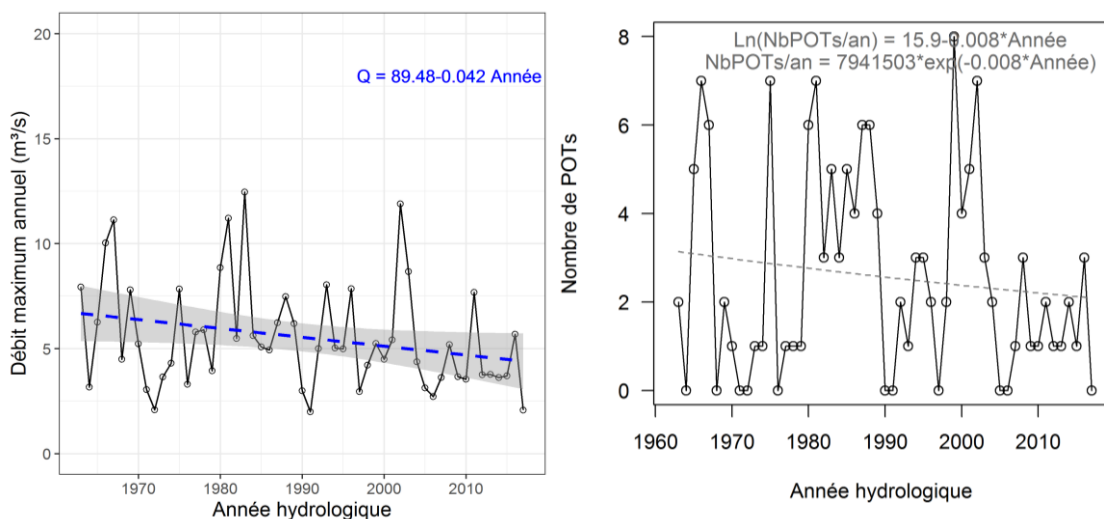


Figure 73. Maximums annuels simulés et nombre de POTs simulés par an à Saint-Rémy-Geest pour la période 1963-2017, avec régression linéaire et régression de Poisson respectivement.

La tendance dans les coefficients de ruissellement annuel est négative et significative, et est très similaire selon qu'il est calculé avec les débits observés ou simulés (Figure 74).

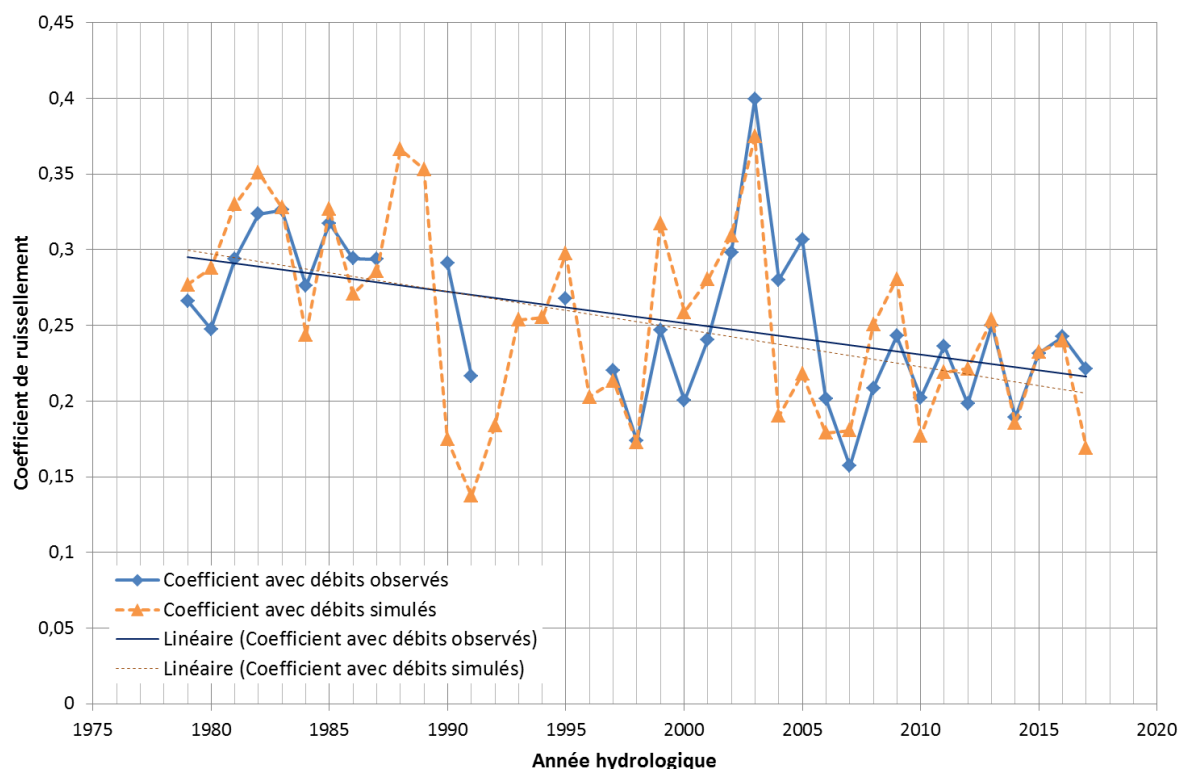


Figure 74. Coefficients de ruissellement à Saint-Rémy-Geest, calculés à partir des débits observés ou simulés.

Pour Saint-Rémy-Geest, on peut conclure que l'augmentation de l'évapotranspiration permet, en partie, d'expliquer l'évolution des débits mais ne suffit pas. Des changements d'occupation du sol, causant un ralentissement du transfert des ruissellements vers l'exutoire, ont probablement eu lieu. La mise en service de la STEP de Jodoigne semble toutefois avoir peu d'influence sur l'évolution des débits de crue car on ne remarque rien de particulier dans la modélisation en 2004 (les débits simulés sont, comme les débits observés, aussi plus faibles après 2004 par exemple). Les changements semblent plutôt avoir eu lieu vers 1997.

Discussion

La modélisation nous permet de conclure que l'évolution des facteurs climatiques (précipitations et ETP en particulier) est le facteur principal responsable des tendances dans les débits de crue à Daverdisse, Sauheid et Wanze, mais n'est cependant pas suffisante pour expliquer l'évolution des débits de crue à Mabompré, Sainte-Marie et Saint-Rémy-Geest. Pour ces bassins versants, nous avons donc émis différentes hypothèses en concertation avec les gestionnaires des cours d'eau et avons analysé les données disponibles afin de les vérifier.

Pour Mabompré, on suspecte un changement dans l'occupation du sol vers 1989. Nous n'avions pas détecté de changements importants dans notre analyse des différentes occupations du sol mais il ne faut pas oublier que ces données étaient assez récentes (1990-2010 pour les données de surface bâties et 1998-2017 pour les données de surfaces agricoles).

Une première hypothèse est l'influence des coupes à blanc. Il est possible qu'il y ait eu des coupes rases et que le ratio interception/ruissellement des forêts ait évolué en fonction de l'âge du peuplement. Près de 40% du bassin versant est forestier, avec probablement principalement des peuplements d'épicéas dont l'interception est grande lorsque ceux-ci sont âgés du fait de leur grande

densité. De plus, 1989 correspond à l'année durant laquelle il y a eu de grosses tempêtes qui ont abattus de nombreux arbres. Les orthophotoplans ci-dessous, datant de 1971, 1998-1999 et 2016, montrent toutefois un mixte de forêts matures, de coupes à blanc et de forêts en train de se régénérer dans les zones forestières du bassin. Les coupes à blanc se succèdent dans le bassin versant au fil des années, sur des surfaces relativement petites, mais aucun effet majeur des tempêtes de 1989 n'apparaît clairement.





Figure 75. Orthophotoplans d'une zone forestière du bassin versant de Mabompré (environ 40km², soit 13% de la surface totale) datant respectivement de 1971, 1998-1999 et 2016.

Nous avons également vérifié la possible influence des prélèvements d'eau souterraine en analysant les quantités prélevées chaque année (données provenant du SPW - Direction des Eaux souterraines). Aucune augmentation des prélèvements (qui pourrait contribuer à une diminution des débits) n'a été détectée. Les données ne sont toutefois disponibles que depuis 1991.

La dernière hypothèse est un problème dans les données d'entrée. Lorsque l'on décompose le coefficient de ruissellement en cumuls des débits et cumuls des précipitations (Figure 76), on voit clairement que les cumuls des débits observés sont plus élevés pour la période 1979-1988 alors que les précipitations restent constantes. Nous avons donc exploré les données de précipitations.

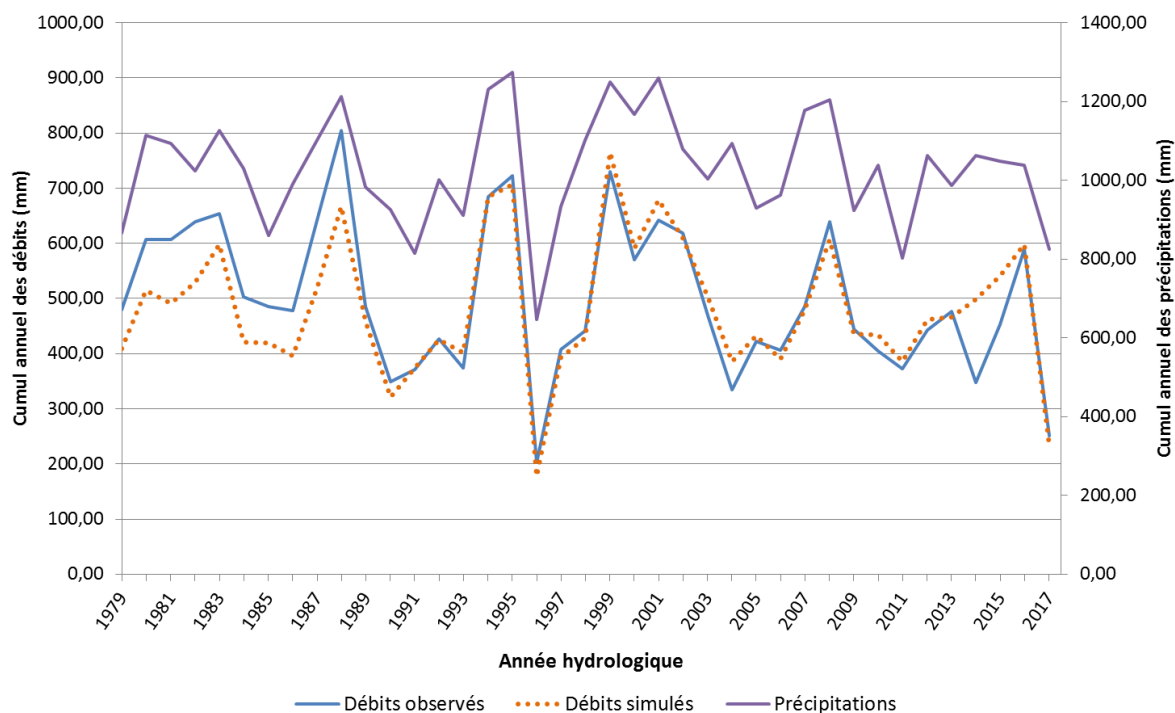


Figure 76. Evolution des cumuls annuels des débits observés, débits simulés et précipitations à Mabompré.

Les données de précipitations sont potentiellement une source d'erreur importante car le dénivelé sur le bassin est de 360 m (Figure 77). Hors, une station située en altitude, à Tailles, a été en service sur une courte période (1989-1995) et impacte fortement les données. En effet, les cumuls annuels de cette station sont de 120 à 330 mm supérieurs aux cumuls des autres stations du BV (Figure 78), ce qui engendre une différence moyenne de presque 60 mm dans la moyenne des cumuls annuels du BV selon que l'on inclut ou non les données de la station de Tailles (Figure 79). Pour donner une idée d'ordre de grandeur, la différence entre les cumuls annuels des débits simulés et des débits observés avant 1989 varie entre 57 et 138 mm. De plus, les tendances dans les erreurs et le coefficient de ruissellement ne sont pas significatives si les données avant 1989 ne sont pas prises en compte.

Il s'agit donc de la piste la plus probable pour expliquer les divergences entre modélisation et observation. Cela appelle à une prise en compte des altitudes lors du déploiement des stations pluviographiques.

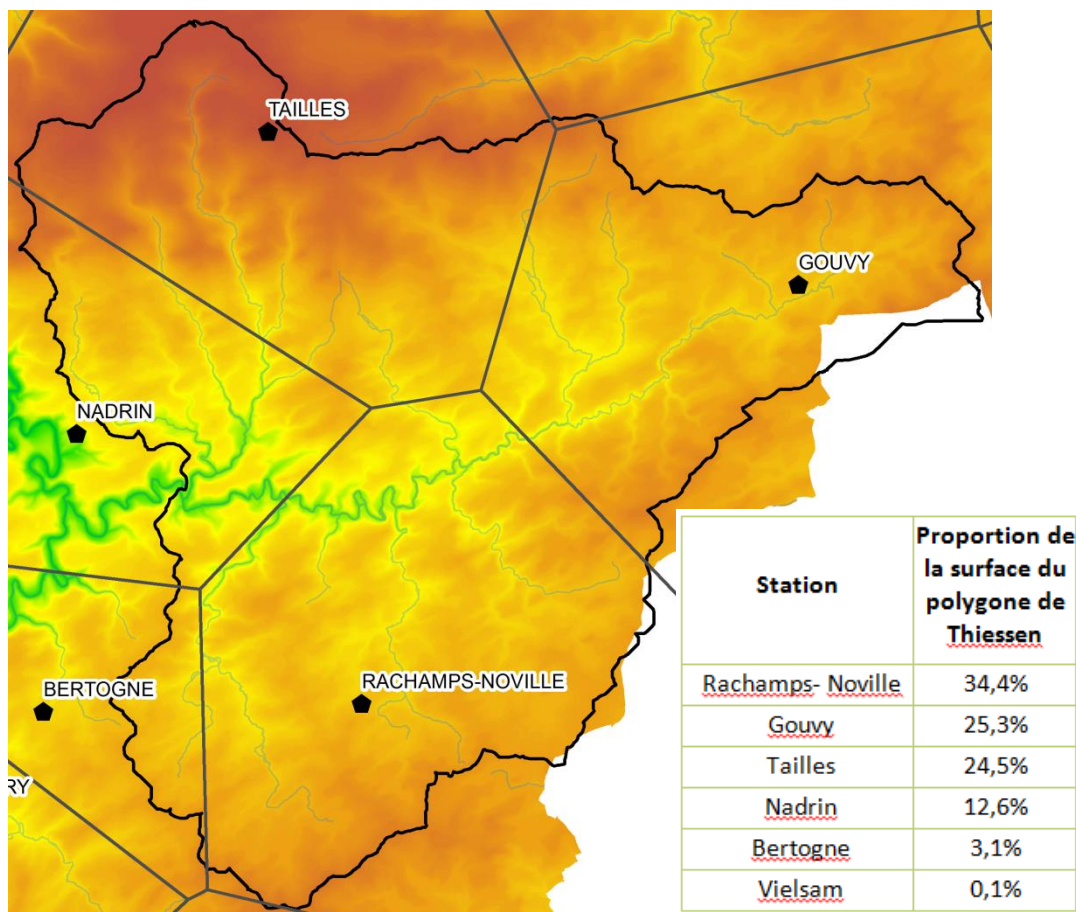


Figure 77. Localisation des 5 stations météorologiques intervenant dans les calculs des précipitations à Mabompré, sur fond topographique, avec leurs polygones de Thiessen.

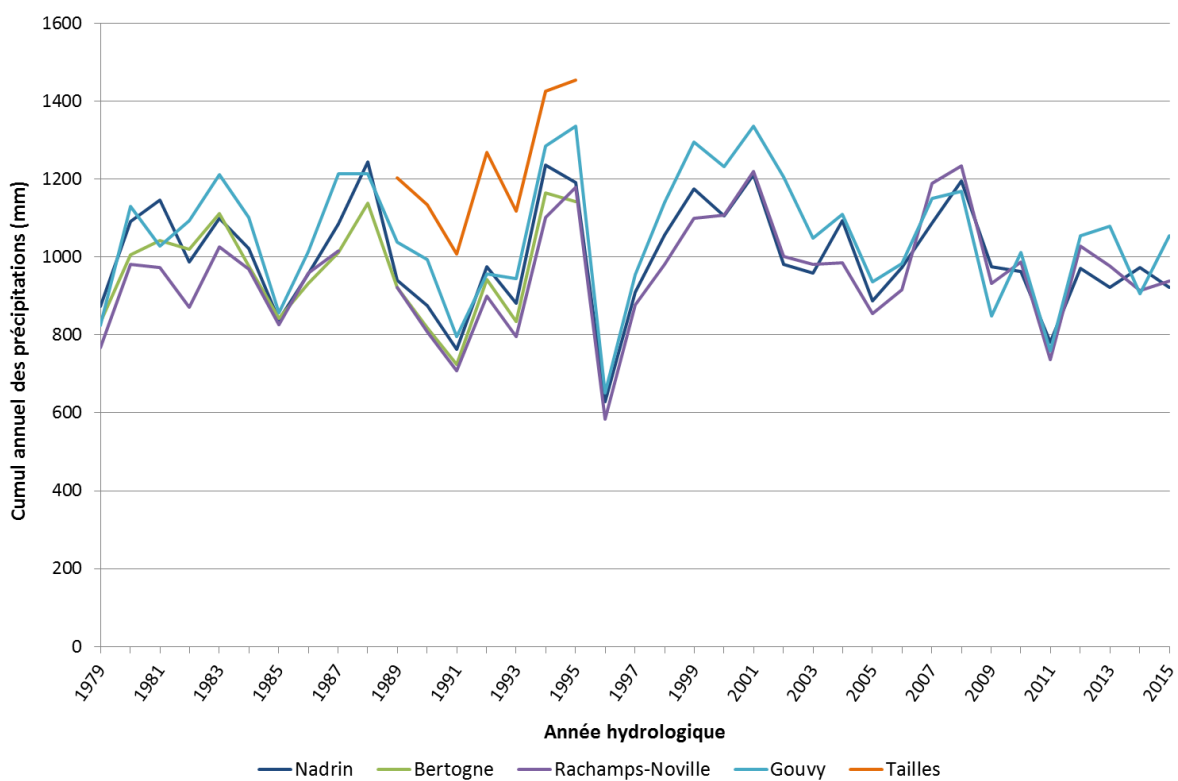


Figure 78. Evolution des cumuls annuels des précipitations aux 5 stations de mesure du bassin versant de Mabompré.

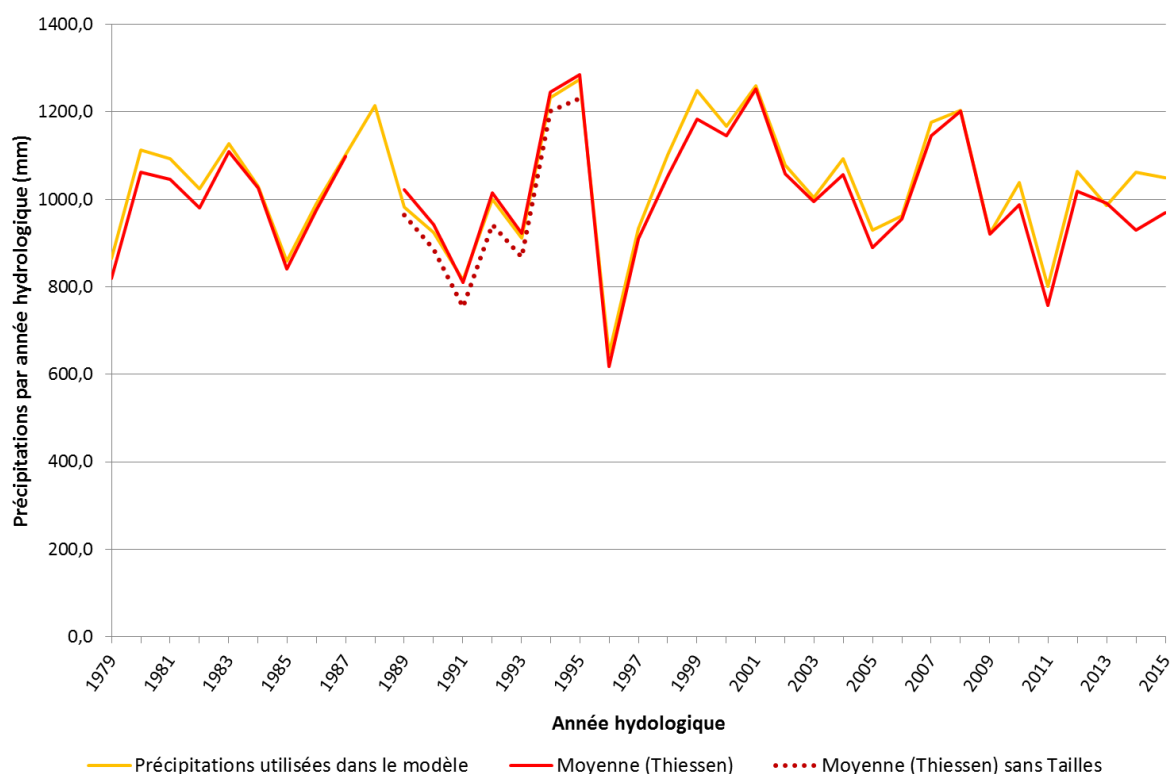


Figure 79. Comparaison des cumuls annuels des précipitations à Mabompré avec et sans la station de Tailles.

Le bassin versant de Mabompré avait initialement été sélectionné pour la modélisation afin de confirmer les résultats pour le bassin de Sauheid qui était possiblement influencé par les barrages en amont de la station de mesure. Les résultats de ces deux bassins sont finalement très différents, mais c'est Mabompré, et non Sauheid, qui est influencé par des facteurs autres que les facteurs climatiques. La plus grande superficie du bassin de Sauheid y joue certainement un rôle (effet « tampon »).

Pour Sainte-Marie, nous recherchons aussi des facteurs probablement lié à l'occupation du sol, qui participent à la diminution de la fréquence des crues.

Nous avons également analysé les quantités d'eau souterraine prélevées, mais aucune tendance n'a été détectée (données disponibles à partir de 1991).

Une des hypothèses est l'installation du réseau d'égouttage car celui-ci collecte une partie des eaux de ruissellement qui auparavant allaient directement à la rivière. Il existe, sur le bassin versant de Sainte-Marie, plusieurs stations d'épuration avec leur réseau de collecteurs respectif ; deux sont particulièrement d'intérêt : Etalle, située juste en amont de la station de Sainte-Marie, et Arlon, plus en amont mais de plus grande capacité (32000 équivalents habitant). Etalle a été mise en service en 2014, et Arlon en 1982 puis modernisée en 2007. Ces dates ne correspondent toutefois pas à des changements visibles dans les débits de crue ou leur fréquence (Figure 80).

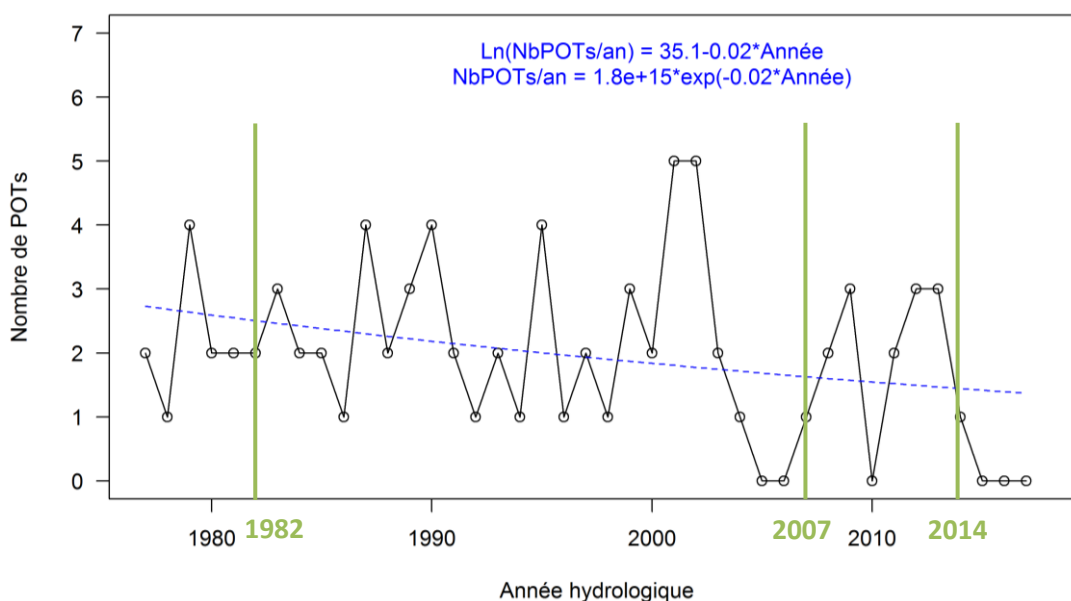


Figure 80. Evolution du nombre de POTs observés entre 1977 et 2017.

Une autre hypothèse est l'influence des transferts d'eau souterraine entre deux bassins versants, ceux-ci n'étant pas pris en compte dans le modèle. Cependant, les transferts se font depuis la Chiers vers la Semois. Il y a donc un apport d'eau supplémentaire dans le bassin de Sainte-Marie, ce qui expliquerait pourquoi les bas débits sont sous-estimés, mais cela n'explique néanmoins pas les différences entre les cumuls annuels des débits observés et simulés étant donné que les débits sont surestimés par le modèle.

Enfin, pour Saint-Rémy-Geest, on recherche un ou plusieurs facteurs influençant la dynamique de l'écoulement dans le bassin versant, avec un changement probable vers 1997.

Il faut tout d'abord noter que cette station de mesure est affectée par le développement d'algues en période estivale, ce qui explique très certainement la différence entre débits mesurés et modélisés en été.

L'hypothèse de l'installation du réseau d'assainissement a déjà été rejetée.

Nous avons alors comparé les orthophotoplans de 1971 et 2016 : le seul changement clairement visible est l'augmentation de la taille des parcelles agricoles (Figure 81). Ceci devrait pourtant contribuer à augmenter les quantités d'eau ruisselées, et ne participe donc pas à la diminution des débits dans ce bassin.

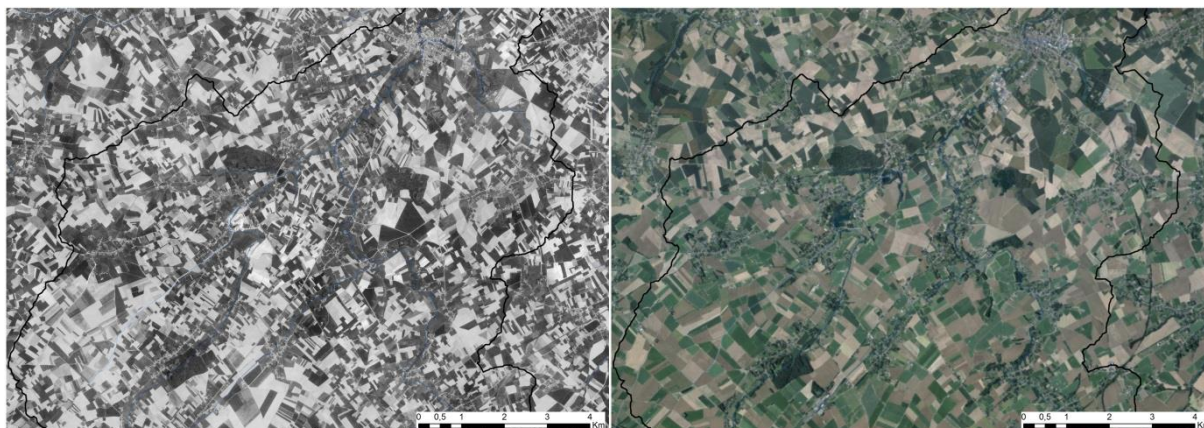


Figure 81. Comparaison des orthophotoplans de 1971 (gauche) et 2016 (droite) pour la partie nord du bassin versant de Saint-Rémy-Geest.

Prospection

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu des impacts potentiels de la non-stationnarité des débits de crue sur la gestion de ceux-ci en région wallonne. Ces impacts sont potentiellement nombreux étant donné que les résultats de l'analyse fréquentielle sont utilisés, entre autres, pour la modélisation hydrologique, la création des cartes des aléas d'inondation, le dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations, ...

Nous avons pris l'exemple de Daverdisse où une augmentation des débits de crue liée à une augmentation des précipitations a été observée, et avons estimé l'impact, sur la crue centennale, des changements climatiques prédits jusque 2050.

Nous avons également tenté de « régionaliser » les résultats de tendances afin de pouvoir prédire si les hauts débits à d'autres localisations que celles analysées dans cette étude sont susceptibles d'avoir augmenté ou diminué.

Impacts des changements climatiques futurs à Daverdisse

Pour estimer l'impact des changements climatiques futurs sur les crues à Daverdisse, nous avons de nouveau utilisé le modèle GR4J, calibré sur les données observées, pour simuler les débits à partir des données de précipitations et ETP prédites jusque 2050. Ces données prédites proviennent originalement du projet CORDEX (COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment), financé par le Programme mondial de recherches sur le climat. Elles ont d'abord été réduites à l'échelle de la Belgique grâce au modèle régional ALARO-0 puis extraites pour le bassin versant de Daverdisse (moyenne des données pour les mailles le constituant) via le modèle EPICgrid.

Il existe 4 scénarios ou « profils représentatifs d'évolution de concentration » (Representative Concentration Pathway, RCP) en fonction du niveau d'émission des gaz à effet de serre et donc de notre consommation énergétique globale : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5, nommés en fonction du forçage radiatif en 2100 (+2,6 W/m² pour le scénario RCP 2.6, etc) (van Vuuren et al., 2011). Plus les radiations sont élevées, plus le système terre-atmosphère se réchauffe. La Figure 82 montre, pour les différents scénarios, l'évolution des émissions de CO₂ et de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère. Le scénario 8.5 est le scénario le plus pessimiste, faisant l'hypothèse que les émissions vont continuer de croître et que la concentration en CO₂ ne cessera d'augmenter. Le scénario 6.0 tient compte de l'application de certaines mesures de mitigation ; la concentration en CO₂ augmenterait tout de même mais moins rapidement que pour le scénario 8.5 et se stabiliserait après 2100. Pour le scénario 4.5, les émissions seraient d'abord plus élevées que pour le scénario 6.0, atteindraient un pic vers 2040 puis diminueraient ; la concentration en CO₂ serait donc d'abord plus élevée que pour le scénario 6.0 puis se stabiliserait à un niveau plus faible un peu après 2100. Le scénario 2.6 est le plus ambitieux, tenant compte de mesures de mitigation importantes prises dès maintenant qui réduiraient à zéro les émissions d'ici 2100 et permettraient de limiter le réchauffement planétaire à 2°C ; la concentration de CO₂ atteindrait son maximum vers 2050 puis diminuerait lentement. Le Tableau 18 présente les estimations, pour les différents scénarios, de l'augmentation de la température moyenne globale par rapport à la période de référence 1986-2005.

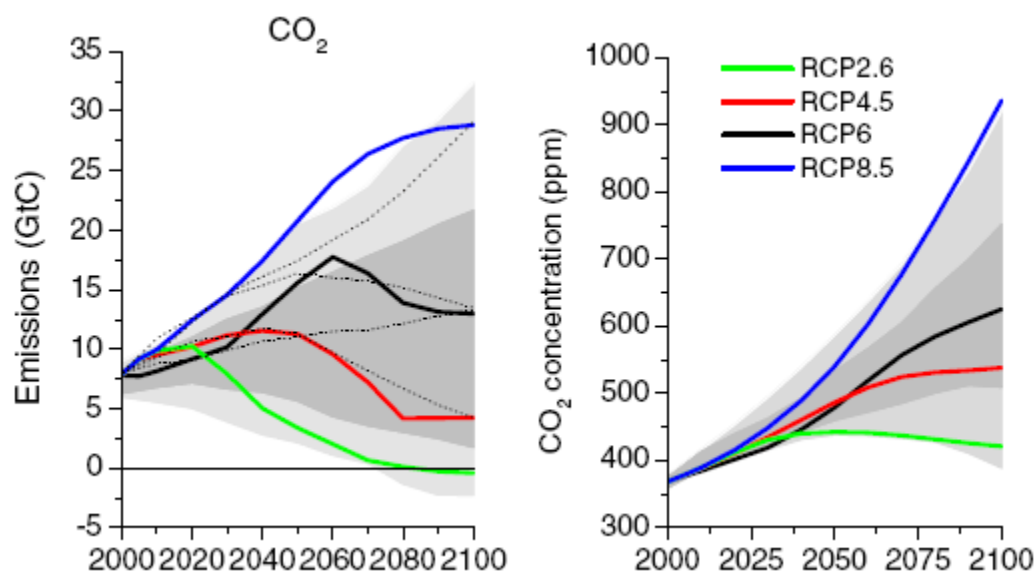


Figure 82. Evolution des émissions de CO₂ (gauche) et de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère (droite) pour les différents scénarios (van Vuuren et al., 2011).

Tableau 18. Estimations de l'augmentation de la température moyenne globale par rapport à la période de référence 1986-2005, pour les différents scénarios (IPCC, 2013).

		2046–2065		2081–2100	
	Scenario	Mean	<i>Likely range</i> ^c	Mean	<i>Likely range</i> ^c
Global Mean Surface Temperature Change (°C) ^a	RCP2.6	1.0	0.4 to 1.6	1.0	0.3 to 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 to 2.0	1.8	1.1 to 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 to 1.8	2.2	1.4 to 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 to 2.6	3.7	2.6 to 4.8

Il arrive souvent que, même si les modèles climatiques sont très performants à l'échelle régionale, des biais assez importants apparaissent au niveau local entre les données observées et les données simulées pour une période historique. Ceci est notamment dû à l'utilisation de modèles globaux pour les conditions aux limites des modèles régionaux (Addor and Seibert, 2014). C'est le cas pour le modèle ALARO-0.

Pour la température moyenne annuelle à Daverdisse, nous observons une sous-estimation d'environ 2,5°C (Figure 83). Les tendances sont toutefois similaires. Au niveau des précipitations, un delta d'environ 200 mm apparaît pour les précipitations totales annuelles (Figure 84). La répartition dans l'année est également relativement éloignée des observations (jusqu'à 50% de différence sur les cumuls mensuels en été).

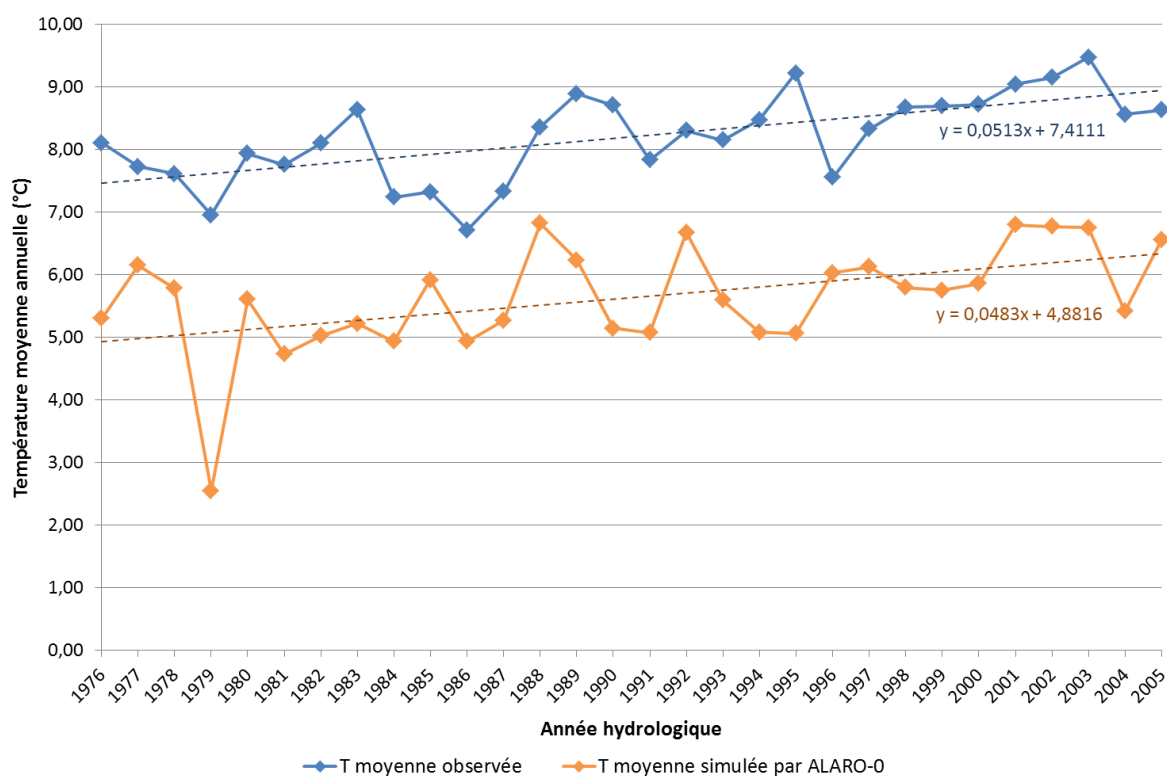


Figure 83. Comparaison des températures moyennes annuelles observées et simulées par le modèle ALARO-0.

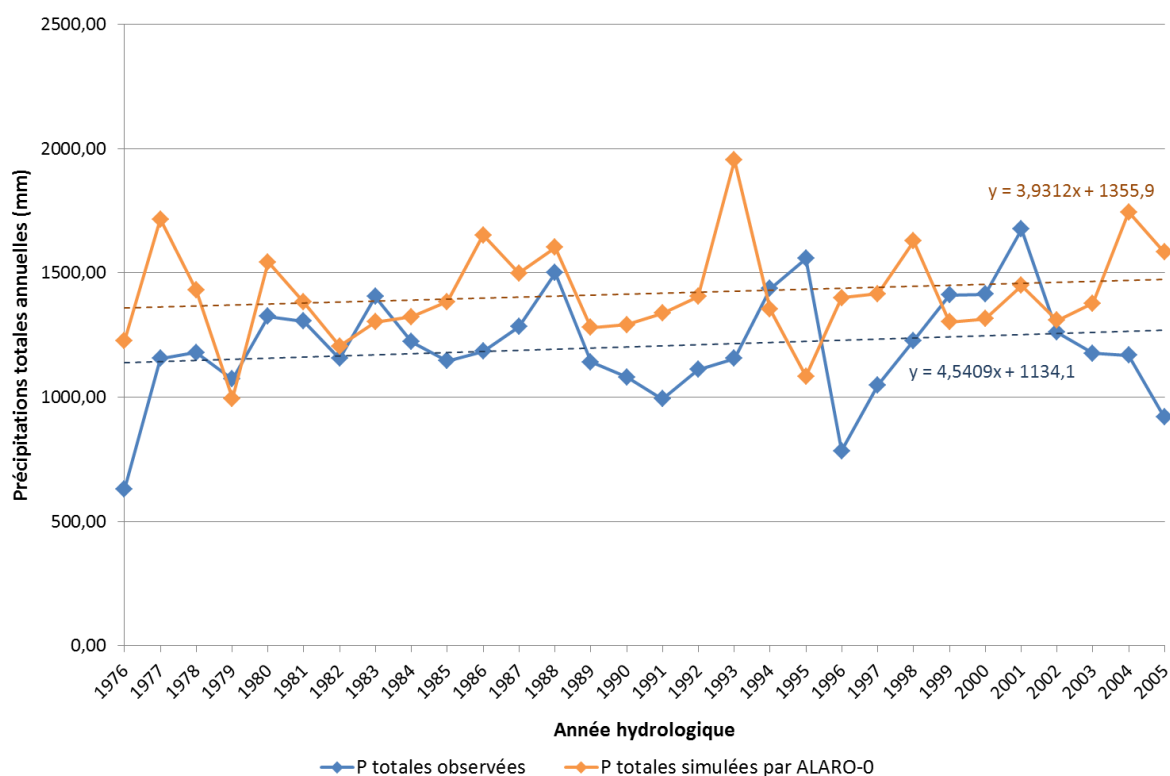


Figure 84. Comparaison des précipitations totales annuelles observées et simulées par le modèle ALARO-0.

De ce fait, utiliser les scénarios prospectifs à la suite des données observées n'est pas possible. En effet, ces différences engendrent un saut dans les données d'entrée du modèle entre la période d'observation (1962-2018) et la période de prédiction (2019-2050), comme le montre le graphique ci-dessous pour l'évapotranspiration totale annuelle à Daverdisse.

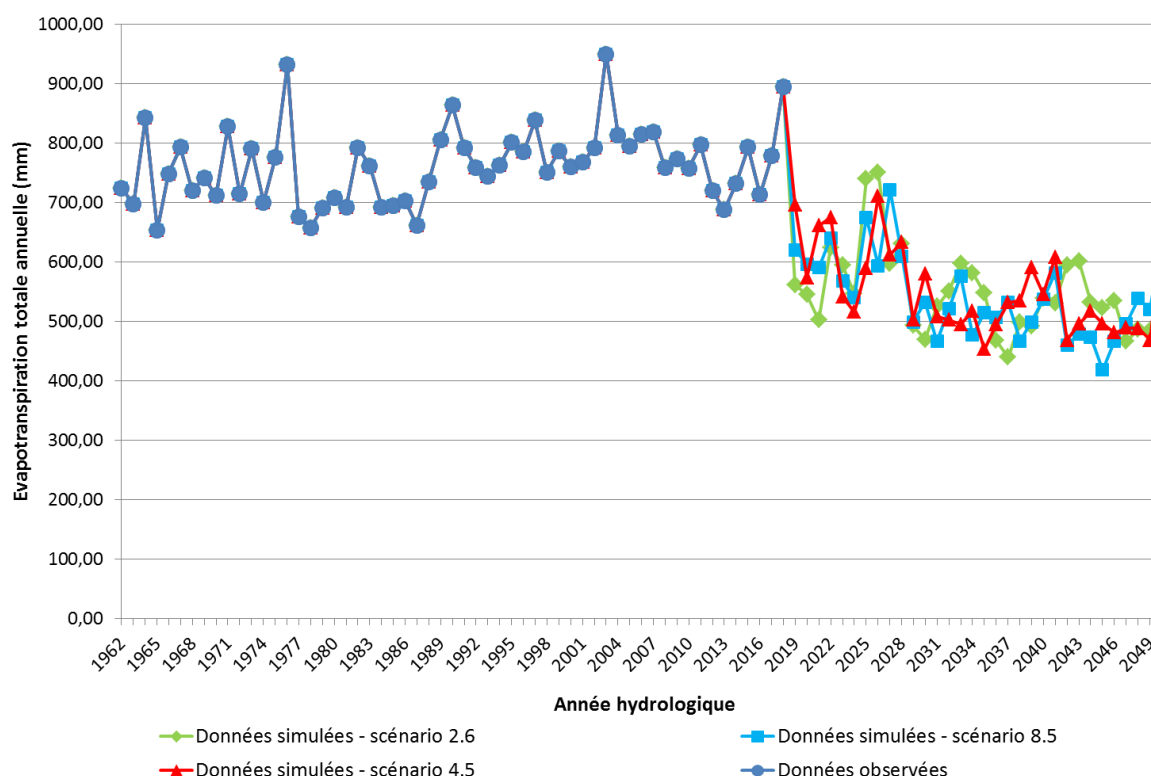
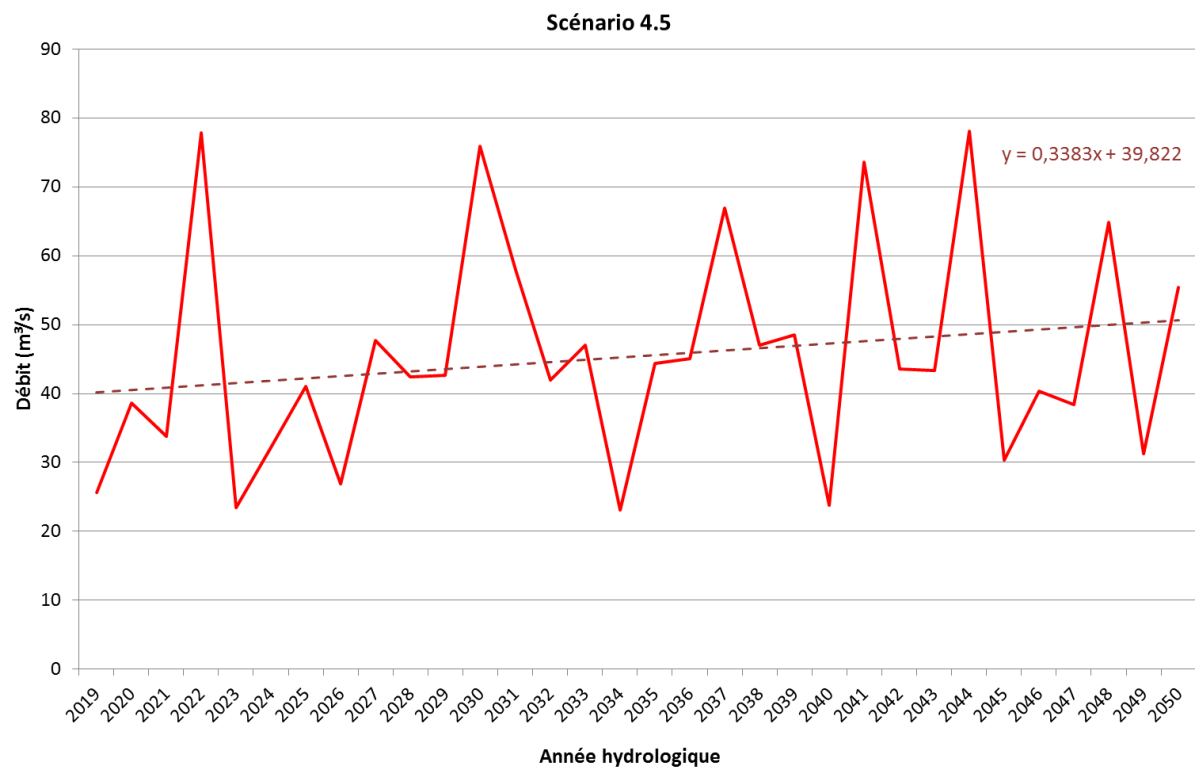
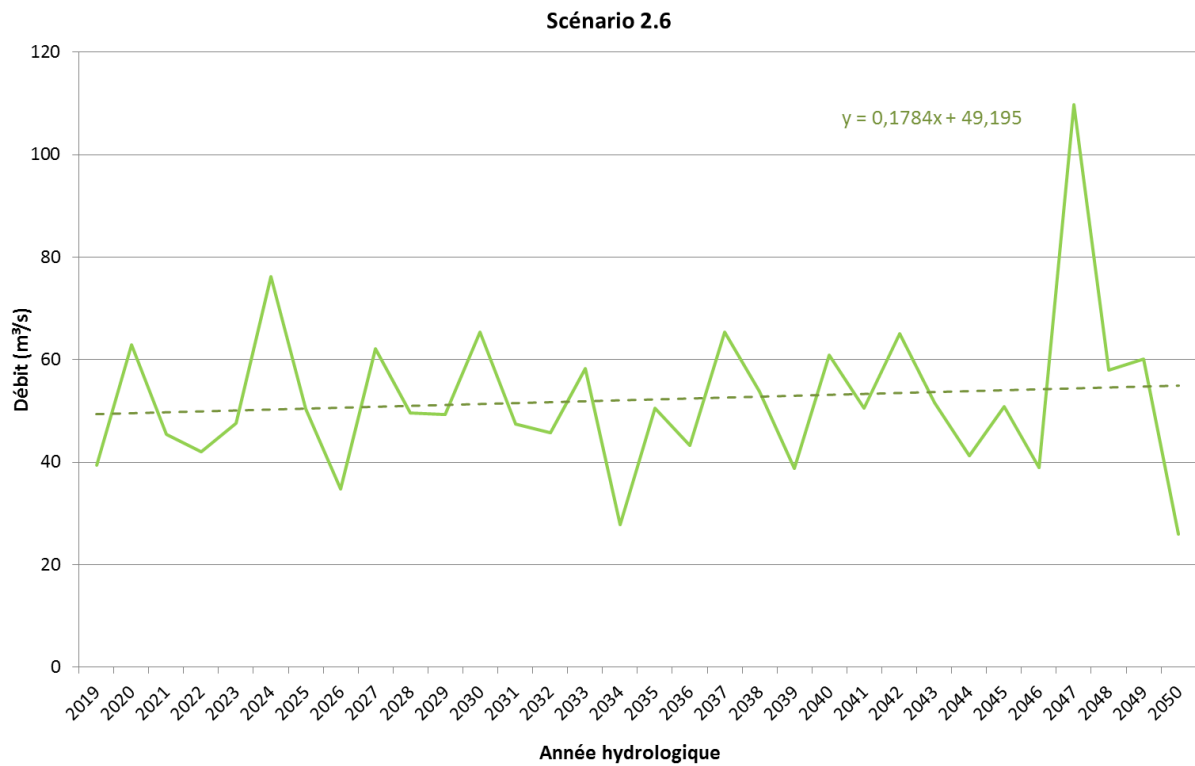


Figure 85. Comparaison des évapotranspirations totales annuelles calculées à partir des données observées d’une part et des données simulées par le modèle ALARO-0 d’autre part.

Il est possible de corriger le biais c’est-à-dire corriger les données prédites sur base des différences entre les données observées et les données simulées sur une période historique. Il existe cependant de nombreuses méthodes de correction de biais (delta approach, quantile mapping, multivariate bias correction, etc). Chaque méthode a ses limitations et il est donc important de bien les connaître avant d’utiliser les données simulées corrigées dans une étude d’impact. De plus, cette correction ajoute un niveau supplémentaire d’incertitude aux analyses qu’il est préférable d’évaluer (EURO-CORDEX community, 2017). La correction du biais est en fait un champ de recherche à part entière et la recherche de la méthode la plus appropriée à nos données sort du cadre de cette étude.

Nous pouvons toutefois comparer les données prédites sous les différents scénarios aux données simulées sur la période historique. Nous avons d’abord évalué la tendance sur les maximums annuels des débits simulés par le modèle GR4J pour la période 2019-2050 pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (nous ne disposons pas des données pour le scénario RCP 6.0). Les graphiques ci-dessous montrent l’évolution de ces maximums annuels pour les 3 scénarios. La tendance est positive dans les 3 cas, mais elle est significative uniquement pour le scénario 8.5.



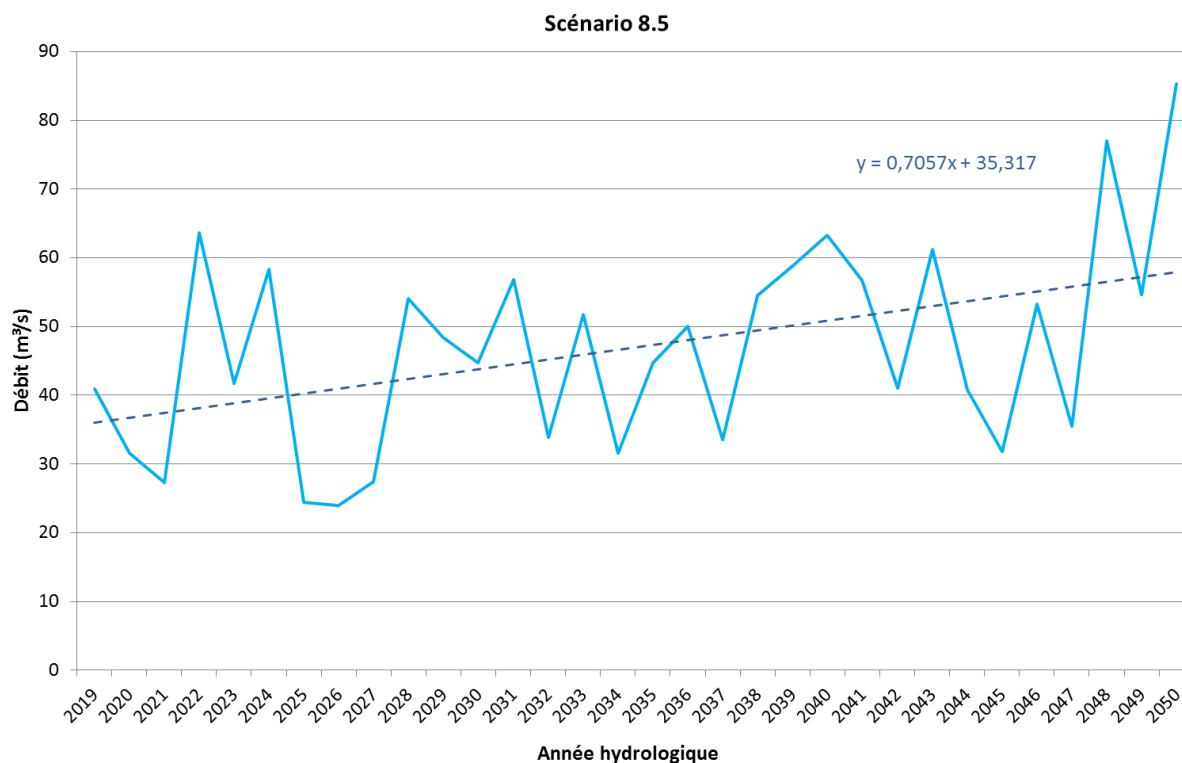


Figure 86. Evolution des maximums annuels des débits simulés entre 2019 et 2050 pour les 3 scénarios : 2.6, 4.5 et 8.5 respectivement.

Nous avons ensuite réalisé une analyse fréquentielle sur les débits simulés sur la période 1977-2017 d'une part et sur la période 2020-2050 d'autre part afin de les comparer (Figure 87). Le facteur d'amplification de la crue centennale est de 1,2, c'est-à-dire que la crue centennale pour la période 2020-2050 est 20% plus élevée que la crue centennale pour la période 1977-2017.

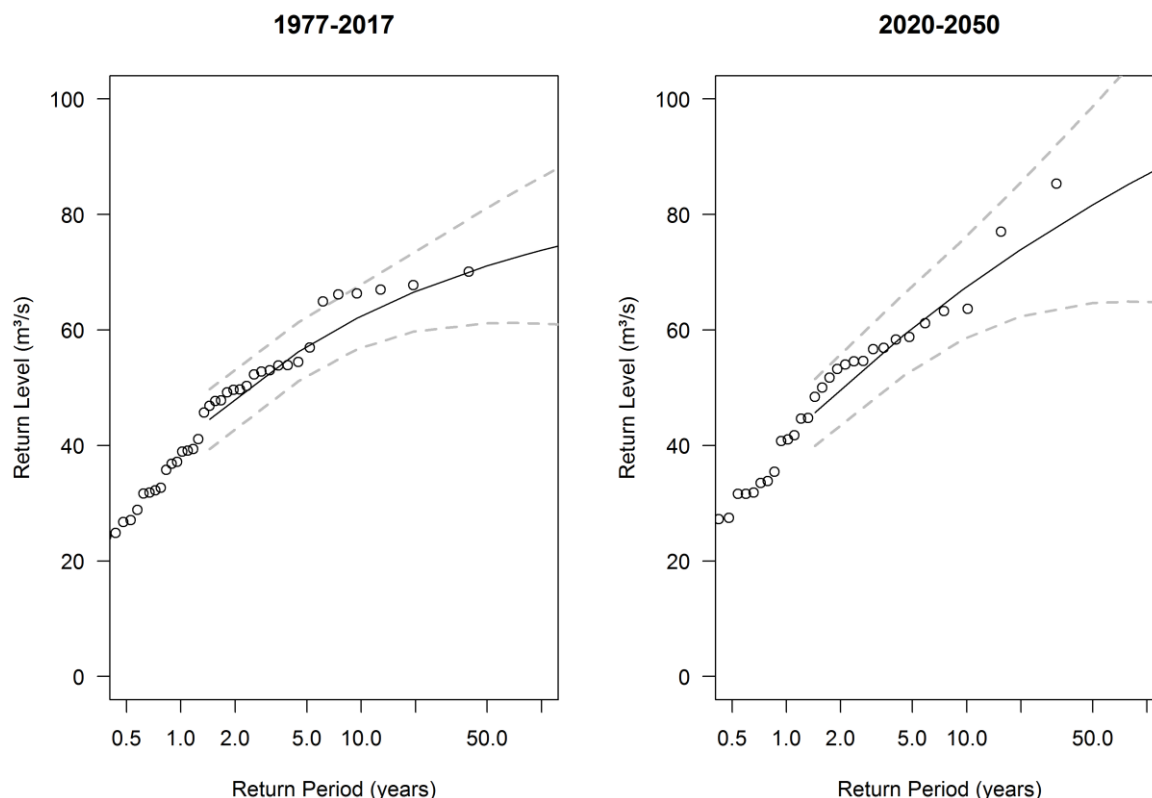


Figure 87. Comparaison des graphiques débits-période de retour pour les maximums annuels simulés sur les périodes 1977-2017 et 2020-2050.

Régionalisation des résultats

Dans un premier temps, nous avons identifié 4 zones en fonction de la localisation des différentes tendances (Figure 88). La première zone est le bassin de l'Escaut où, à l'exception de Saint-Rémy-Geest, les tendances dans les débits de crue sont positives. On y observe pourtant une augmentation générale de l'évapotranspiration, mais aussi des précipitations pour certains sous-bassins. Les rivières dans cette région ont également subi plus de remaniement anthropique que dans le reste de la Wallonie. La deuxième zone correspond au sillon Sambre et Meuse, incluant l'aval de la Lesse. Pour cette zone, peu de tendances ont été détectées mais certains sous-bassins montrent une tendance négative dans les débits de crue, certainement liée à une augmentation de l'évapotranspiration. La troisième zone inclut les bassins versants de l'Ourthe, de l'Amblève, de la Vesdre et le sud de la région où les tendances sont négatives aussi bien dans les débits de crue que dans les précipitations. La quatrième zone comprend l'amont de la Lesse, l'aval de la Semois et le Viroin. On y observe une augmentation des débits de crue, certainement liée à une augmentation des précipitations.

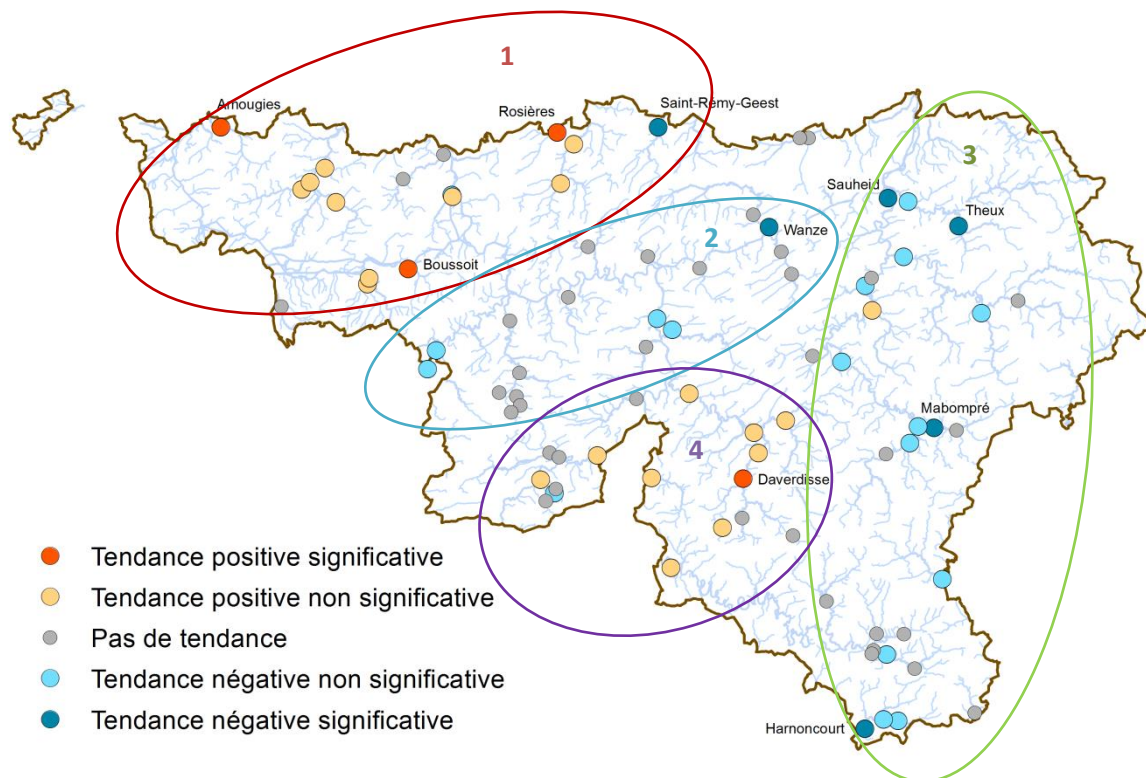


Figure 88. Carte des tendances dans les maximums annuels, montrant les 4 zones identifiées.

Nous avons ensuite effectué une analyse en composantes principales (ACP) pour tenter de mieux caractériser ces zones et identifier des liens entre des groupes de variables et le type de tendance observée. Les variables prises en compte sont l'altitude de la station de mesure, la superficie du bassin versant et les moyennes interannuelles des paramètres climatiques et d'occupation du sol analysés dans cette étude. Le cercle de corrélation des deux premières composantes montre une opposition assez forte entre, d'une part, les variables de précipitations, neige, l'altitude, les surfaces forestières et les prairies (Agri_PR), et d'autre part la température, l'ETP, les surfaces agricoles et les surfaces bâties (Figure 89). Les deux premières composantes représentent 75,6% de la variabilité totale (66,4% pour la première et 9,2% pour la deuxième). Les variables climatiques contribuent légèrement plus à ces deux premières composantes que les variables d'occupation du sol. La superficie et les surfaces agricoles à risque moyen n'y contribuent que très peu. Sur le graphique des individus (Figure 90), on peut voir une séparation claire entre le nord et le sud de la région. Les sous-bassins de l'Escaut sont situés du côté négatif de la première composante et sont donc plutôt caractérisés par des températures, évapotranspirations, proportions de surfaces agricoles et de surfaces bâties plus élevées. A l'opposé, les sous-bassins du sud et est du pays, où l'altitude est plus élevée et recevant une plus grande quantité de pluie et neige, sont plutôt dominés par des forêts et prairies. Les bassins du sillon Sambre et Meuse se retrouvent au milieu du graphique et sont donc caractérisés par des paramètres moyens. La deuxième composante permet surtout de mettre en évidence les bassins les plus urbanisés dans le bassin de l'Escaut (Rosières, Boussoit et Ronquières).

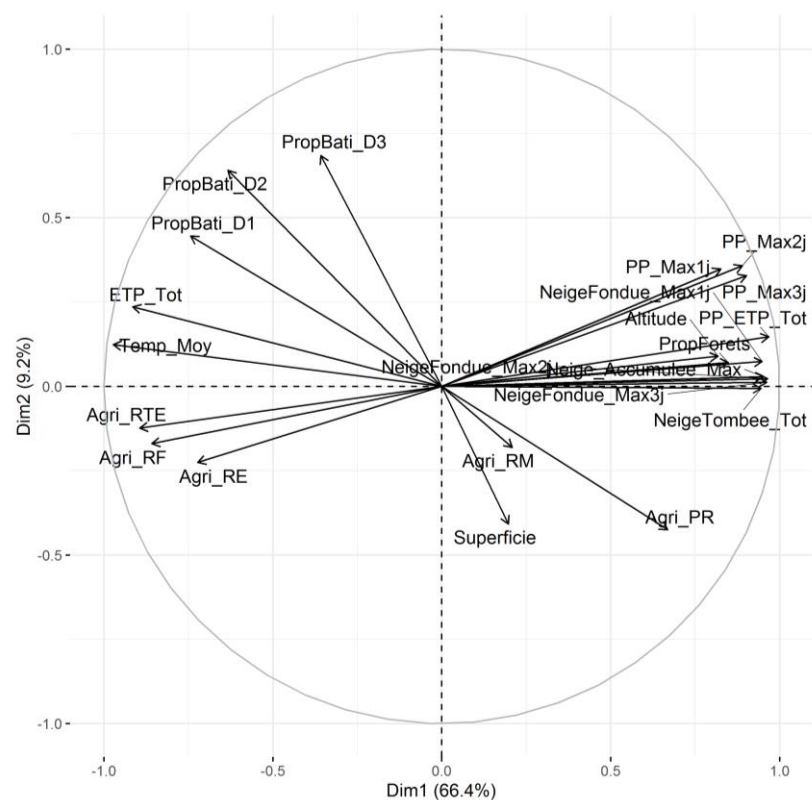


Figure 89. Cercle des corrélations de l'ACP sur les variables climatiques et d'occupation du sol.

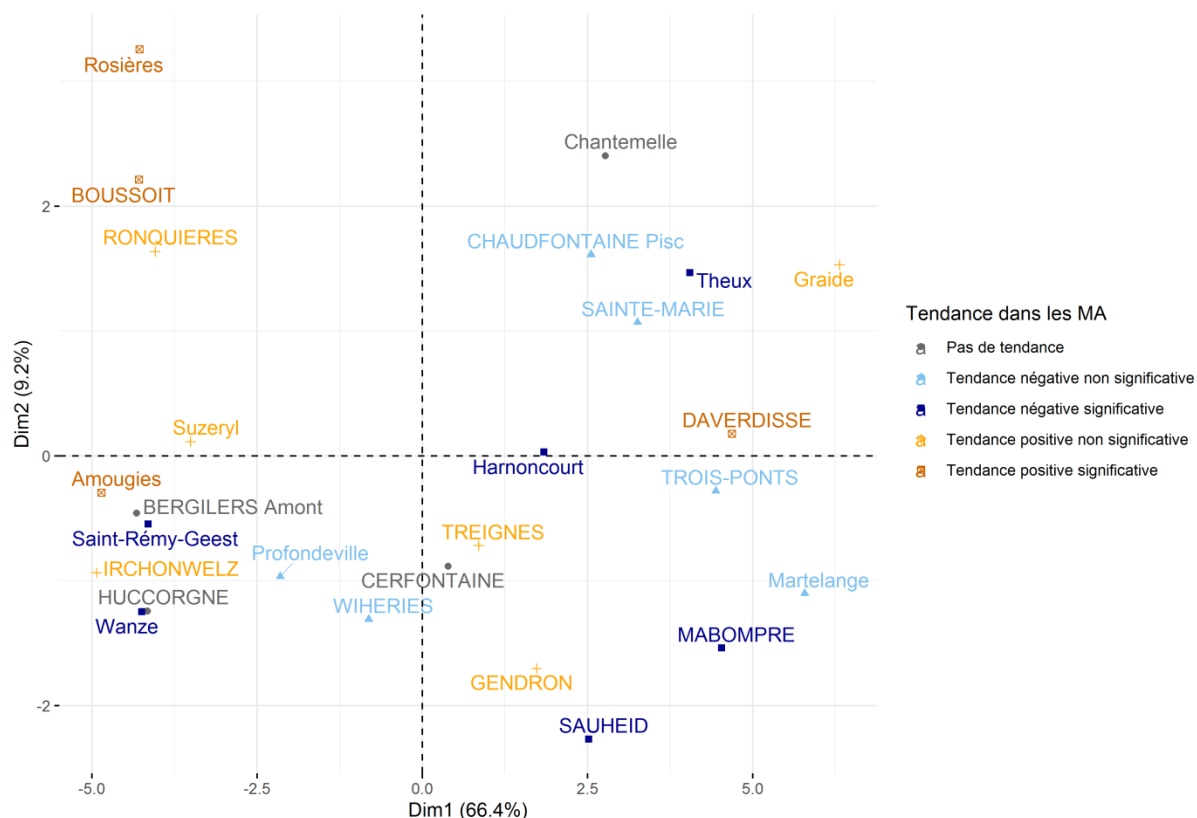


Figure 90. Graphique des individus de l'ACP sur les variables climatiques et d'occupation du sol.

Ces résultats sont très similaires à ceux obtenus pour la régionalisation des débits d'étiage (Grandry et al., 2012). Celle-ci avait toutefois aussi pris en compte la percolation et les groupes hydrologiques des sols (basés sur leur capacité d'infiltration), ce qui avait permis de distinguer la

région du sud de la Province du Luxembourg du reste des Ardennes. Les régions homogènes identifiées correspondaient assez bien aux régions agro-géographiques définies par Christians (1971) sur base de la géologie, du type de sol (fertilité) et de la topographie (Figure 91, Grandry et al., 2013).

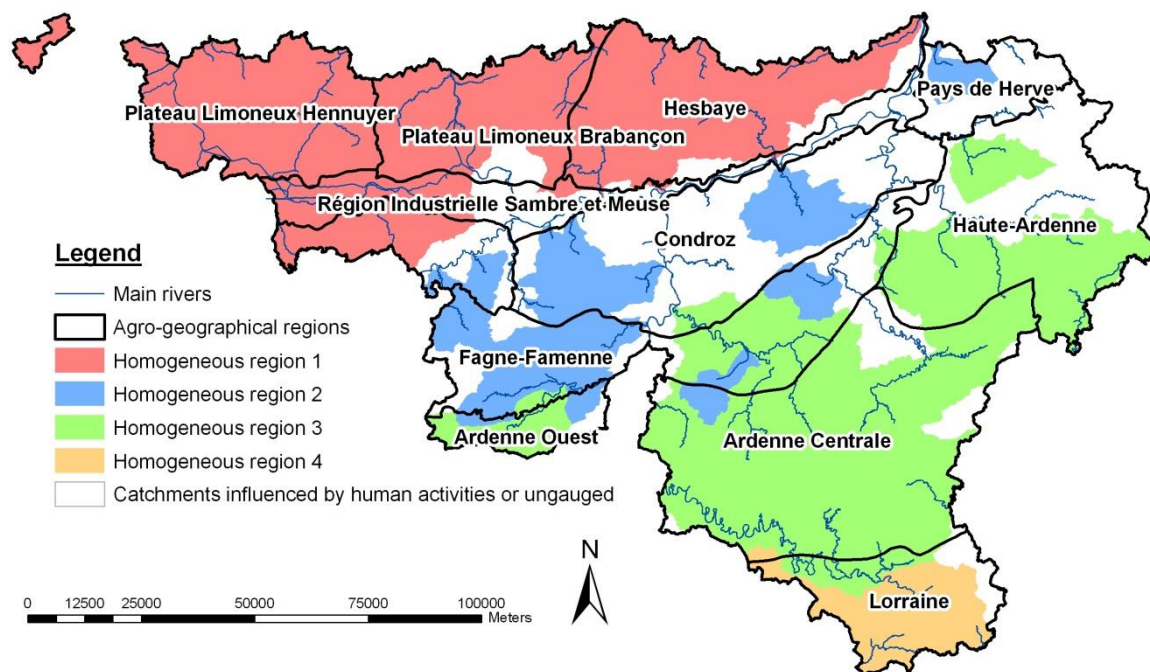


Figure 91. Carte des régions homogènes identifiées dans le projet AMICE – « Régionalisation des débits d'étiage », et des régions agro-géographiques.

Les résultats de l'ACP correspondent donc parfaitement à notre connaissance et compréhension des caractéristiques de la Wallonie et permettent de caractériser les zones 1, 2 et 3, mais ne nous aident malheureusement pas à expliquer les tendances opposées au sein de la région ardennaise (zones 3 et 4 de la Figure 88).

Nous avons alors procédé à une régression non paramétrique de type Random Forest qui a permis de mettre en relation la pente de la tendance (pente de Sen) avec les paramètres des bassins versants. Nous l'avons fait sur deux jeux de données : d'une part, les variables climatiques et d'occupation du sol disponibles pour les 26 bassins versants de cette étude, et d'autre part, les variables utilisées pour la régionalisation des débits d'étiage, disponibles pour 50 bassins versants parmi les 84 sélectionnés pour HydroTrend. La Figure 92 montre la localisation de ces 50 stations et le Tableau 19 liste les variables utilisées. Pour les variables disponibles annuellement, nous avons calculé les moyennes interannuelles pour chaque bassin versant.

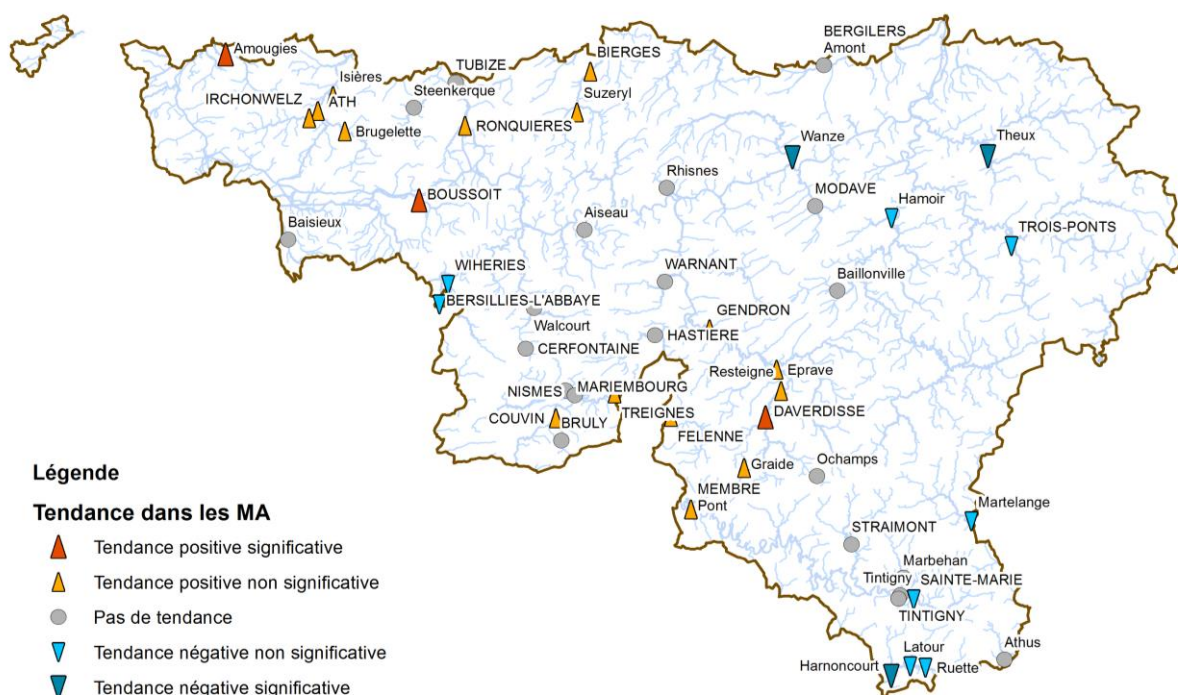


Figure 92. Localisation des 50 stations HydroTrend pour lesquelles les données du projet de régionalisation des débits d'été sont disponibles.

Tableau 19. Liste des variables utilisées pour la régression Random Forest. Les variables annuelles ont été moyennées sur toutes les années pour chaque bassin versant.

De cette étude (26 bassins versants)

- Maximum des précipitations journalières
- Maximum des précipitations journalières cumulées sur 2 jours
- Maximum des précipitations journalières cumulées sur 3 jours
- Précipitations neigeuses totales
- Quantité maximale de neige accumulée au sol
- Maximum de la quantité journalière de neige fondue
- Maximum de la quantité journalière de neige fondue cumulée sur 2 jours
- Maximum de la quantité journalière de neige fondue cumulée sur 3 jours
- Evapotranspiration potentielle
- Température moyenne
- Indice d'humidité extrême
- Proportion du bassin versant en surface bâtie de densité faible
- Proportion du bassin versant en surface bâtie de densité moyenne
- Proportion du bassin versant en surface bâtie de densité élevée
- Proportion des surfaces forestières
- Proportion des surfaces agricoles à risque de

De l'étude de régionalisation des débits d'été (50 bassins versants)

- Altitude de la station limnimétrique
- Densité de drainage (longueur de la rivière/superficie du BV)
- Percentile 10 des pentes
- Médiane des pentes
- Percentile 90 des pentes
- Proportion des territoires artificialisés
- Proportion des forêts
- Proportion des terres arables
- Proportion des cultures permanentes
- Proportion des surfaces enherbées
- Proportion de sol du groupe hydrologique A
- Proportion de sol du groupe hydrologique B
- Proportion de sol du groupe hydrologique C
- Proportion de sol du groupe hydrologique D
- Proportion de sol non classé dans un groupe hydrologique
- Précipitations moyennes interannuelles
- Précipitations moyennes hivernales (octobre - avril)
- Précipitations moyennes estivales (juillet - septembre)
- Température moyenne estivale
- Evapotranspiration potentielle

ruissellement très élevé

- Percolation moyenne interannuelle

- Proportion des surfaces agricoles à risque de ruissellement élevé

- Proportion des surfaces agricoles à risque de ruissellement moyen

- Proportion des surfaces agricoles à risque de ruissellement faible

- Proportion des surfaces agricoles à risque de ruissellement nul

Nous avons ensuite calculé l'importance des variables dans les estimations du modèle. Il en résulte que les variables qui interviennent le plus dans la variabilité de la pente de la tendance sont l'altitude et les précipitations neigeuses totales. Ces deux variables sont d'ailleurs corrélées négativement et significativement à la pente de Sen : plus l'altitude est élevée et plus la quantité de neige est élevée, plus la pente de Sen est faible, et plus la tendance est donc susceptible d'être négative (Figure 93 et Figure 94).

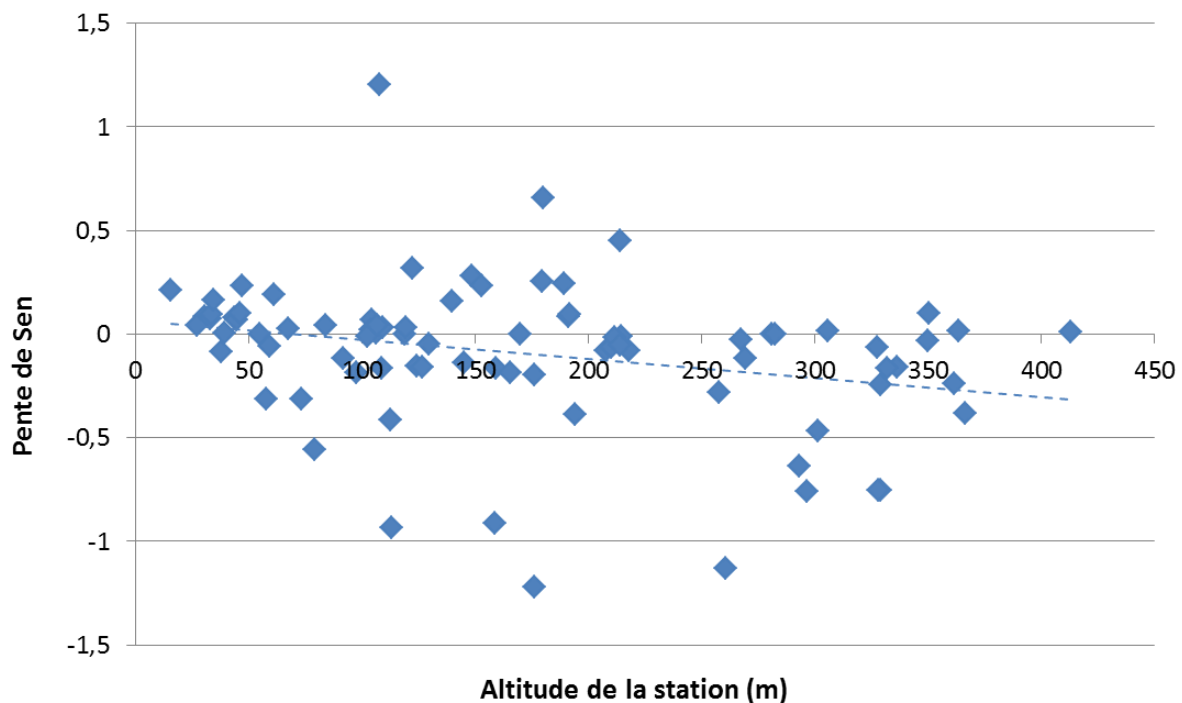


Figure 93. Graphique des corrélations entre l'altitude de la station et la pente de Sen de la tendance dans les débits maximums annuels pour 83 stations de l'étude HydroTrend 1 (outlier non représenté).

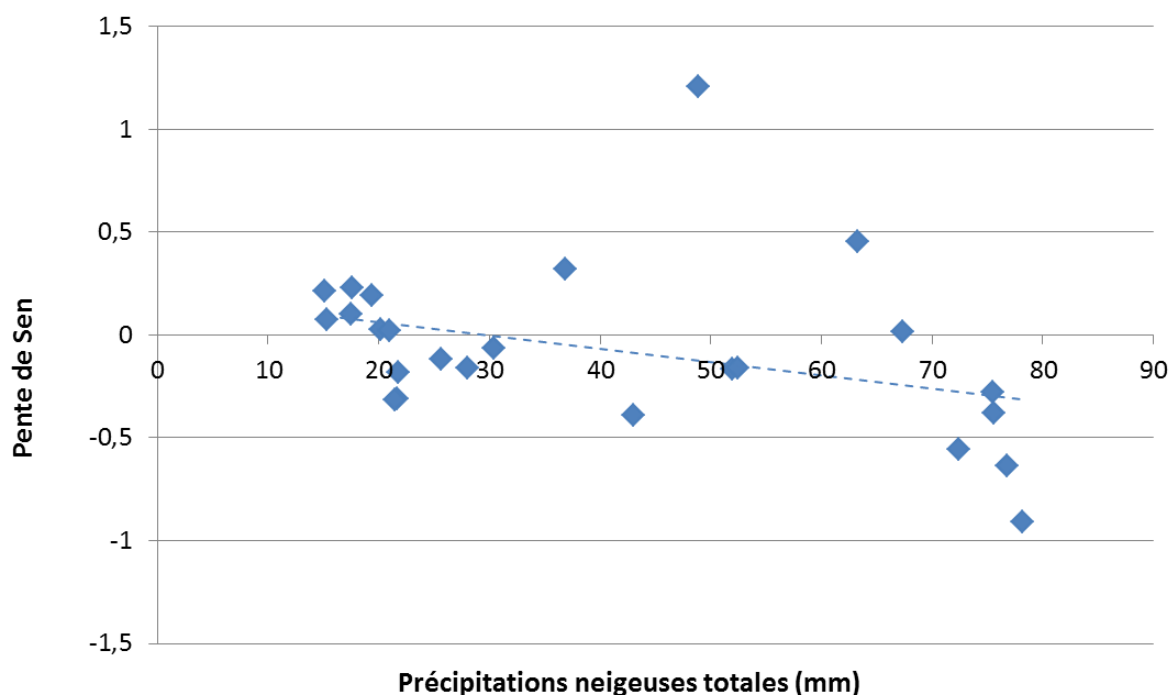


Figure 94. Graphique des corrélations entre la quantité totale annuelle moyenne de précipitations neigeuses tombées sur le bassin versant et la pente de Sen de la tendance dans les débits maximums annuels pour 25 stations de l'étude HydroTrend 2 (outlier non représenté).

Nous pouvons donc en conclure que la topographie, illustrée en Figure 95, joue un rôle important dans le type de tendance observée dans les débits maximums annuels.

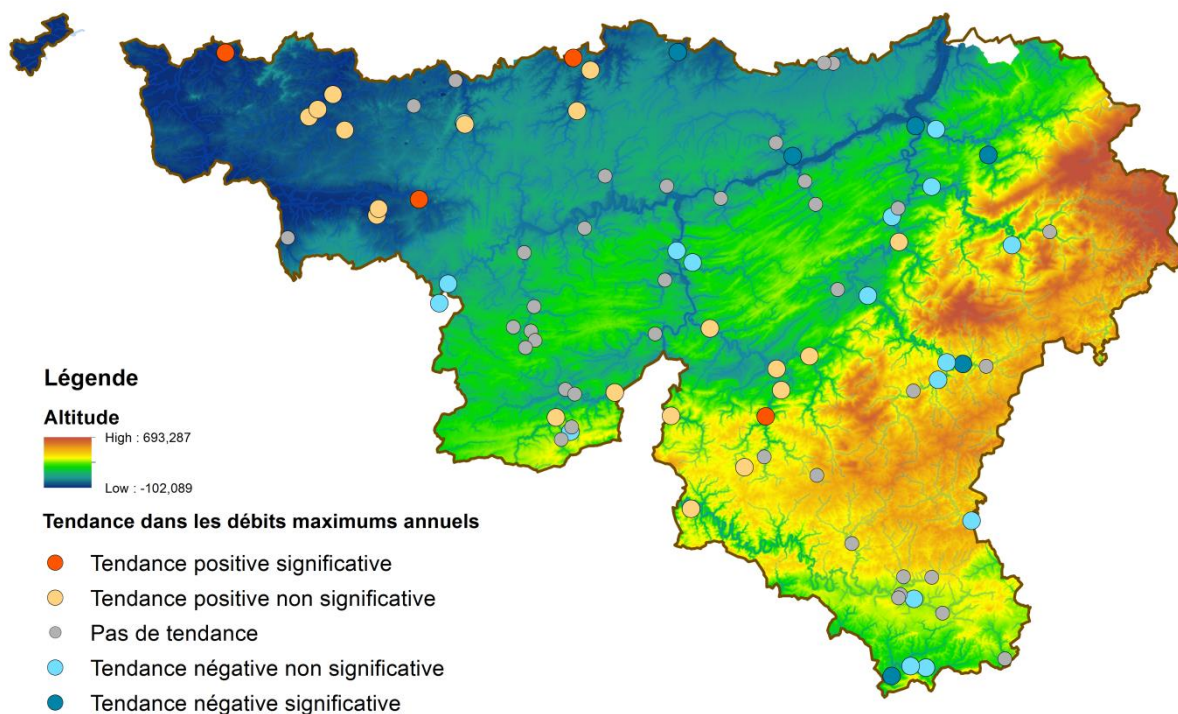


Figure 95. Carte topographique de la région wallonne, avec les stations de l'étude HydroTrend et leur tendance dans les débits maximums annuels.

Ceci permet notamment d'expliquer les tendances positives dans le bassin de l'Escaut et les tendances négatives dans l'est des Ardennes et la Lorraine, mais, de nouveau, pas les tendances

positives dans l'ouest des Ardennes. En effet, comme on peut le voir sur le boxplot ci-dessous, la gamme d'altitude de « Ardennes Ouest » et « Ardennes Est » sont très similaires. Sur les boxplots, l'Escaut correspond à la zone 1 de la Figure 88, le Sillon Sambre-Meuse à la zone 2, la zone 3 a été divisée entre l'Ardenne Est et la Lorraine suivant les résultats de l'étude de régionalisation des débits d'étiage, et la zone 4 a été renommée Ardennes Ouest, comme le montre la Figure 97.

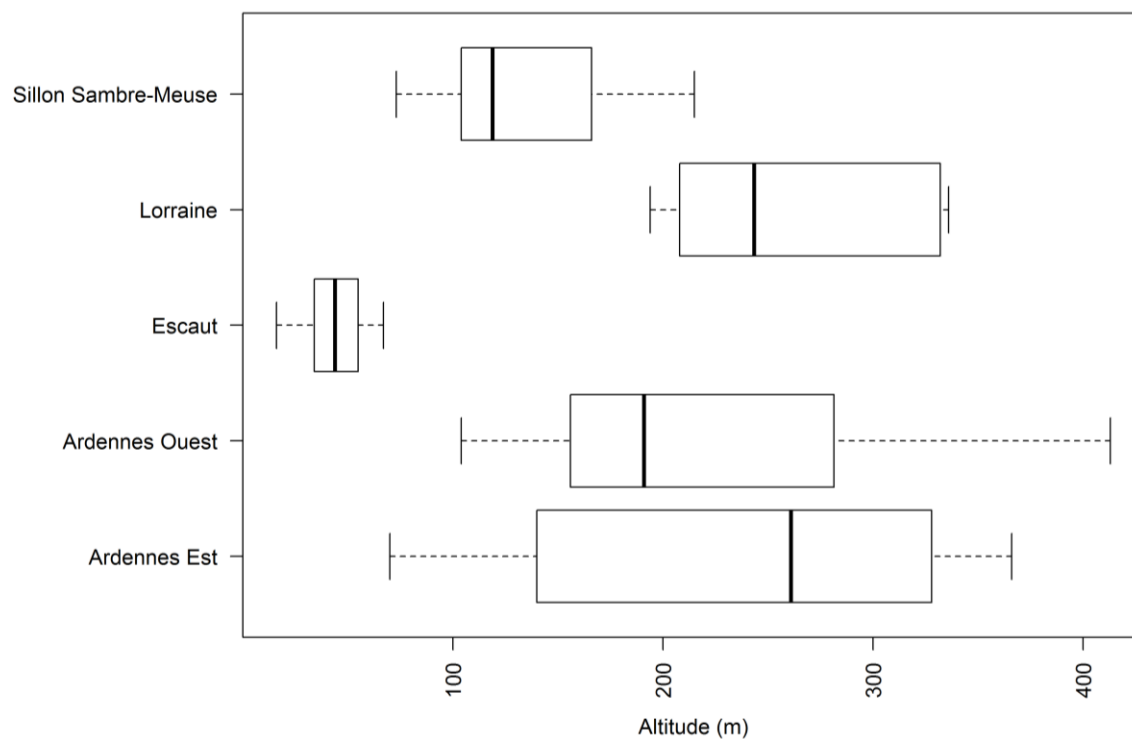


Figure 96. Boxplot de l'altitude des 84 stations par région.

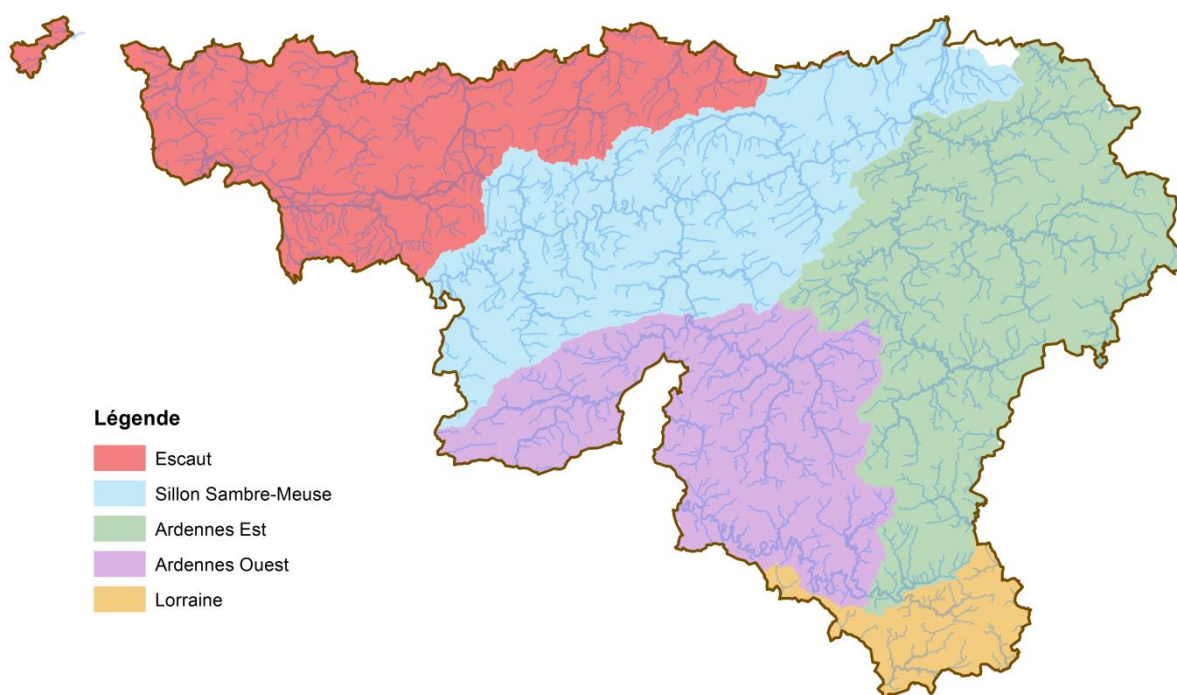


Figure 97. Carte des 5 zones homogènes.

En réalisant des boxplots pour toutes les variables, la seule différence observée entre les bassins versants de la zone 4 – Ardennes Ouest et ceux des autres zones est une plus grande proportion de surfaces forestières (Figure 98). Le pourcentage de forêts est, de plus, la deuxième variable la plus importante, après l’altitude, dans la régression Random Forest sur les 50 bassins versants, même si elle n’est pas directement corrélée à la pente de Sen. La couverture forestière permettrait donc d’expliquer la différenciation de la zone ouest des Ardennes (Viroin, amont de la Lesse et aval de la Semois) par rapport au reste des Ardennes.

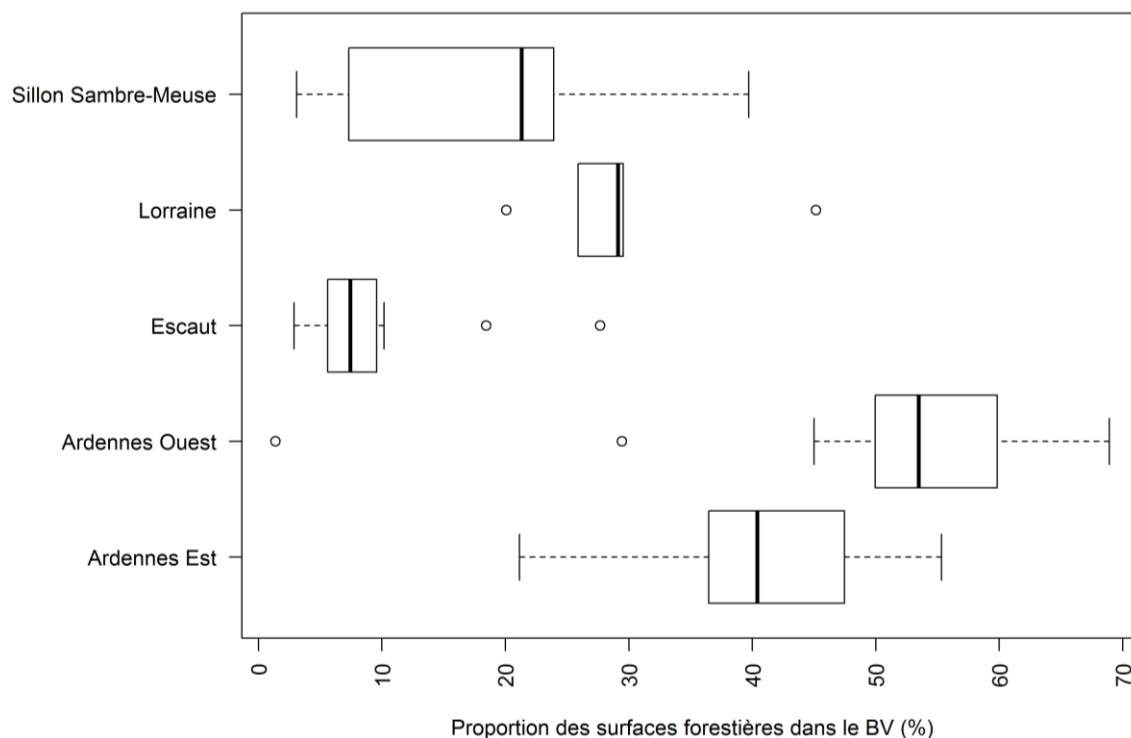


Figure 98. Boxplots de la proportion des surfaces forestières dans les bassins versants pour les deux jeux de données combinés (59 bassins versants : 13 dans Sillon Sambre-Meuse, 6 dans Lorraine, 14 dans Escaut, 15 dans Ardennes Ouest, et 11 dans Ardennes Est).

On observe également que Saint-Rémy-Geest est différent du reste de l’Escaut, aussi bien au niveau des tendances dans les maximums annuels que dans les variables analysées : la moyenne interannuelle des maximums annuels des précipitations est légèrement supérieure, le pourcentage de surfaces bâties est plus faible, et le pourcentage de surfaces agricoles est plus élevé (Figure 99). De part ces caractéristiques, il se rapproche en fait plus d’Huccorgne que du reste de l’Escaut ; ces deux bassins versants sont d’ailleurs dans la même région agro-géographique (Hesbaye).

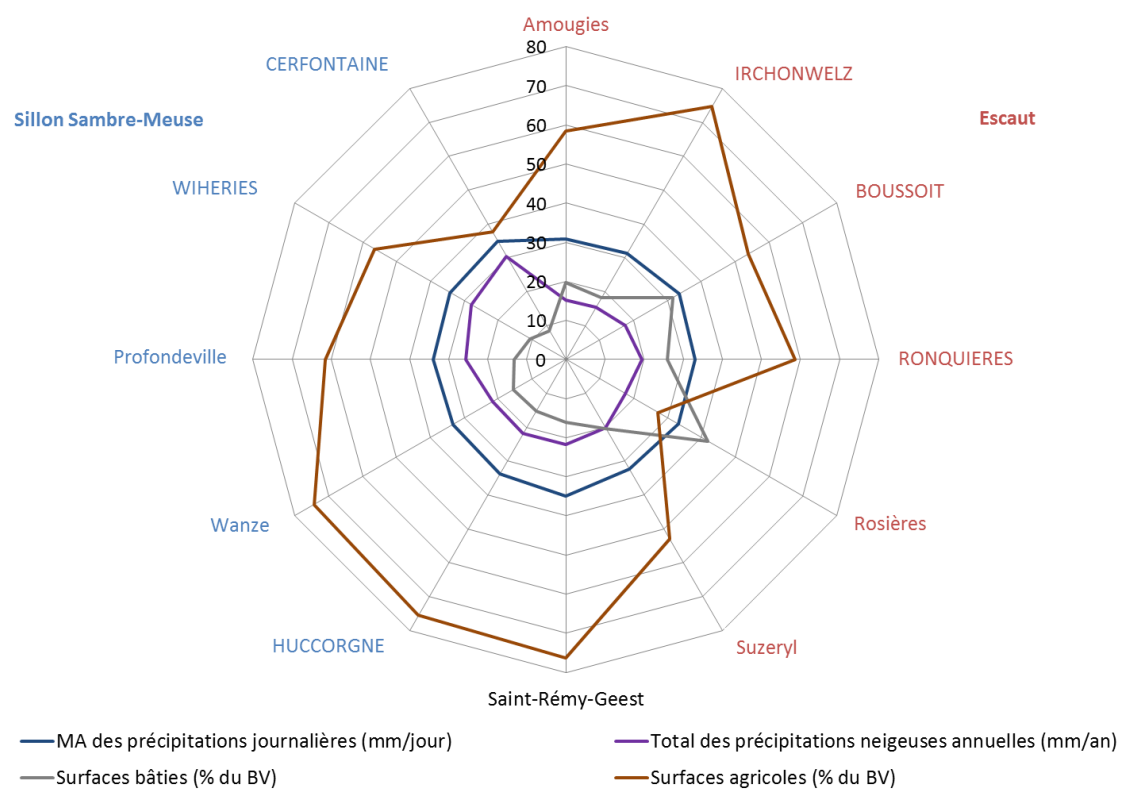


Figure 99. Graphique comparant certaines caractéristiques des bassins versants de l'Escaut et du Sillon Sambre-Meuse.

Conclusion et perspectives

L'analyse des facteurs climatiques a montré une augmentation des précipitations dans les régions de la Lesse et de l'Escaut, et une diminution des précipitations dans le sud de la région et pour les bassins de l'Ourthe, Amblève et Vesdre, principalement due à une diminution des précipitations hivernales. De plus, effet direct de l'augmentation des gaz à effet de serre, une augmentation généralisée des températures a été détectée, celle-ci induisant une augmentation de l'évapotranspiration potentielle. Or, l'augmentation de l'évapotranspiration et l'augmentation des précipitations ont des effets opposés sur l'humidité du sol ; ceci pourrait en partie expliquer l'absence de tendances dans les débits de crue pour la majorité des stations analysées dans HydroTrend 1. Cela démontre également la complexité des phénomènes hydrologiques en jeu et de leurs interactions.

Nous avons aussi remarqué une assez grande sensibilité des tendances aux données, aussi bien à la longueur de l'historique qu'à la fréquence de mesure des données (journalières ou horaires). L'absence de tendance dans les précipitations à plus long terme dans certains bassins versants peut être expliquée de deux façons : soit les tendances sont plus récentes et seront d'avantage marquées dans le futur, soit les précipitations sont liées aux circulations atmosphériques telle que l'ONA et suivent donc une oscillation pluridécennale.

Concernant les liens avec les tendances observées dans les hauts débits, les analyses statistiques ont d'abord démontré que les changements dans les précipitations étaient le facteur influençant le plus les changements dans les débits de crue. Ensuite, la modélisation hydrologique a confirmé, pour 6 bassins versants, la relation de cause à effet entre les changements dans les variables climatiques (principalement précipitations et évapotranspiration) et les tendances dans les débits de crue. Les changements dans l'occupation du sol semblent être un facteur moins influençant, mais la modélisation hydrologique a toutefois révélé que les changements climatiques n'étaient pas toujours suffisants pour expliquer les changements dans les débits.

Il a aussi été démontré que la qualité des données d'entrée était très importante dans la modélisation hydrologique, et il est notamment recommandé de prendre en compte les altitudes lors du déploiement des stations pluviographiques.

La modélisation a également permis de comparer les débits de crue historiques aux débits de crue prédits à partir des données futures du climat, la crue centennale à l'horizon 2050 à Daverdisse étant 20% plus élevée sous le scénario le plus pessimiste. Tout comme l'analyse fréquentielle non stationnaire réalisée dans HydroTrend 1, ce type d'analyse doit être réalisé à l'échelle du bassin versant. Elle est par contre plus précise car elle se base sur des données du climat prédites à partir de scénarios d'émission de gaz à effet de serre, plutôt que sur l'hypothèse d'une continuation, dans le futur, de la tendance observée. Il est toutefois recommandé de procéder à une correction du biais existant entre les données historiques observées et simulées à partir des données CORDEX afin d'obtenir une estimation plus juste des débits futurs.

Nous avons donc démontré que l'évolution du climat avait et aura des conséquences non négligeables sur les crues et leur gestion, mais les évolutions des extrêmes pourraient potentiellement aussi se marquer sur les étiages et affecter l'écologie (problème de débits réservés), le tourisme (kayak, baignade, ...), la navigation et les industries (refroidissement des centrales, ...).

Enfin, les analyses statistiques ont démontré que la topographie était le facteur le plus important pour expliquer la variabilité de la pente de la tendance dans les débits maximums annuels. En prenant en compte les tendances dans les débits, les précipitations et l'évapotranspiration ainsi que les paramètres physiques des bassins versants, nous avons pu délimiter cinq zones homogènes. Pour chacune de ces zones, on peut s'attendre à ce que les tendances aux stations non analysées soient similaires à celles observées aux stations analysées. Il existe cependant quelques exceptions, pour lesquelles il semblerait que l'occupation du sol joue un rôle plus important (couverture forestière

pour l'ouest des Ardennes, surfaces bâties et agricoles pour Saint-Rémy-Geest). Chaque zone comprend également des stations où les tendances dans les débits n'étaient pas significatives, ce qui est plus difficile à expliquer à ce stade.

Diverses analyses complémentaires pourraient être réalisées afin d'encore mieux comprendre les différentes tendances. Les bassins versants pour lesquels la tendance n'est pas significative pourraient être modélisés pour tenter de comprendre la différence de significativité entre bassins versants proches. Le modèle GR4H (pas de temps horaire) pourrait être utilisé pour modéliser des bassins versants comme Rosières où des tendances dans les précipitations horaires ainsi que dans le pourcentage de surfaces bâties ont été détectées. Des modèles hydrologiques plus complexes, spatialement distribués et représentant l'évolution de l'occupation des sols pourraient potentiellement apporter des éléments supplémentaires. Toutefois les données sources restent lacunaires, essentiellement en termes de longueur et de finesse des chroniques. Enfin, un jeu de données moins limité (plus de stations par rapport au nombre de variables) permettrait une régionalisation plus précise.

Bibliographie

- Addor, N., and Seibert, J. (2014). Bias correction for hydrological impact studies - beyond the daily perspective. *Hydrological Processes* 28, 4823–4828.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., and Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67.
- Bezak, N., Brilly, M., and Šraj, M. (2016). Flood frequency analyses, statistical trends and seasonality analyses of discharge data: a case study of the Litija station on the Sava River. *Journal of Flood Risk Management* 9, 154–168.
- Bulygina, N., McIntyre, N., and Wheeler, H. (2013). A comparison of rainfall-runoff modelling approaches for estimating impacts of rural land management on flood flows. *Hydrology Research* 44, 467–483.
- Burn, D.H., Cunderlik, J.M., and Pietroniro, A. (2004). Hydrological trends and variability in the Liard River basin. *Hydrological Sciences Journal* 49, 53–67.
- Christians, C. (1971). Les degrés de priorité des remembrements de biens ruraux en Belgique : étude géographique des structures et premières propositions de priorités. *Revue de l'Agriculture* 11/12, 1439–1505.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50, 885–900.
- EURO-CORDEX community (2017). Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use [Rasmus Benestad, Andreas Haensler, Barbara Hennemuth, Tamás Illy, Daniela Jacob, Elke Keup-Thiel, Sven Kotlarski, Grigory Nikulin, Juliane Otto, Diana Rechid, Kevin Sieck, Stefan Sobolowski, Péter Szabó, Gabriella Szépszó, Claas Teichmann, Robert Vautard, Torsten Weber, Gabriella Zsebeházi].
- Ganguli, P., and Coulibaly, P. (2017). Does nonstationarity in rainfall require nonstationary intensity–duration–frequency curves? *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 6461–6483.
- Grandry, M., Gailliez, S., and Degré, A. (2012). Régionalisation des débits d'étiages en Région wallonne (Gembloux: ULiège - Gembloux Agro-Bio Tech).
- Grandry, M., Gailliez, S., Sohier, C., Verstraete, A., and Degré, A. (2013). A method for low-flow estimation at ungauged sites: a case study in Wallonia (Belgium). *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 1319–1330.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377, 80–91.

Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kriaučiūnienė, J., Kundzewicz, Z.W., Lang, M., et al. (2014). Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 2735–2772.

Hamed, K.H., and Ramachandra Rao, A. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology* 204, 182–196.

Hannaford, J., and Marsh, T.J. (2008). High-flow and flood trends in a network of undisturbed catchments in the UK. *International Journal of Climatology* 28, 1325–1338.

IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. (Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press).

Krause, P., Boyle, D.P., and Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5, 89–97.

Kundzewicz, Z. (2012). *Changes in flood risk in Europe* (Wallingford, UK: IAHS Press and CRC Press).

Lettenmaier, D. (2018). Predicting hydrologic extremes in a changing climate. In *Geophysical Research Abstracts*, (Vienna, Austria: Copernicus Publications), pp. EGU2018-3151.

Mangini, W., Viglione, A., Hall, J., Hundercha, Y., Ceola, S., Montanari, A., Rogger, M., Salinas, J.L., Borzì, I., and Parajka, J. (2018). Detection of trends in magnitude and frequency of flood peaks across Europe. *Hydrological Sciences Journal* 63, 493–512.

Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L., and Granados, A. (2014). Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain. *Journal of Hydrology* 517, 1072–1088.

Merz, B., Vorogushyn, S., Uhlemann, S., Delgado, J., and Hundercha, Y. (2012). HESS Opinions “More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series.” *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 1379–1387.

Mustafa, A., Heppenstall, A., Omrani, H., Saadi, I., Cools, M., and Teller, J. (2018). Modelling built-up expansion and densification with multinomial logistic regression, cellular automata and genetic algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems* 67, 147–156.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.

Perrin, C. (2020). Inrea - Equipe Hydrologie Irstea Anthony.

Pohlert, T. (2018). trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.0. <https://CRAN.R-project.org/package=trend>.

Pushpalatha, R., Perrin, C., Moine, N.L., and Andréassian, V. (2012). A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology* 420–421, 171–182.

Rizzo, M., and Szekely, G. (2019). *energy: E-Statistics: Multivariate Inference via the Energy of Data*. R package version 1.7-6. <https://CRAN.R-project.org/package=energy>.

Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M., Wyżga, B., Kundzewicz, Z.W., Czajka, B., and Niedźwiedź, T. (2016). Decadal variability of floods in the northern foreland of the Tatra Mountains. *Regional Environmental Change* 16, 603–615.

Rybski, D., and Neumann, J. (2011). A Review on the Pettitt Test. In *In Extremis. Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology.*, J. Kropp, and H.-J. Schellnhuber, eds. (Berlin, Heidelberg: Springer), pp. 202–213.

Sanchez, G. (2012). *plsdepot: Partial Least Squares (PLS) Data Analysis Methods*. R package version 0.1.17. <https://CRAN.R-project.org/package=plsdepot>.

Santander Meteorology Group (2012). *fume: FUME package*. R package version 1.0. <https://cran.r-project.org/src/contrib/Archive/fume/>.

Sohier, C., Degré, A., and Dautrebande, S. (2009). From root zone modelling to regional forecasting of nitrate concentration in recharge flows – The case of the Walloon Region (Belgium). *Journal of Hydrology* 369, 350–359.

SPW - DGO3 - DEMNA - DEE (2017). *Rapport sur l'état de l'environnement wallon 2017 (REEW 2017)* (Jambes, Belgique: SPW Éditions).

Svensson, C., Kundzewicz, W.Z., and Maurer, T. (2005). Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series. *Hydrological Sciences Journal* 50.

Valéry, A., Andréassian, V., and Perrin, C. (2014). 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology* 517, 1176–1187.

van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5–31.

Willems, P. (2013). Multidecadal oscillatory behaviour of rainfall extremes in Europe. *Climatic Change* 120, 931–944.

Wyard, C., Scholzen, C., Fettweis, X., Van Campenhout, J., and François, L. (2017). Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959–2010 using the regional climate model MAR. *International Journal of Climatology* 37, 2782–2796.

Annexes

Les résultats détaillés de différents tests de corrélation (conditions d'application, coefficients de corrélation et p-valeurs) sont disponibles sous format électronique.

Annexe 1 – Corrélations entre les débits maximums annuels et les indicateurs climatiques et d'occupation du sol

ID station	Nom station	Indice hivernal de l'Oscillation Nord Atlantique	Maximum annuel des précipitations journalières	Maximum annuel des cumuls sur 2 jours	Maximum annuel des cumuls sur 3 jours	Total annuel des précipitations neigeuses
L5412	Amougies		Positive	Positive	Positive	
29521002	IRCHONWELZ			Positive (relation monotone et ordinale)		
35611002	BOUSSOIT		Positive	Positive	Positive	
23711002	RONQUIERES		Positive	Positive	Positive	
L5370-L7530	Rosières		Positive	Positive	Positive	
L5460	Suzeryl		Positive	Positive	Positive (relation monotone et ordinale)	
L5720	Saint-Rémy-Geest		Positive	Positive	Positive	
79441002	WIHERIES		Positive	Positive	Positive	
78911002	CERFONTAINE		Positive	Positive	Positive	
90211002	TREIGNES	Positive (relation monotone et ordinale)	Positive	Positive	Positive	
7244SVC2	HUCCORGNE		Positive	Positive	Positive	
L5820	Wanze			Positive	Positive	
55721002	BERGILERS Amont		Positive	Positive	Positive	
58261002	SAUHEID			Positive	Positive	
6228SVC2	CHAUDFONTAINE Pisc		Positive	Positive	Positive	
L5860	Theux			Positive	Positive	
68321002	TROIS-PONTS				Positive	
60211002	MABOMPRE				Positive	
L5610	Martelange		Positive	Positive	Positive	
95711002	SAINTE-MARIE		Positive	Positive	Positive	
L5880	Chantemelle		Positive	Positive	Positive	
L5520	Harnoncourt		Positive	Positive	Positive	
82211002	GENDRON	Positive (relation monotone et ordinale)	Positive	Positive	Positive	
83411002	DAVERDISSE		Positive	Positive	Positive	
L5540	Graide		Positive	Positive	Positive	
L6000-6001	Profondeville		Positive	Positive	Positive	

ID station	Nom station	Maximum annuel de neige accumulée	Maximum annuel de neige fondue	Maximum des cumuls de neige fondue sur 2 jours	Maximum des cumuls de neige fondue sur 3 jours	Évapotranspiration totale	Indice d'humidité extrême
L5412	Amougies					Positive	
29521002	IRCHONWELZ						
35611002	BOUSSOIT						
23711002	RONQUIERES						
L5370-L7530	Rosières						
L5460	Suzeryl						
L5720	Saint-Rémy-Geest					Négative	Positive
79441002	WIHERIES						Positive
78911002	CERFONTAINE						
90211002	TREIGNES						Positive
7244SVC2	HUCCORGNE					Négative	Positive
L5820	Wanze					Négative (relation monotone et ordinaire)	Positive
55721002	BERGILERS Amont					Négative	Positive
58261002	SAUHEID						Positive
6228SVC2	CHAUDFONTAINE Pisc						Positive
L5860	Theux						Positive
68321002	TROIS-PONTS						Positive
60211002	MABOMPRES	Positive (relation monotone et ordinaire)					
L5610	Martelange						Positive
95711002	SAINTE-MARIE					Positive	Positive (relation monotone et ordinaire)
L5880	Chantemelle					Positive	
L5520	Harnoncourt						Positive
82211002	GENDRON						Positive
83411002	DAVERDISSE						Positive
L5540	Graide						Positive
L6000-6001	Profondeville						Positive

ID station	Nom station	Proportion de la surface bâtie totale	Proportion de la surface bâtie de densité faible	Proportion de la surface bâtie de densité moyenne	Proportion de la surface bâtie de densité élevée	Proportion de la surface forestière
L5412	Amougies					
29521002	IRCHONWELZ					
35611002	BOUSSOIT					
23711002	RONQUIERES					
L5370-L7530	Rosières					
L5460	Suzeryl					
L5720	Saint-Rémy-Geest					
79441002	WIHERIES					
78911002	CERFONTAINE					
90211002	TREIGNES					
7244SVC2	HUCCORGNE		Positive			
L5820	Wanze		Positive			
55721002	BERGILERS Amont					
58261002	SAUHEID					
6228SVC2	CHAUDFONTAINE Pisc					
L5860	Theux					
68321002	TROIS-PONTS					
60211002	MABOMPRE	Négative	Négative (relation monotone et ordinale)	Négative (relation monotone et ordinale)	Négative	Négative
L5610	Martelange		Négative (non ordinale)	Négative (non ordinale)		
95711002	SAINTE-MARIE					
L5880	Chantemelle	Négative	Positive	Négative	Négative	
L5520	Harnoncourt	Négative		Négative	Négative	
82211002	GENDRON					
83411002	DAVERDISSE					
L5540	Graide					
L6000-6001	Profondeville		Positive (relation monotone et ordinale)			

ID station	Nom station	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement très élevé	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement élevé	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement moyen	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement faible	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement nul
L5412	Amougies					
29521002	IRCHONWELZ					
35611002	BOUSSOIT					
23711002	RONQUIERES					
L5370-L7530	Rosières					
L5460	Suzeryl					
L5720	Saint-Rémy-Geest					
79441002	WIHERIES					
78911002	CERFONTAINE					
90211002	TREIGNES					
7244SVC2	HUCCORGNE	Négative				
L5820	Wanze	Négative		Positive (relation monotone)		
55721002	BERGILERS Amont	Négative				
58261002	SAUHEID	Négative			Négative	
6228SVC2	CHAUDFONTAINE Pisc					
L5860	Theux					
68321002	TROIS-PONTS					
60211002	MABOMPRE	Négative			Négative (relation monotone et ordinale)	
L5610	Martelange	Négative (relation ni monotone, ni ordinale)				
95711002	SAINTE-MARIE			Positive (relation monotone et ordinale)	Négative	
L5880	Chantemelle			Positive	Négative	Négative
L5520	Harnoncourt				Négative (relation monotone et linéaire)	
82211002	GENDRON					
83411002	DAVERDISSE					
L5540	Graide					
L6000-6001	Profondeville					

Annexe 2 – Corrélations entre le nombre de POTs par an et les indicateurs climatiques et d'occupation du sol

ID station	Nom station	Indice hivernal de l'Oscillation Nord Atlantique	Maximum annuel des précipitations journalières	Maximum annuel des cumuls sur 2 jours	Maximum annuel des cumuls sur 3 jours
L5412	Amougies			Positive (relation monotone et ordinale)	
29521002	IRCHONWELZ				
35611002	BOUSSOIT		Positive	Positive	Positive (relation monotone et ordinale)
23711002	RONQUIERES		Positive	Positive	Positive
L5370-L7530	Rosières		Positive		Positive
L5460	Suzeryl		Positive	Positive	Positive (relation monotone et ordinale)
L5720	Saint-Rémy-Geest			Positive	Positive
79441002	WIHERIES				
78911002	CERFONTAINE	Positive			
90211002	TREIGNES				
7244SVC2	HUCCORGNE			Positive	
L5820	Wanze			Positive	
55721002	BERGILERS Amont		Positive (relation monotone et ordinale)		
58261002	SAUHEID				
6228SVC2	CHAUDFONTAINE Pisc			Positive	Positive
L5860	Theux	Positive			
68321002	TROIS-PONTS				
60211002	MABOMPRES				
L5610	Martelange			Positive	
95711002	SAINTE-MARIE				Positive
L5880	Chantemelle				
L5520	Harnoncourt				
82211002	GENDRON			Positive	
83411002	DAVERDISSE			Positive	
L5540	Graide			Positive	
L6000-6001	Profondeville		Positive		

ID station	Nom station	Total annuel des précipitations neigeuses	Maximum annuel de neige accumulée	Maximum annuel de neige fondue	Maximum des cumuls de neige fondue sur 2 jours	Maximum des cumuls de neige fondue sur 3 jours
L5412	Amougies					
29521002	IRCHONWELZ					
35611002	BOUSSOIT					
23711002	RONQUIERES					
L5370-L7530	Rosières					
L5460	Suzeryl					
L5720	Saint-Rémy-Geest					
79441002	WIHERIES					
78911002	CERFONTAINE					
90211002	TREIGNES					
7244SVC2	HUCCORGNE					
L5820	Wanze					
55721002	BERGILERS Amont					
58261002	SAUHEID					
6228SVC2	CHAUDFONTAINE Pisc	Positive				
L5860	Theux					
68321002	TROIS-PONTS					
60211002	MABOMPRE	Positive (relation monotone et ordinale)	Positive	Positive (relation non monotone)		
L5610	Martelange					
95711002	SAINTE-MARIE					
L5880	Chantemelle					
L5520	Harnoncourt		Positive	Positive	Positive	Positive
82211002	GENDRON					
83411002	DAVERDISSE					
L5540	Graide					
L6000-6001	Profondeville					

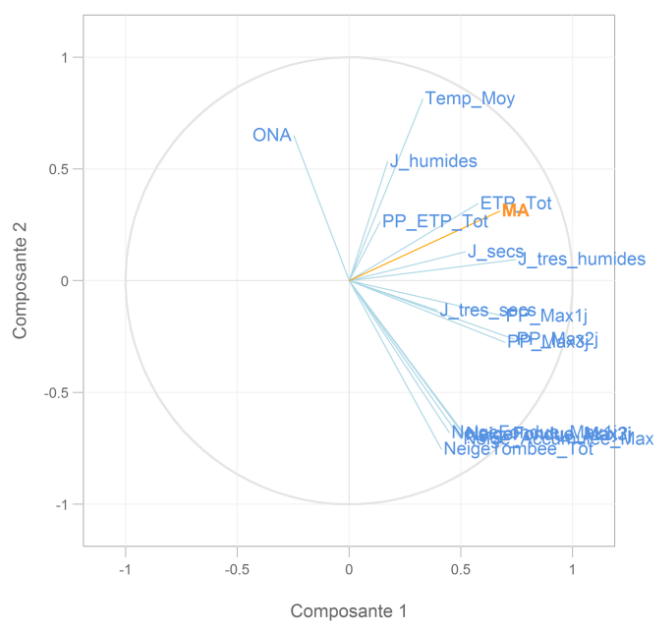
ID station	Nom station	Évapotranspiration totale	Indice d'humidité extrême	Nombre de jours humides	Nombre de jours très humides
L5412	Amougies		Positive	Positive	Positive
29521002	IRCHONWELZ		Positive	Positive	Positive
35611002	BOUSSOIT		Positive	Positive	Positive
23711002	RONQUIERES		Positive	Positive	Positive
L5370-L7530	Rosières				Positive
L5460	Suzeryl				Positive
L5720	Saint-Rémy-Geest	Négative	Positive	Positive	Positive
79441002	WIHERIES		Positive	Positive	
78911002	CERFONTAINE		Positive	Positive	
90211002	TREIGNES		Positive	Positive	
7244SVC2	HUCCORGNE		Positive	Positive	Positive
L5820	Wanze	Négative	Positive	Positive	
55721002	BERGILERS Amont		Positive	Positive	Positive (relation non monotone)
58261002	SAUHEID		Positive	Positive	
6228SVC2	CHAUDFONTAINE Pisc		Positive	Positive	Positive
L5860	Theux		Positive	Positive	Positive
68321002	TROIS-PONTS		Positive	Positive	Positive
60211002	MABOMPRE		Positive		
L5610	Martelange		Positive	Positive	Positive
95711002	SAINTE-MARIE		Positive	Positive	Positive
L5880	Chantemelle		Positive	Positive	
L5520	Harnoncourt		Positive	Positive	
82211002	GENDRON	Négative	Positive	Positive	Positive
83411002	DAVERDISSE		Positive	Positive	
L5540	Graide	Négative	Positive	Positive	
L6000-6001	Profondeville		Positive	Positive	Positive

ID station	Nom station	Proportion de la surface bâtie totale	Proportion de la surface bâtie de densité faible	Proportion de la surface bâtie de densité moyenne	Proportion de la surface bâtie de densité élevée	Proportion de la surface forestière
L5412	Amougies					
29521002	IRCHONWELZ					
35611002	BOUSSOIT					
23711002	RONQUIERES					
L5370-L7530	Rosières					
L5460	Suzeryl					
L5720	Saint-Rémy-Geest					
79441002	WIHERIES					
78911002	CERFONTAINE	Négative	Négative (relation non monotone)	Négative	Négative	
90211002	TREIGNES					
7244SVC2	HUCCORGNE		Positive (relation monotone et ordinale)			
L5820	Wanze	Négative (relation monotone)	Positive	Négative (relation monotone)		
55721002	BERGILERS Amont	Positive	Positive	Positive	Positive	
58261002	SAUHEID					Positive
6228SVC2	CHAUDFONTAINE Pisc					
L5860	Theux					
68321002	TROIS-PONTS					
60211002	MABOMPRE	Positive	Positive	Positive	Positive	
L5610	Martelange					
95711002	SAINTE-MARIE					
L5880	Chantemelle					
L5520	Harnoncourt		Positive			
82211002	GENDRON	Positive	Positive	Positive	Positive	
83411002	DAVERDISSE	Positive	Positive	Positive	Positive	
L5540	Graide					
L6000-6001	Profondeville		Positive			

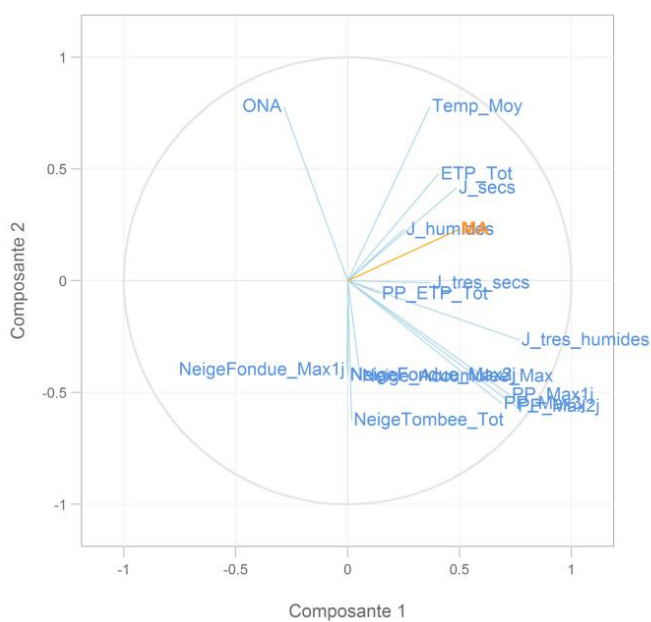
ID station	Nom station	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement très élevé	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement élevé	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement moyen	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement faible	Proportion de la surface agricole à risque de ruissellement nul
L5412	Amougies					
29521002	IRCHONWELZ					
35611002	BOUSSOIT					
23711002	RONQUIERES					
L5370-L7530	Rosières					
L5460	Suzeryl	Négative (relation non monotone)		Négative (relation monotone et ordinale)	Positive	
L5720	Saint-Rémy-Geest					
79441002	WIHERIES					
78911002	CERFONTAINE			Négative (relation monotone et ordinale)		
90211002	TREIGNES					
7244SVC2	HUCCORGNE					
L5820	Wanze	Négative		Positive (relation non monotone)		
55721002	BERGILERS Amont					
58261002	SAUHEID	Négative				Négative
6228SVC2	CHAUDFONTAINE Pisc					
L5860	Theux				Positive (relation non monotone)	
68321002	TROIS-PONTS					Négative
60211002	MABOMPRE					
L5610	Martelange					
95711002	SAINTE-MARIE					
L5880	Chantemelle					
L5520	Harnoncourt					
82211002	GENDRON					
83411002	DAVERDISSE					
L5540	Graide					
L6000-6001	Profondeville					

Annexe 3 – Cercles des corrélations de l'analyse PLS sur les débits maximums annuels

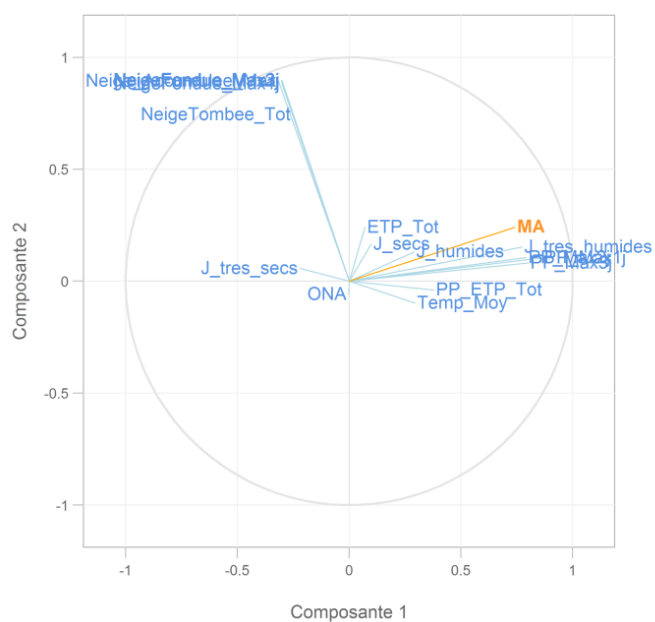
Amougies (L5412)



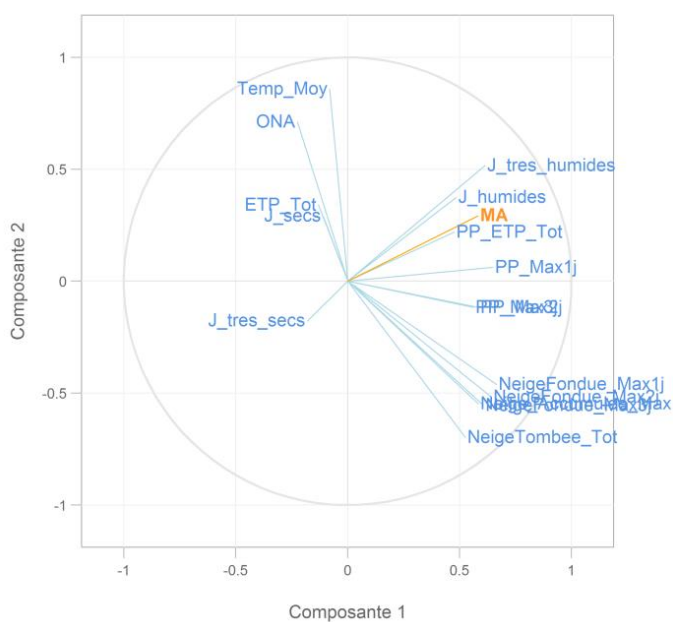
IRCHONWELZ (29521002)



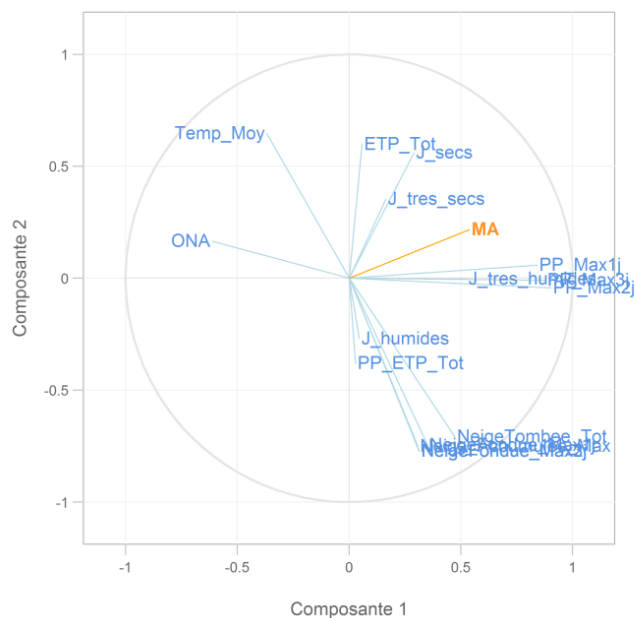
BOUSSOIT (35611002)



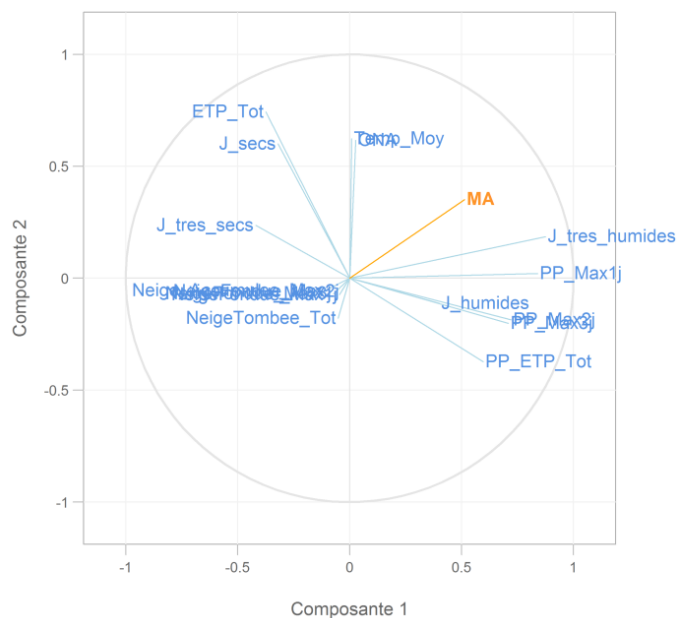
RONQUIERES (23711002)



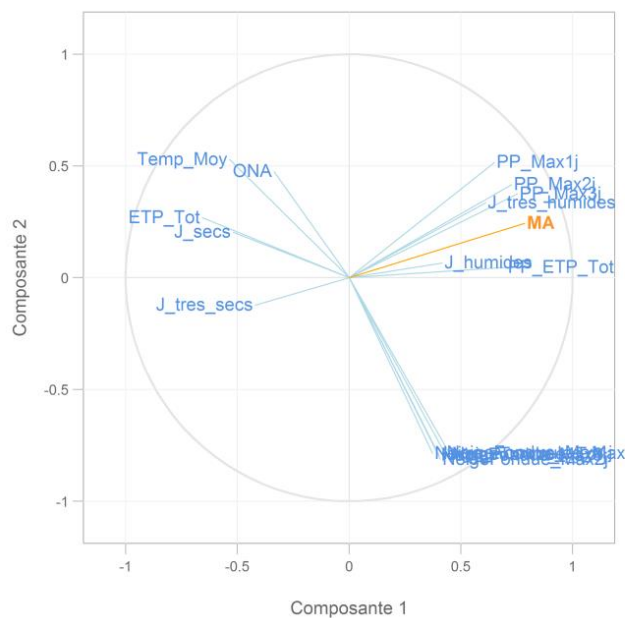
Rosières (L5370-L7530)



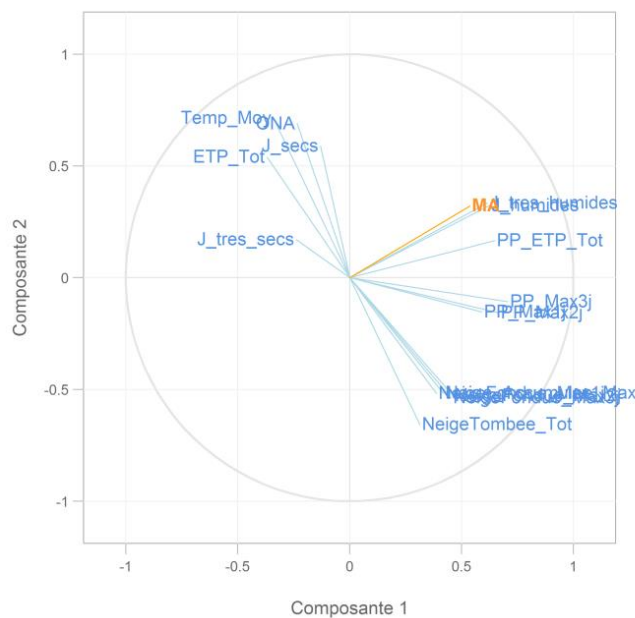
Suzeryl (L5460)



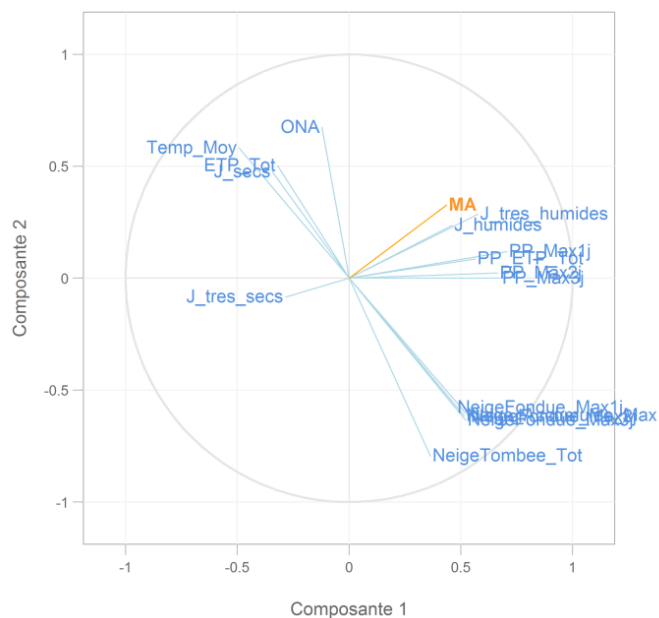
Saint-Rémy-Geest (L5720)



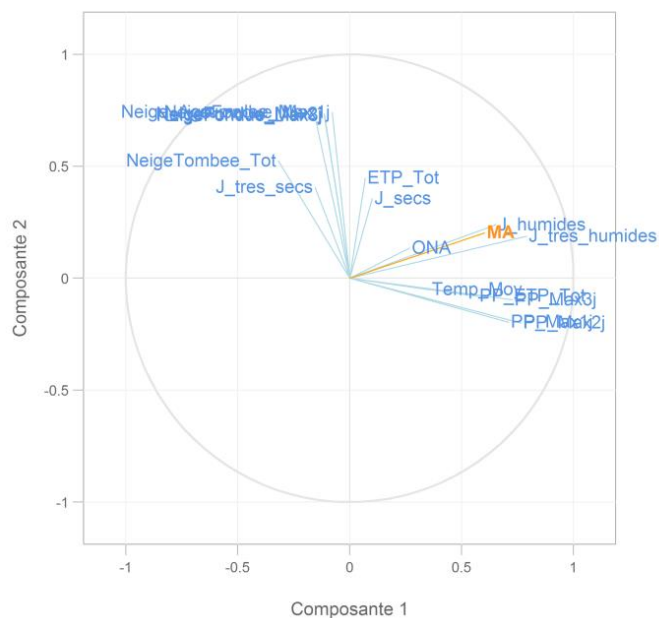
WIHERIES (79441002)



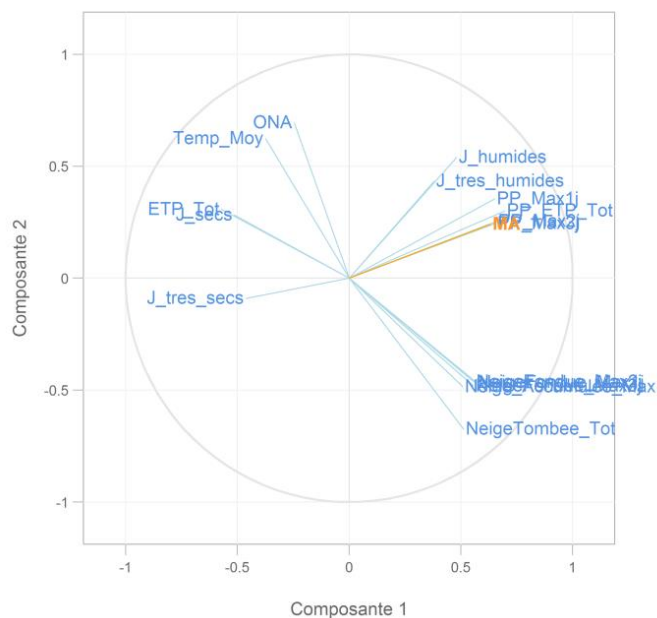
CERFONTAINE (78911002)



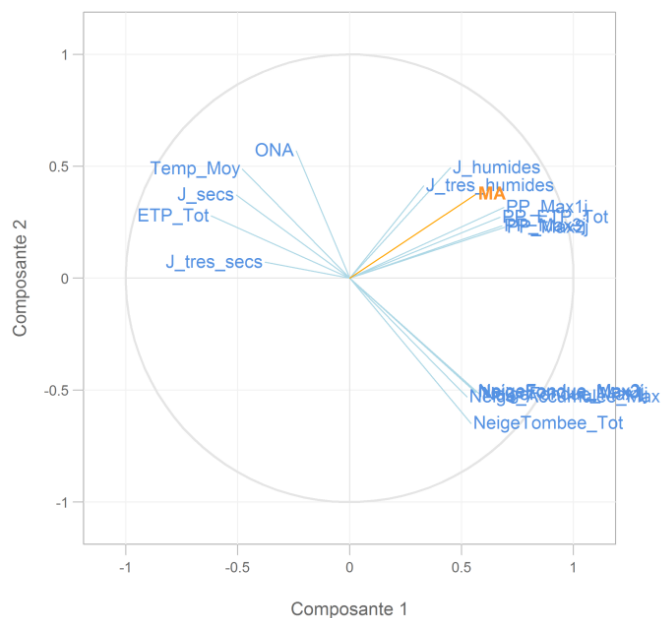
TREIGNES (90211002)



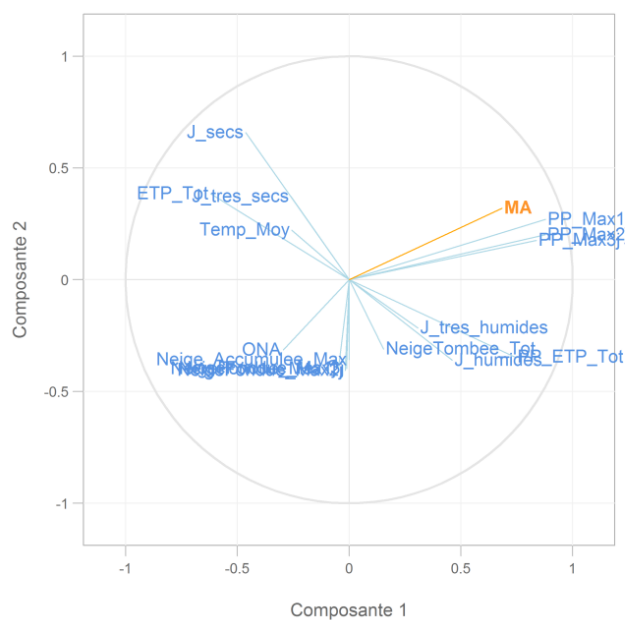
HUCCORGNE (7244SVC2)



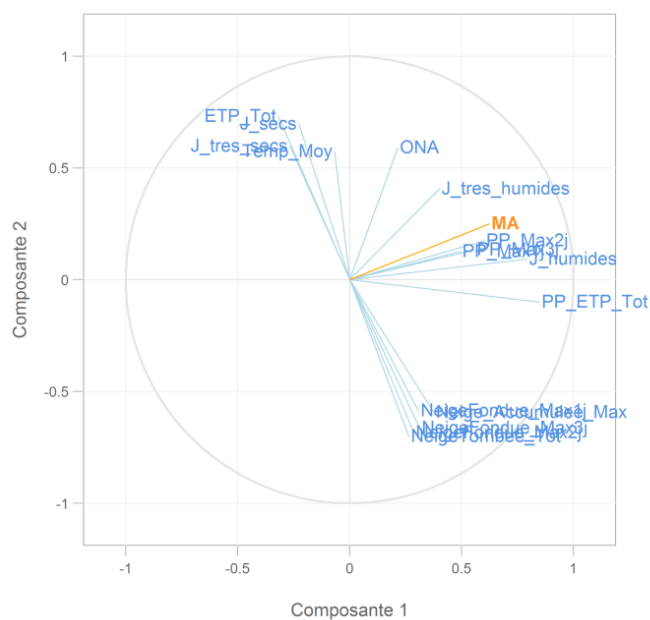
Wanze (L5820)



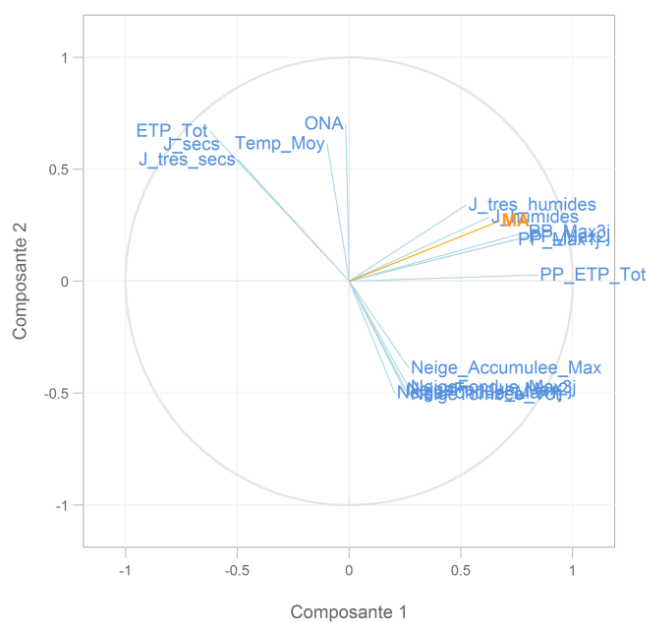
BERGILERS Amont (55721002)



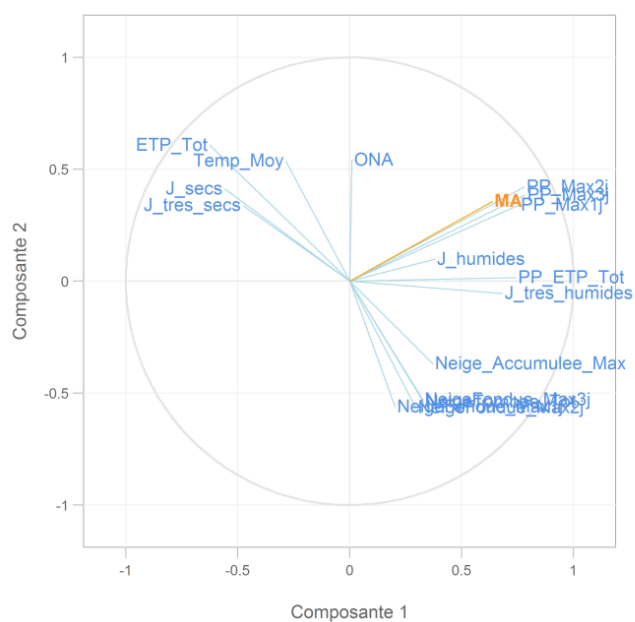
SAUHEID (58261002)



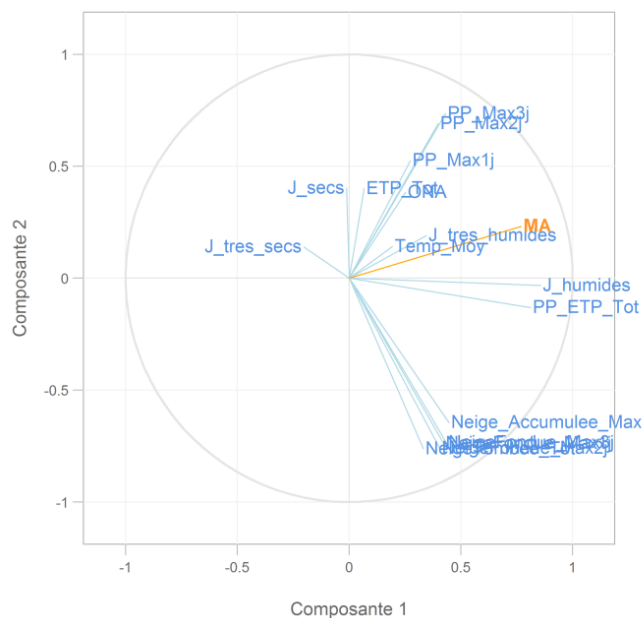
CHAUDFONTAINE Pisc (6228SVC2)



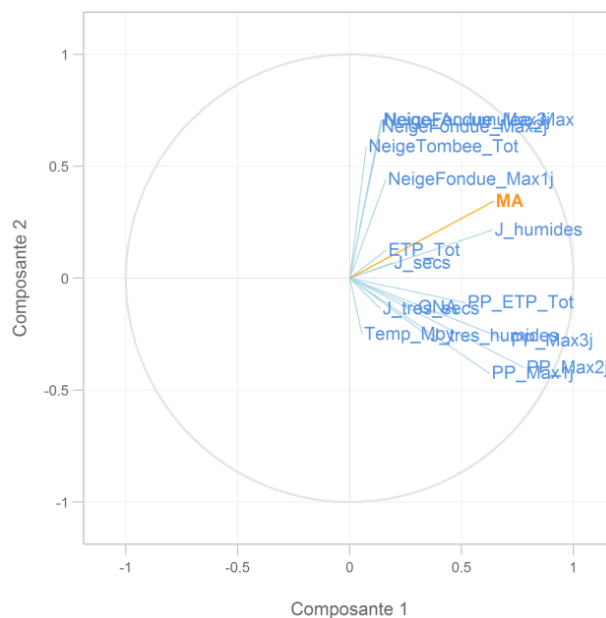
Theux (L5860)



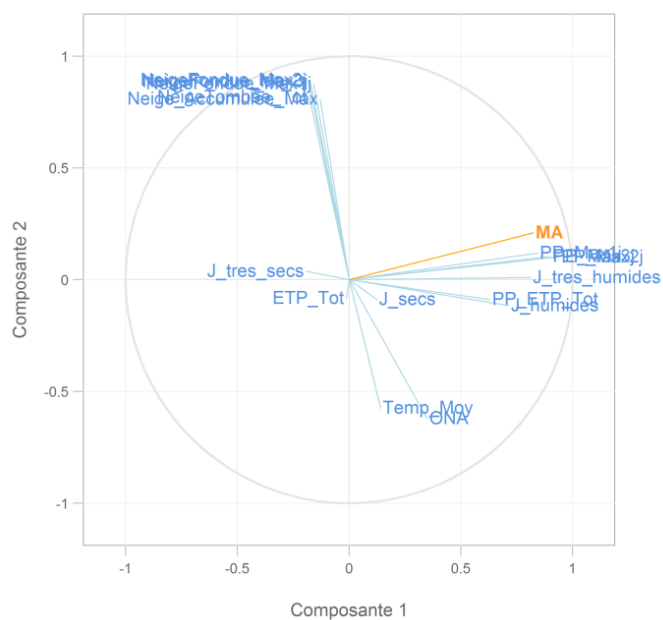
TROIS-PONTS (68321002)



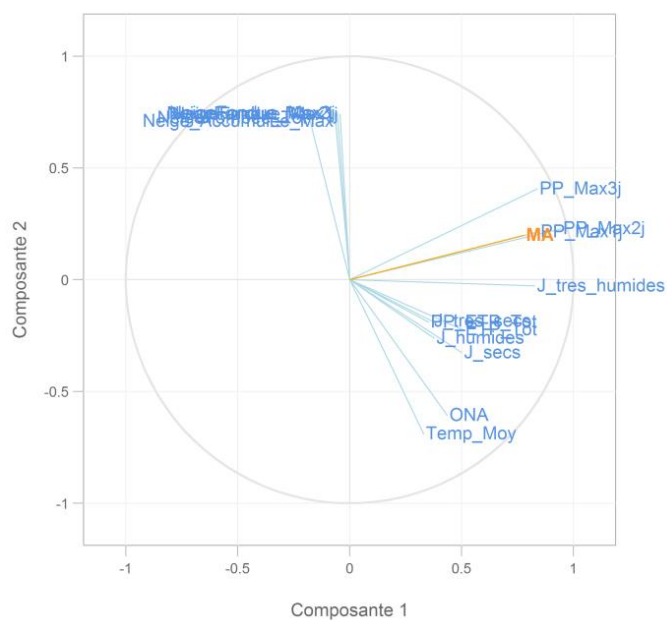
MABOMPRE (60211002)



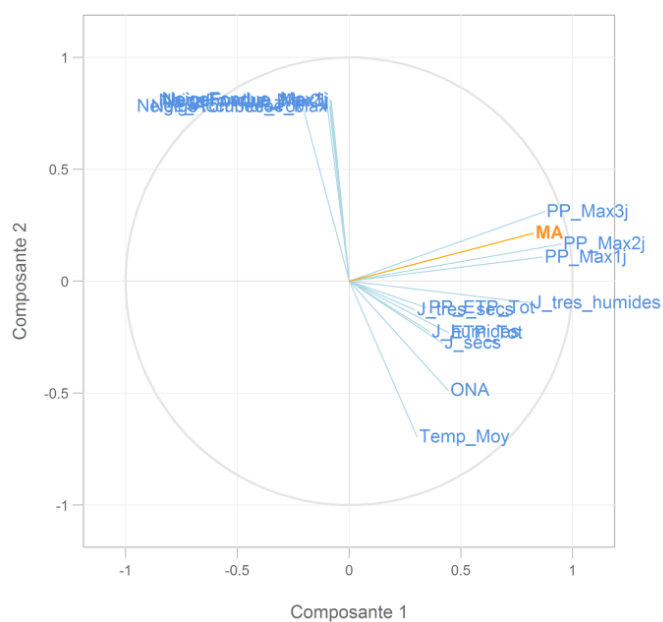
Martelange (L5610)



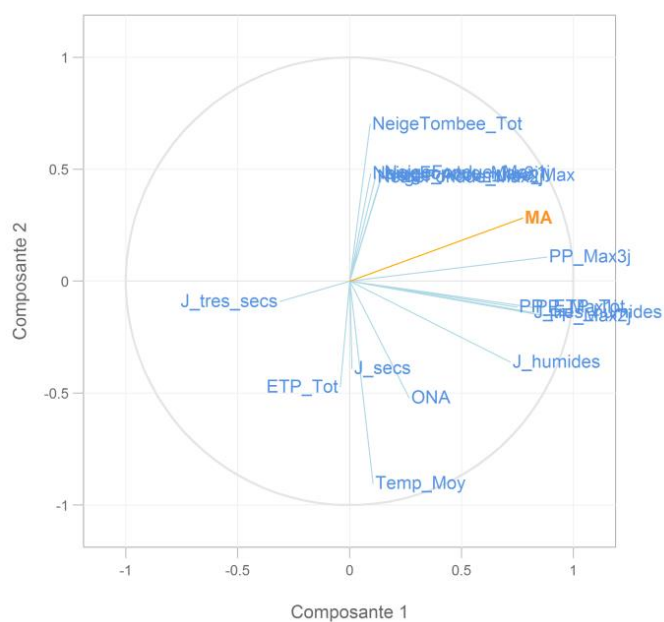
SAINTE-MARIE (95711002)



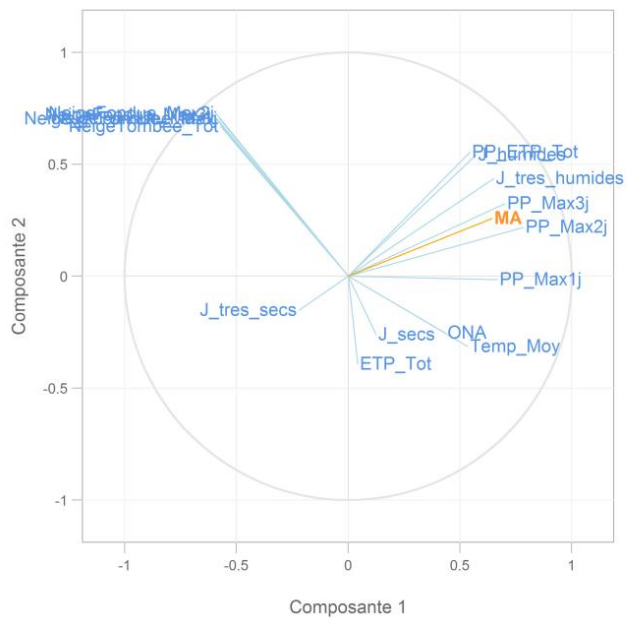
Chantemelle (L5880)



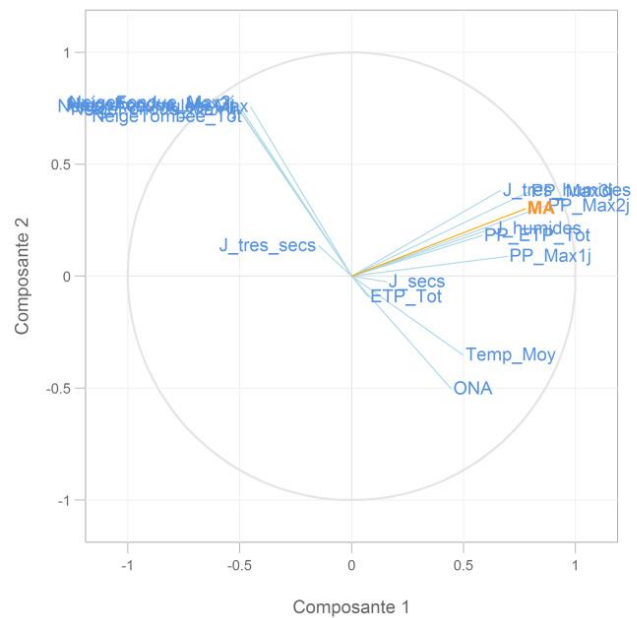
Harnoncourt (L5520)



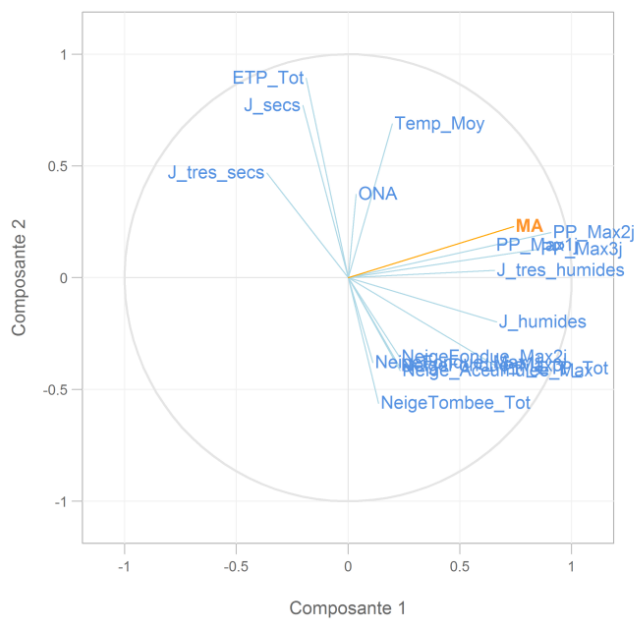
GENDRON (82211002)



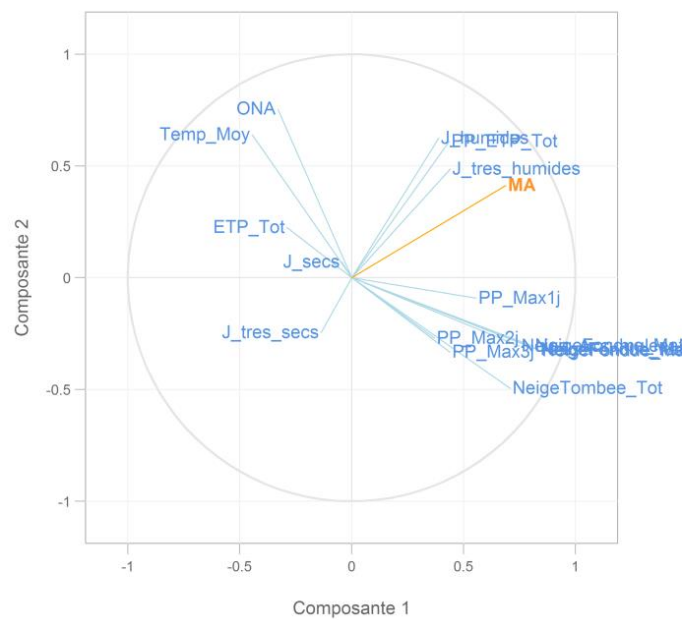
DAVERDISSE (83411002)



Graide (L5540)

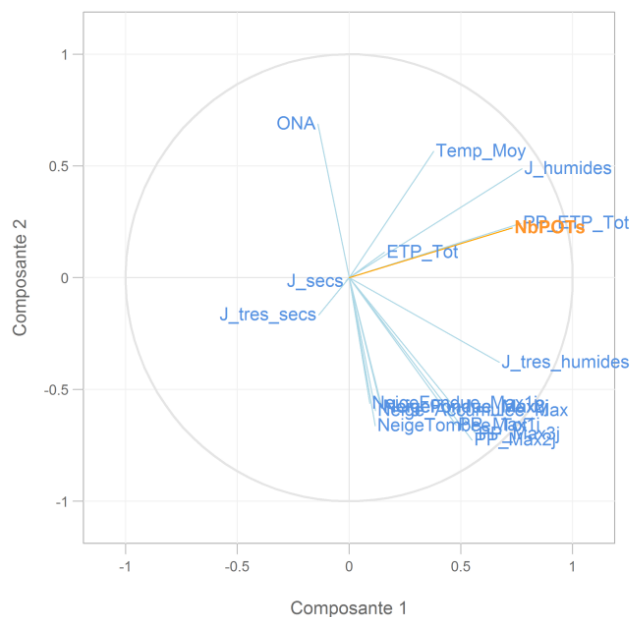


Profondeville (L6000-6001)

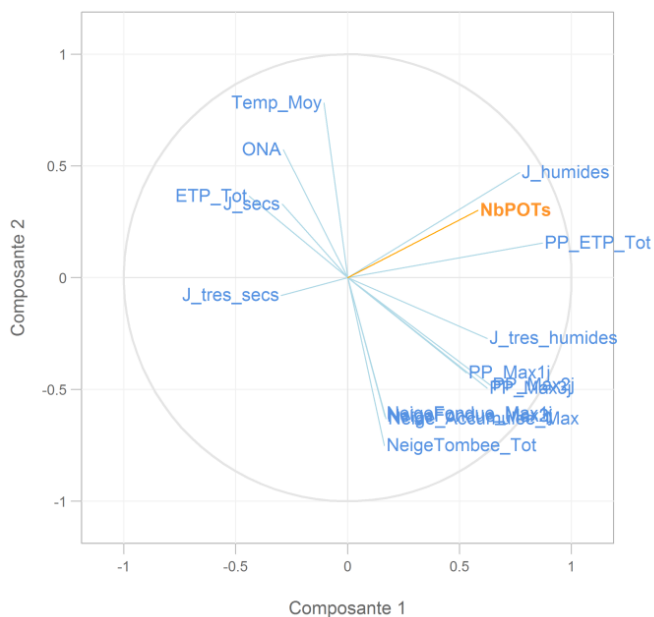


Annexe 4 – Cercles des corrélations de l'analyse PLS sur le nombre de POTs par an

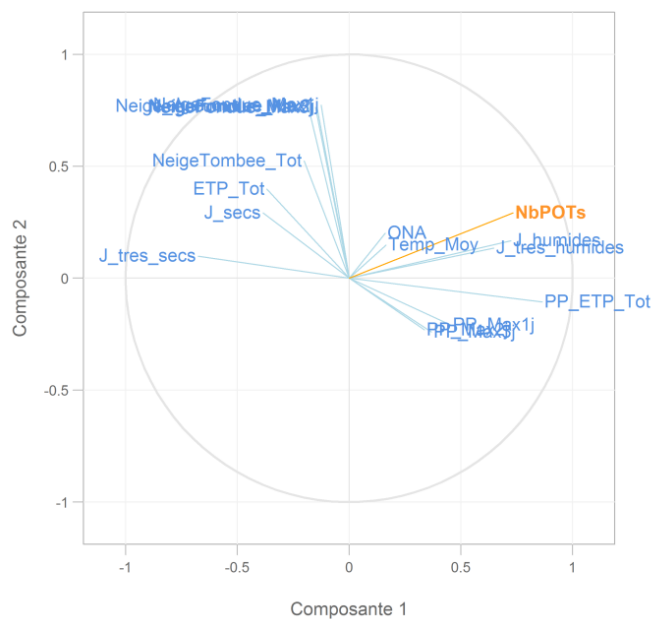
Amougies (L5412)



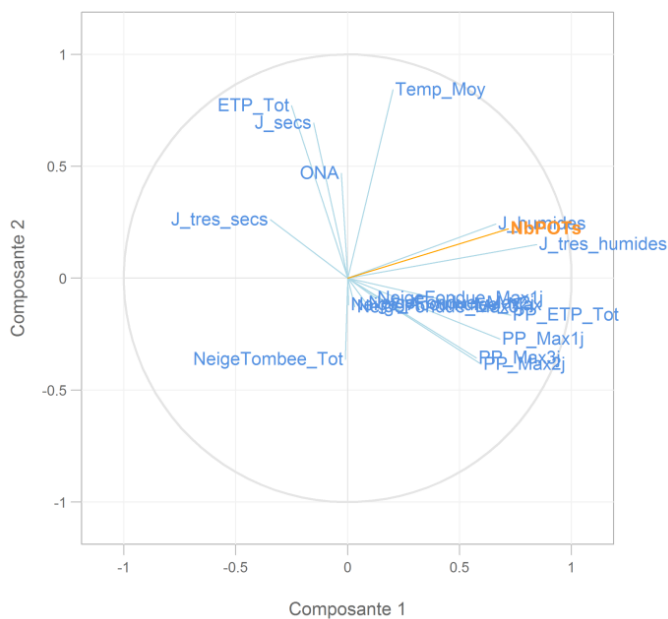
IRCHONWELZ (29521002)



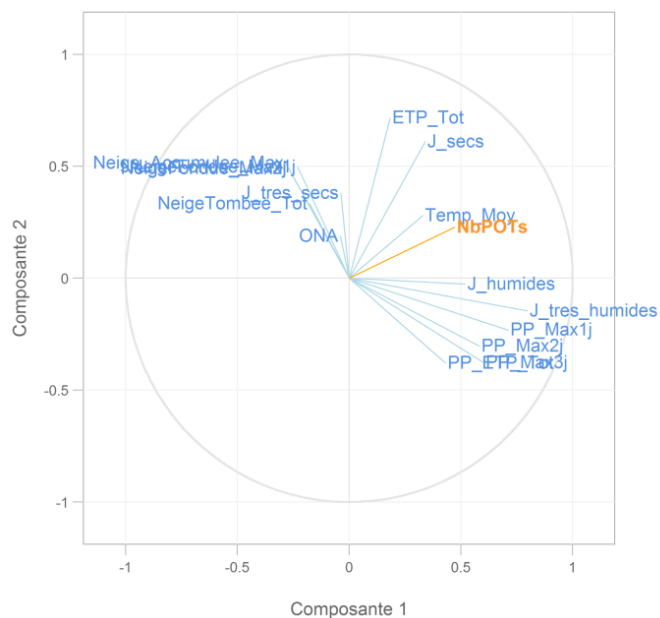
BOUSSOIT (35611002)



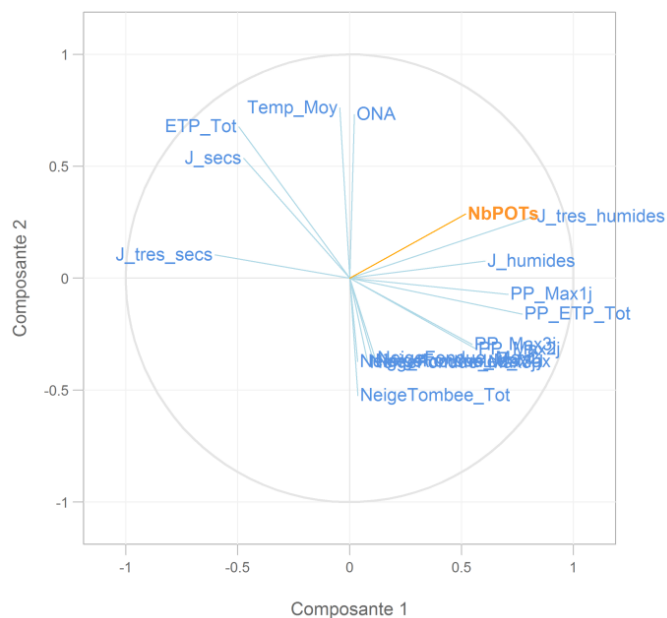
RONQUIERES (23711002)



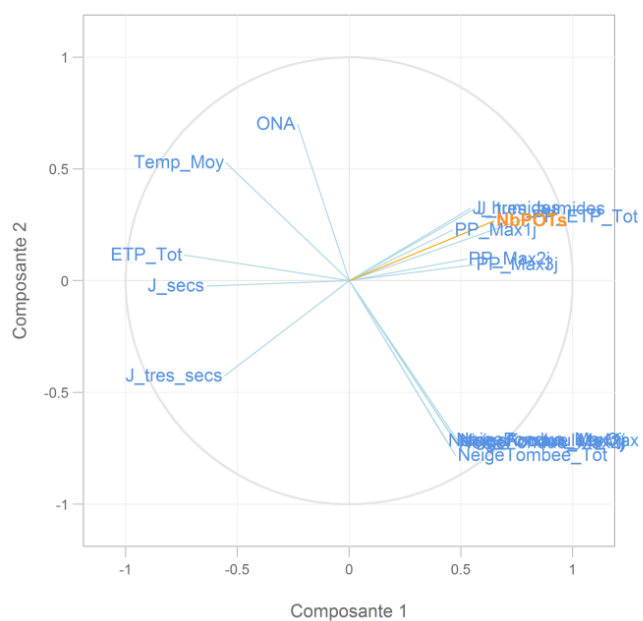
Rosières (L5370-L7530)



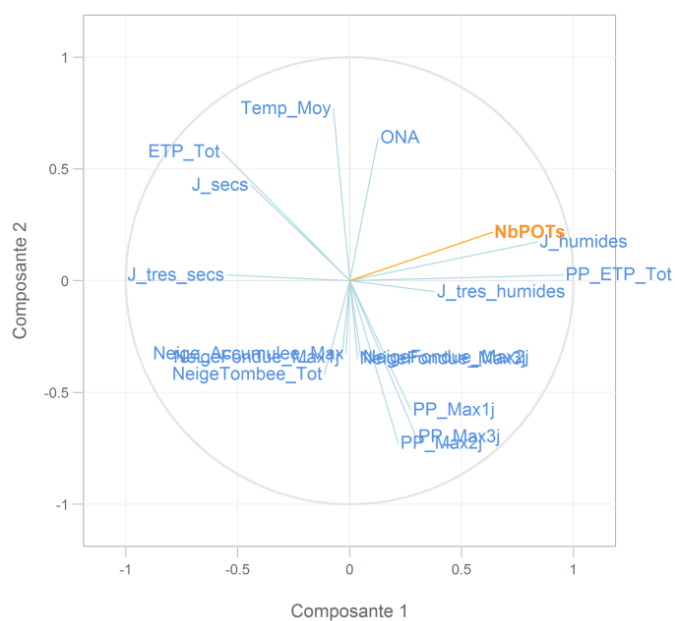
Suzeryl (L5460)



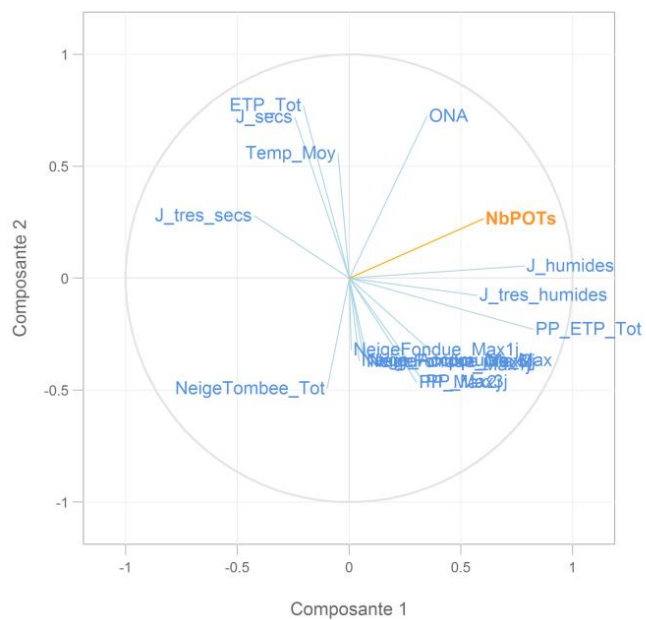
Saint-Rémy-Geest (L5720)



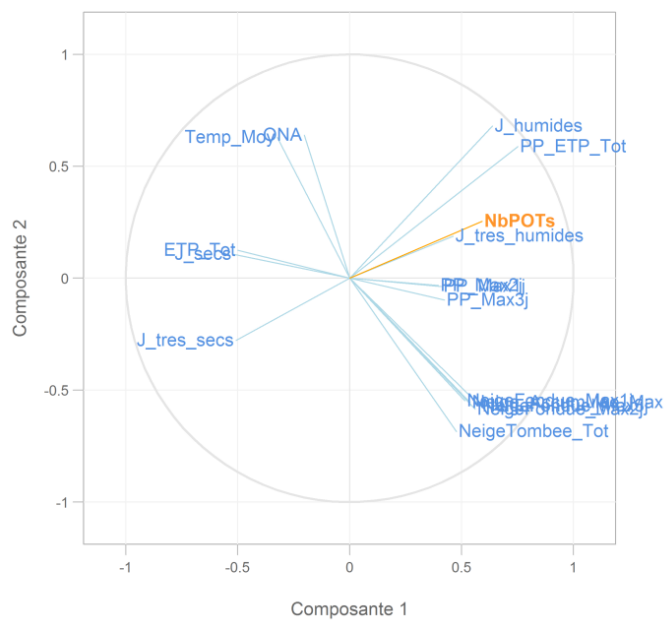
WIHERIES (79441002)



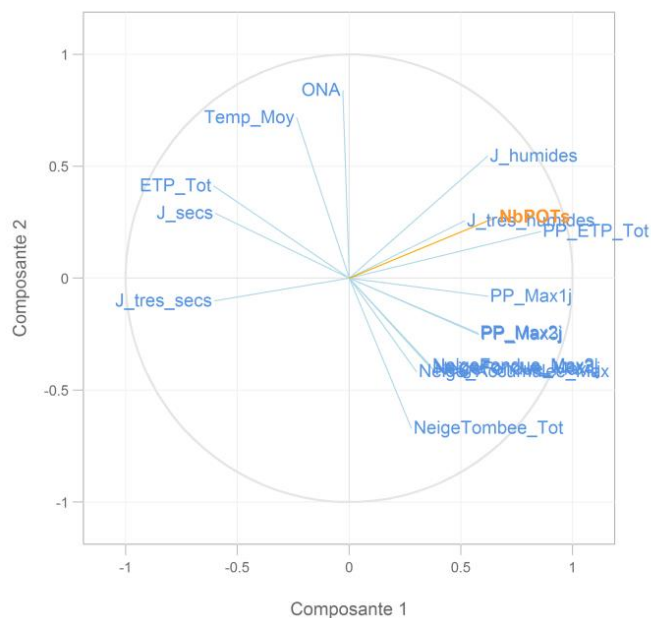
CERFONTAINE (78911002)



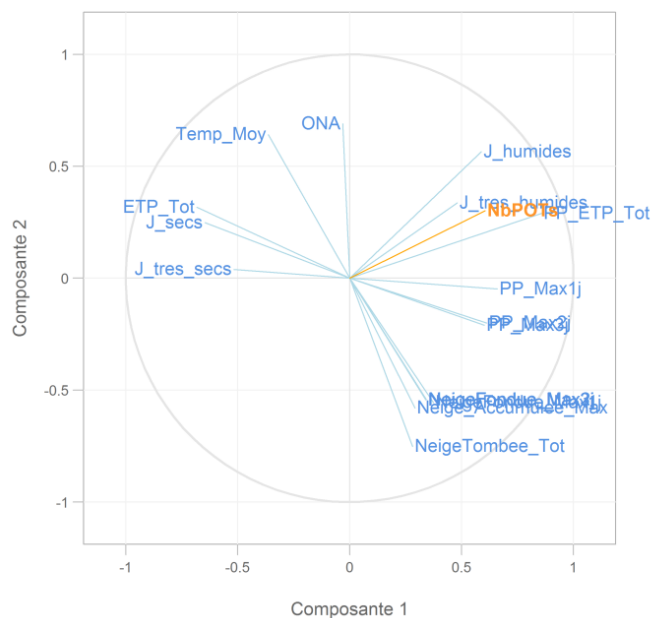
TREIGNES (90211002)



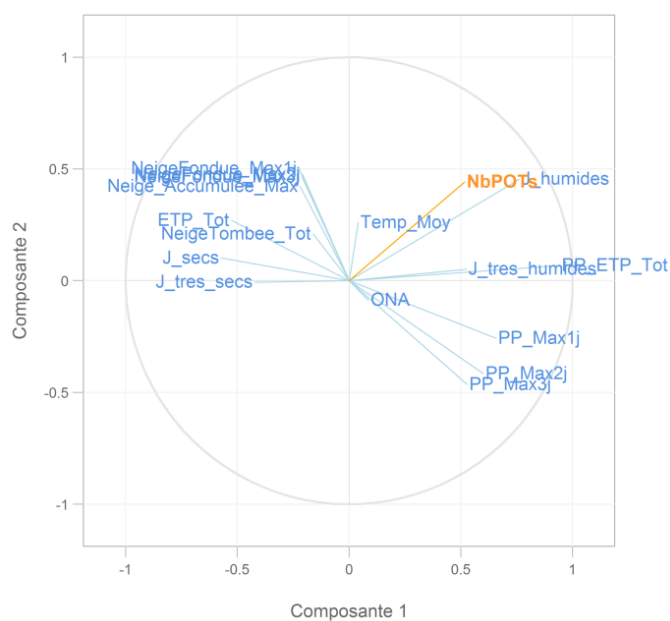
HUCCORGNE (7244SVC2)



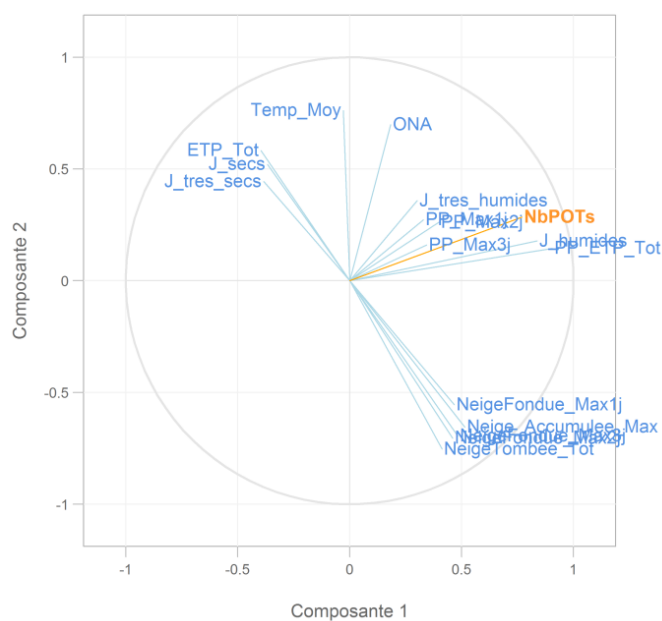
Wanze (L5820)



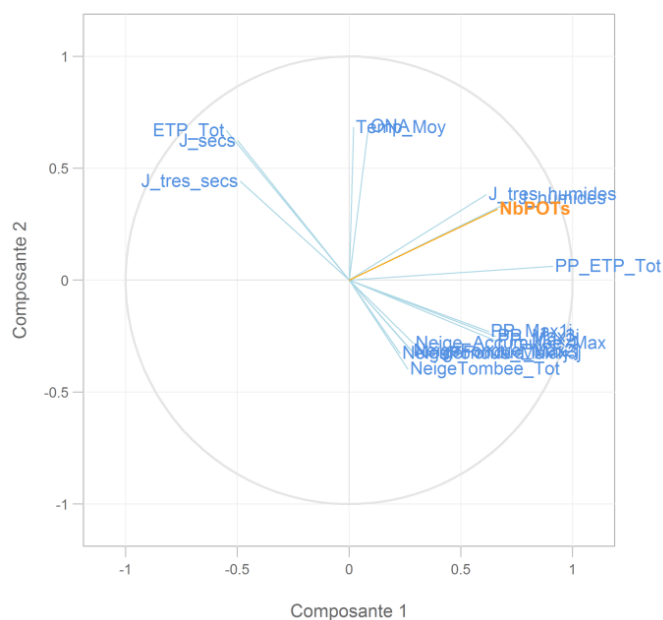
BERGILERS Amont (55721002)



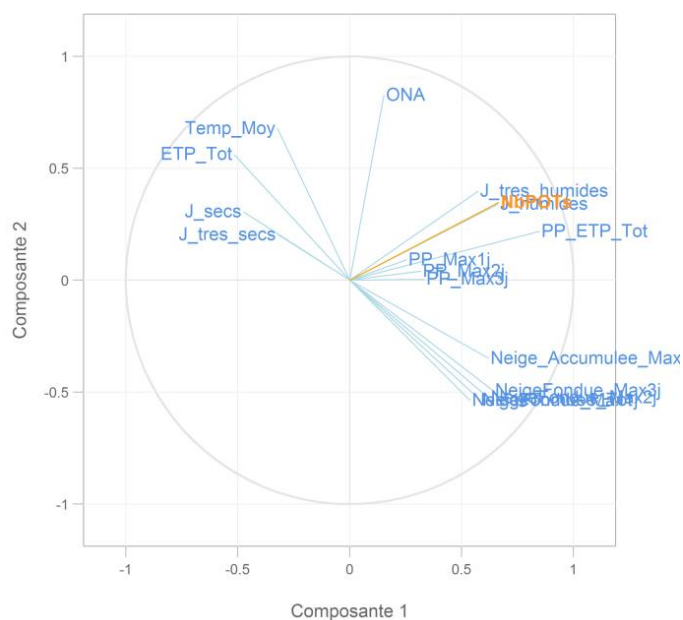
SAUHEID (58261002)



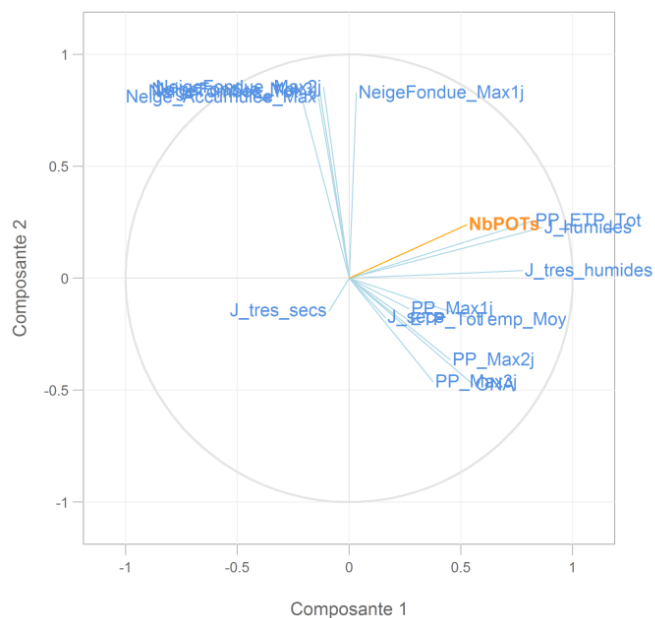
CHAUDFONTAINE Pisc (6228SVC2)



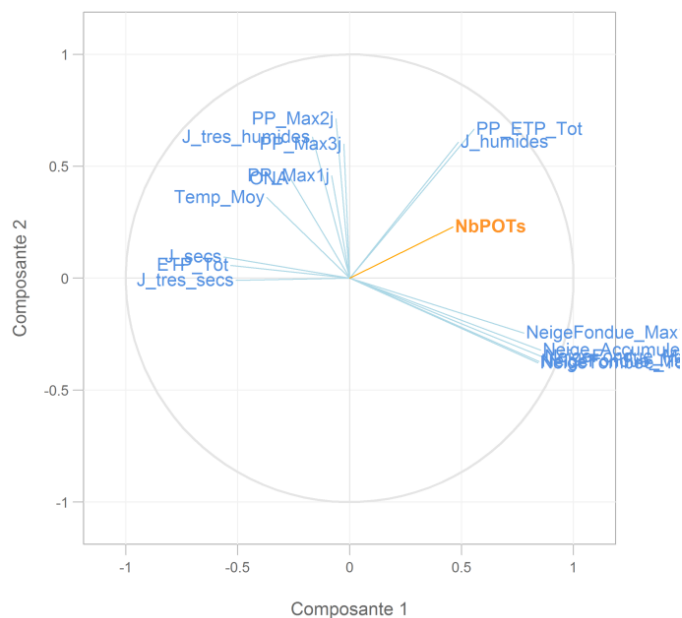
Theux (L5860)



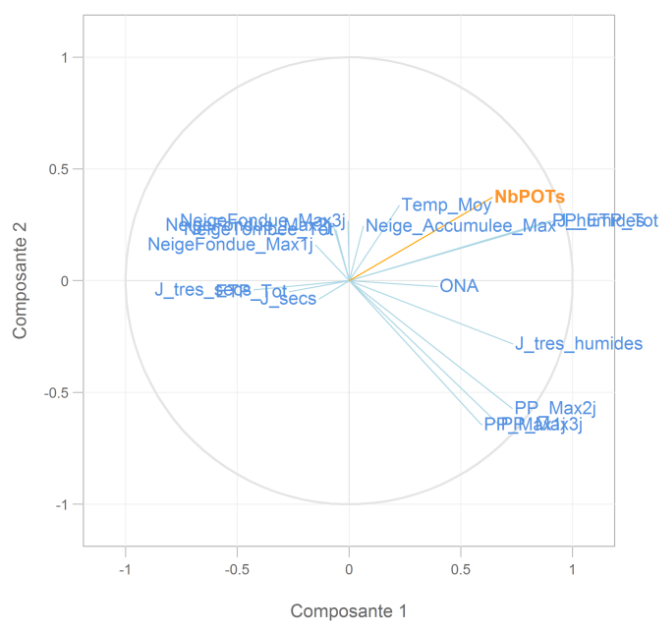
TROIS-PONTS (68321002)



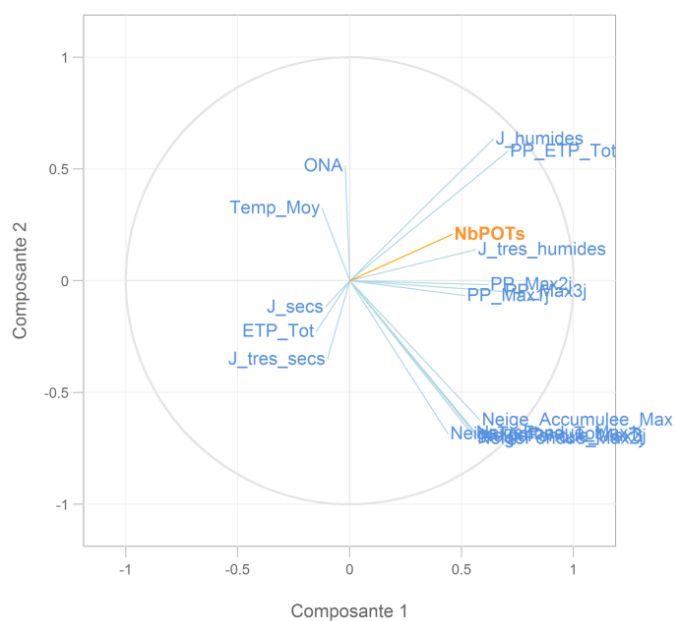
MABOMPRE (60211002)



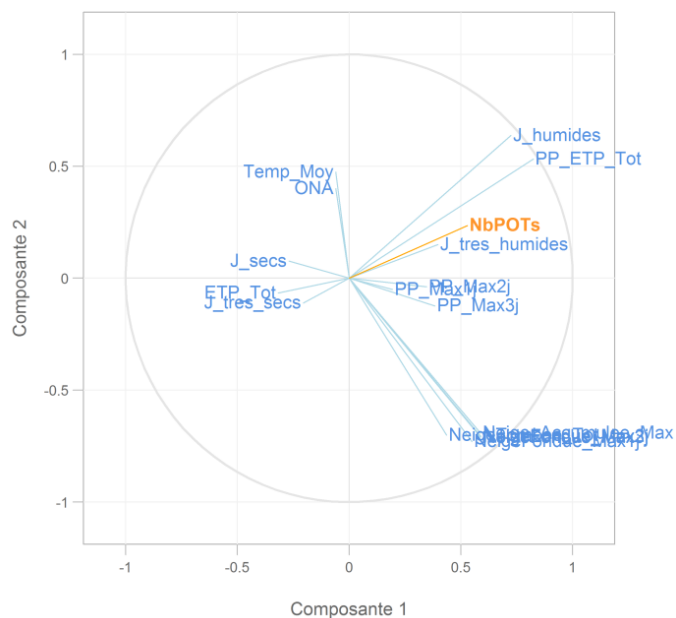
Martelange (L5610)



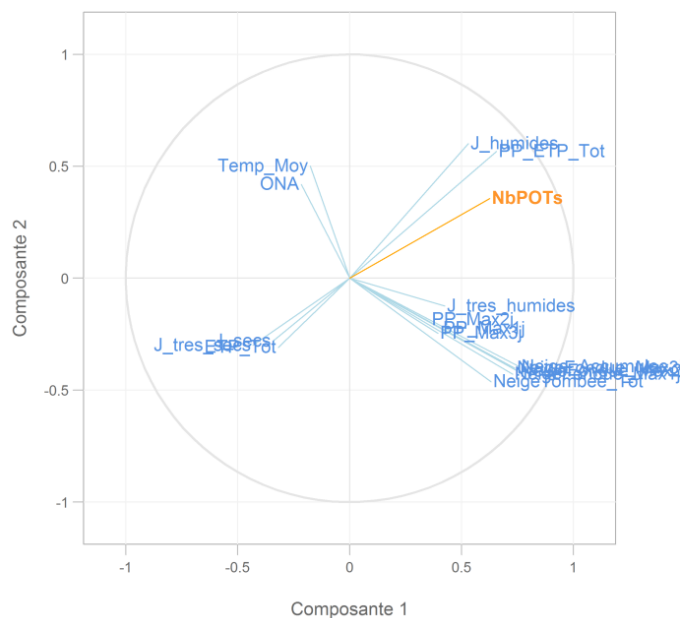
SAINTE-MARIE (95711002)



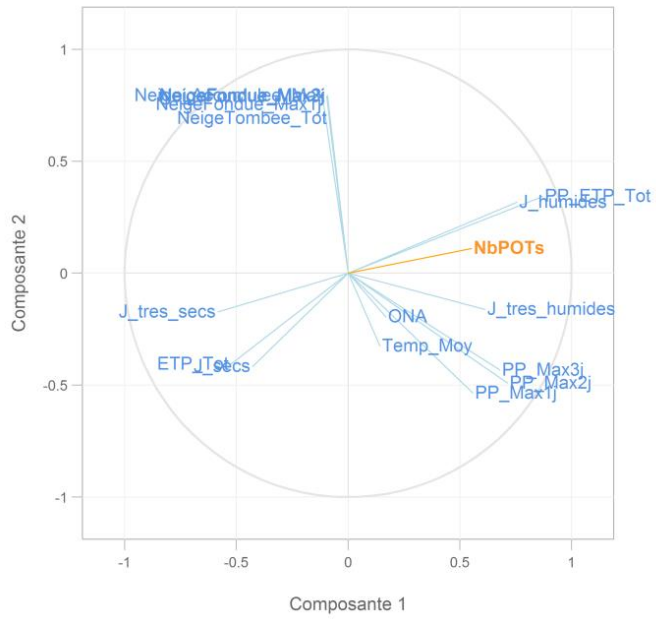
Chantemelle (L5880)



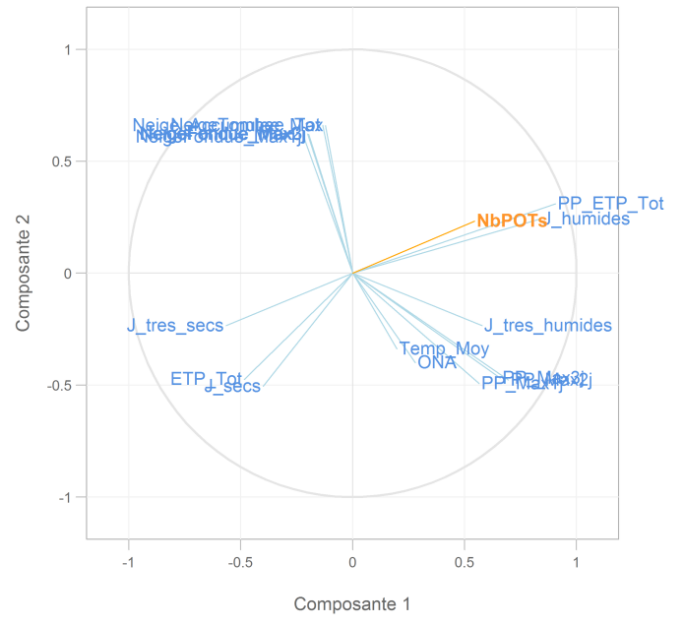
Harnoncourt (L5520)



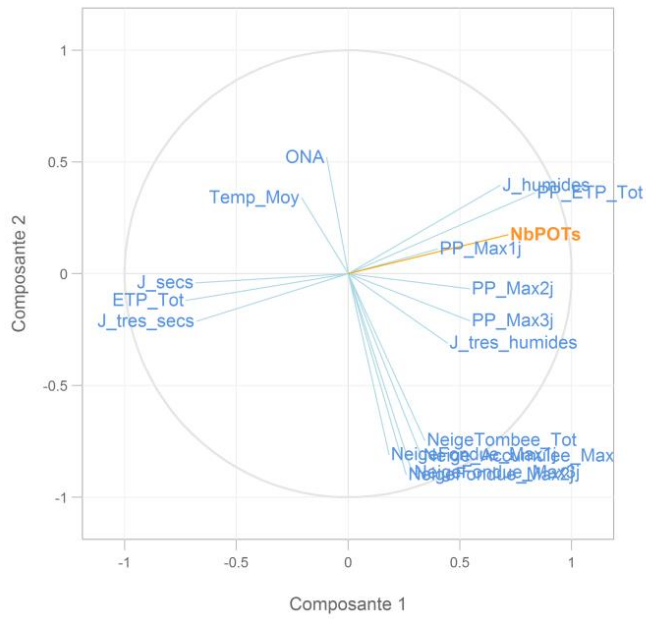
GENDRON (82211002)



DAVERDISSE (83411002)



Graide (L5540)



Profondeville (L6000-6001)

