

Le modèle atmosphérique régional MAR peut-il estimer précisément les précipitations, y compris extrêmes, en Province de Liège ?

Application au cas spécifique des inondations de juillet 2021



Elise Faulx

Travail de fin de bachelier | Bachelier en sciences géographiques

Année académique 2021-2022

Remerciements

Je voudrais remercier Nicolas Ghilain, mon promoteur, pour son aide, sa confiance, son investissement sa bienveillance. Merci également pour les nombreuses pistes fournies.

Ensuite, je remercie Sébastien Doutreloup et Quintia Vaessen pour le temps passé à lire ce travail.

Enfin, je voudrais remercier ma famille pour la relecture attentive de mon travail.

Table des matières

0.Introduction	6
Le régime de précipitations en Belgique (et plus particulièrement en Province de Liège).....	6
Les précipitations habituelles.....	6
Les précipitations fortes et extrêmes	9
Les précipitations exceptionnelles du 13 au 15 juillet 2021	11
Les outils	12
Les pluviomètres	12
Le modèle atmosphérique régional MAR.....	13
La structure du travail	13
1.Données	14
Données pluviométriques	14
Données du modèle MAR.....	15
2.Méthodologie.....	16
Méthode d'évaluation de la qualité des observations pluviométriques.....	16
Classifications automatiques	16
Classification sur base des cumuls annuels	16
Classification sur base des intervalles de 14 jours	17
Indicateurs statistiques.....	18
Graphiques.....	19
Dendrogrammes.....	19
Boite à moustaches	19
Diagramme de Taylor	19
Régression linéaire simple	20
Evolution temporelle	20
Méthode d'évaluation de la qualité des simulation MAR	20
Indicateurs statistiques	20
Graphiques.....	21
3.Evaluation de la qualité des observations pluviométriques	22
Analyse du groupement établi sur base des cumuls annuels.....	22
Question de la représentativité de la période d'étude	22
Caractéristiques en fonction des groupes	24
Valeurs.....	24
Qualité	26
Interprétation du groupement.....	26
Analyse de la qualité des observations pluviométriques	29

Analyse du groupement établi sur base des intervalles de 14 jours	32
Question de la représentativité de la période d'étude	33
Caractéristiques en fonction des groupes	35
Valeurs	35
Qualité.....	38
Interprétation du groupement	38
Analyse de la qualité des observations pluviométriques	39
Analyse par année	44
Détermination des classes de qualité des observations pluviométriques	44
4.Evaluation de la qualité des simulations MAR.....	50
En général	50
Evaluation de la qualité station par station	50
Comparaison des valeurs journalières	50
Analyse de la corrélation et de la RMS.....	52
Analyse du biais.....	52
Comparaison des cumuls annuels	54
Analyse de la corrélation et de la RMS.....	56
Analyse du biais.....	57
Détermination des classes de qualité des simulation MAR	58
Les différents facteurs explicatifs.....	60
La qualité des pluviomètres.....	60
Les groupements de pluviomètres (ou les régimes pluviométriques)	61
L'intensité de précipitation (journalière).....	63
Pour l'épisode du 13 au 15 juillet 2021	66
Contexte atmosphérique.....	66
Modélisation MAR	72
5.Conclusions et perspectives	78
6.Bibliographie.....	80
7.Annexes	84

0. Introduction

L'objectif de ce travail est de répondre à la question posée dans le titre : « Le modèle atmosphérique régional MAR¹ peut-il estimer précisément les précipitations habituelles et extrêmes en Province de Liège ? ». Ainsi, il s'agit de déterminer la validité au présent du modèle MAR en ce qui concerne les précipitations², et à déterminer les facteurs qui influencent son exactitude et sa précision. Une attention particulière sera accordée aux précipitations extrêmes, plus particulièrement celles qui ont causé les inondations de juillet 2021 en Province de Liège.

Ce travail s'inscrit dans une recherche plus longue, au cours de laquelle il sera nécessaire d'utiliser le modèle MAR pour prédire les précipitations futures. D'une part, cette recherche pourrait permettre de déterminer les tendances futures à long termes, tant pour les précipitations habituelles (estimation de la quantité de précipitations annuelles attendues) qu'extrêmes (estimation des périodes de retour des événements extrêmes). D'autre part, elle tendra à améliorer la prévision à court termes du modèle afin de pouvoir avertir la population des inondations en approche le plus tôt possible.

0.1. Le régime de précipitation en Belgique (en plus particulièrement en Province de Liège)

0.1.1. Les précipitations habituelles

Les précipitations constituent un enjeu important pour nos sociétés. Elles ont un impact notamment sur l'agriculture, l'économie, le tourisme, les ressources en eau, l'énergie ou encore la biodiversité (Wyrd,2018).

Si on considère la classification des climats de Köppen³, c'est la seconde lettre qui se rapporte au régime pluviométrique. Dans le cas de la Belgique, on se situe dans un climat de type « Cfb », où la lettre « f » indique que le climat est « humide ». Ainsi, il pleut tout au long de l'année et le mois le plus sec est censé recevoir une quantité de précipitations supérieure à 60 millimètres. Ce climat humide s'explique par la circulation atmosphérique générale, qui produit généralement une dépression dans la zone des latitudes moyennes, ainsi que par la proximité de l'océan Atlantique (Hufty, 2001 ; Wyrd, 2018).

Selon le site de l'IRM (2022), il pleut en moyenne 910 millimètres par an en Belgique, répartis en 142 « jours de précipitations »⁴. Les précipitations sont maximales en hiver (culmine en décembre) et minimales au printemps (minimum en avril).

Comme on peut le voir sur les figures 1 et 2, la Province de Liège comptabilise généralement une quantité de précipitations supérieure aux valeurs moyennes belges. Et, même au sein de cette province, il y a des différences importantes de régimes pluviométriques. On peut dire qu'il s'agit même de la région la plus contrastée de Belgique.

¹ Un aperçu général du modèle MAR sera fourni à la fin de cette introduction.

² Tous les types de précipitations sont considérés (eau, grêle, neige...). Pour les précipitations solides, elles seront d'abord fondues afin d'avoir des valeurs de hauteurs comparables aux précipitations liquides.

³ Adaptée par la suite par Greiger.

⁴ « Journée où une quantité d'au moins 1 mm a été récoltée » (IRM, 2020).



Quantités de précipitations annuelles moyennes
Normales 1991-2020

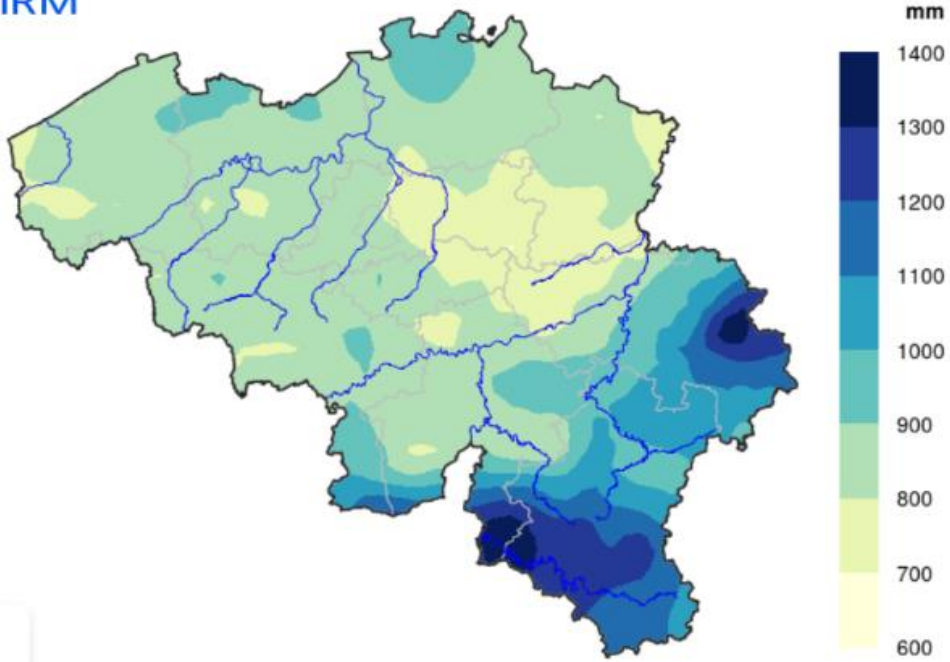


Figure 1 : Quantité de précipitations moyennes annuelles en Belgique (IRM, 2022).
Echelle : 1/2 000 000



Nombre moyen de jours de précipitations par an (1 mm/jour)
Normales 1991-2020

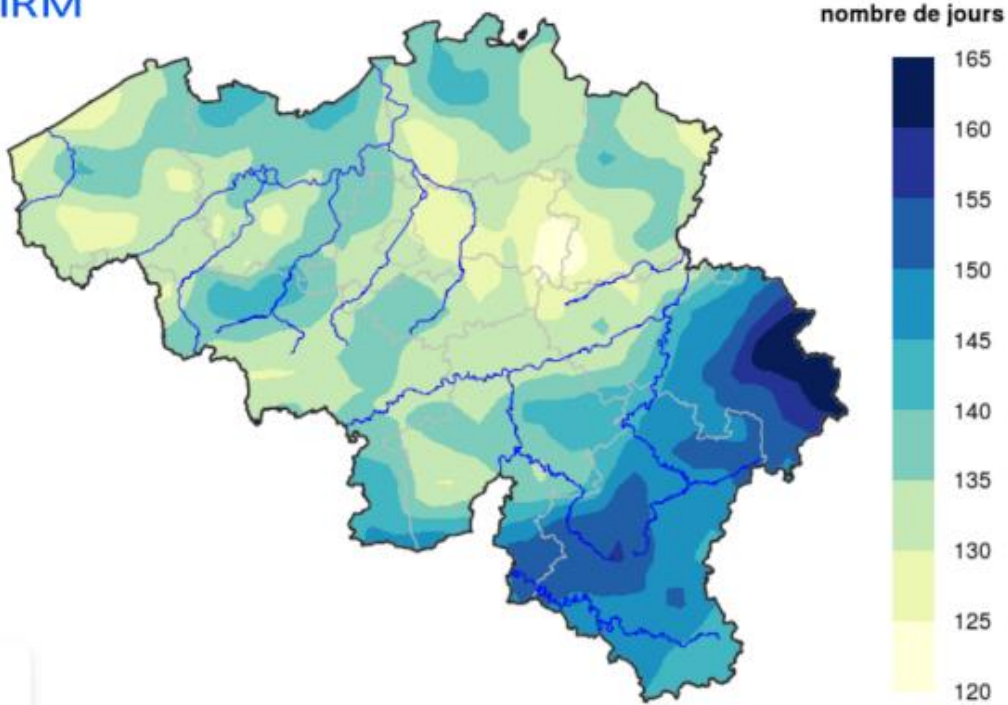


Figure 2 : Nombre moyen de jour de précipitation (>1mm par jour) par an (IRM, 2022).
Echelle : 1/2 000 000

Entre la période 1901-1980 et la période 1980-2019, l'IRM signale une augmentation des précipitations de 6%. Et depuis 1980, on a une légère tendance (non significative⁵) à l'augmentation des précipitations. Le nombre de jour de pluie n'a pas vraiment évolué (Bertrand *et al.*, 2020).

La figure 3 montre que, au niveau de la Province de Liège, cette tendance est moins marquée et non significative. On ne note pas de points noirs sur la région (qui correspondent aux stations dont les tendances sont considérées comme significative⁶)

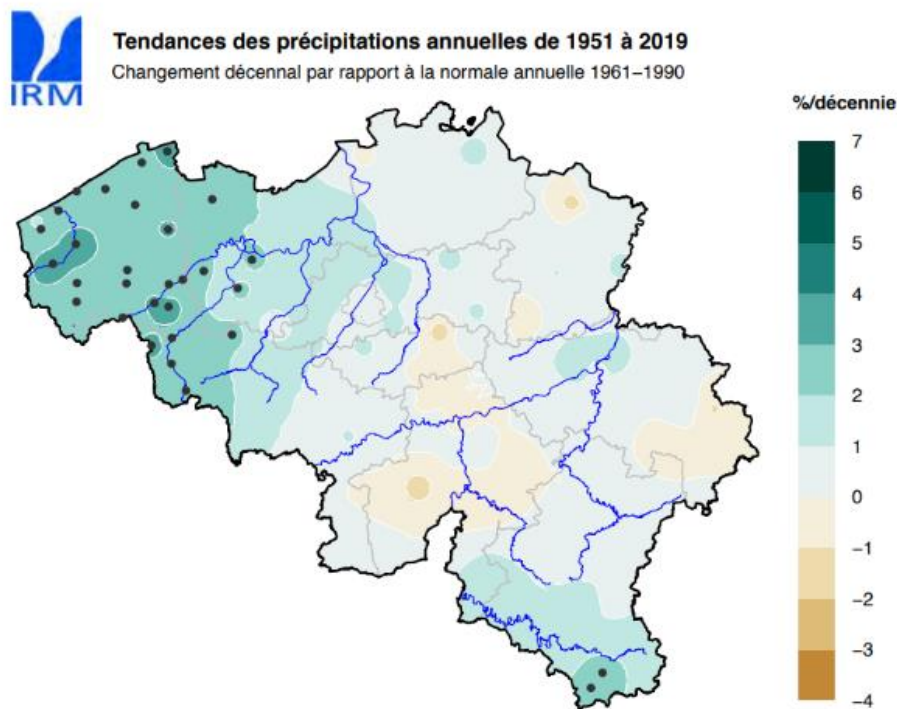


Figure 3 : Changement observé dans les précipitations annuelles normalisées sur la période 1951-2019 (Bertrand *et al.*, 2020). Points noirs = stations dont les tendances sont considérées comme significative (seuil de confiance à 95%). Echelle : 1/2 000 000

A l'échelle des saisons, l'IRM rapporte une tendance (depuis 1980) à l'augmentation pour l'hiver et l'été ainsi qu'une tendance à la diminution pour l'automne (Bertrand *et al.*, 2020).

Notons que selon Wyard (2018), la quantité de précipitations serait fortement influencée par l'Oscillation Nord-Atlantique (indice NAO). Cela se calcule sur base de la différence normalisée entre la pression atmosphérique au niveau des Açores et celle au niveau de Reykjavik. Une situation de NAO positif se réfère la situation classique où l'anticyclone dynamique est positionné sur les Açores et la dépression dynamique est située à proximité de l'Islande. À l'inverse, un indice négatif indique une inversion des positions de l'anticyclone et de la dépression. Cet indice est fréquemment utilisé car il exerce une influence forte sur le climat européen. Pour résumer brièvement son impact sur les précipitations, un indice positif correspond à des conditions humides alors qu'un indice négatif correspond à des conditions plus sèches. Notons que l'impact de cet indice est plus important en hiver (Wyard, 2018 ; Barry & Chorley, 1993)

⁵ Seuil de confiance à 90%.

⁶ Seuil de confiance à 95%.

Enfin, concernant l'évolution attendue dans le futur, on peut dire qu'elle est très incertaine car elle dépend de notre manière d'agir future face au réchauffement climatique. Dès son cinquième rapport (AR5), le Giec développe plusieurs divers scénarii, en fonction de la valeur du forçage radiatif⁷ attendu pour 2100, qui varierait alors entre 1,9 et 8,5 Watt par m². Il s'agit des scénari RCP⁸, et les quantités actuelles de CO₂ suggèrent que nous nous dirigeons davantage vers le scénario RCP-8.5, c'est-à-dire le plus pessimiste (Vallet, 2021 ; Berckmans *et al.*, 2020).

Lors du dernier rapport du Giec (AR6) ces scénarii, en plus d'avoir été légèrement modifiés et précisés, ont été associés à une trajectoire socio-économique SSP⁹ allant de 1 (meilleur scénario) à 5 (scénario le plus alarmant). Ces trajectoires sont déterminées en fonction des projections démographiques et des décisions politiques¹⁰. On aura donc par exemple les scénarii basés sur le développement durable SSP 1- 2.6, le scénario intermédiaire SSP 2-4.5 ou encore le scénario basé sur les énergies fossiles SSP5-8.5. (Vallet, 2021).

D'une manière générale, on peut dire qu'on observe une augmentation des précipitations en hiver et une diminution de celles-ci en été, mais l'évolution de la quantité totale annuelle reste inconnue. En effet, les scénarios de l'avant-dernier rapport du Giec (AR5), intégrés dans le modèle ALARO-0, montraient une diminution à l'échelle annuelle sur la Province de Liège, pour les scénarios RCP-4.5 et RCP-8.5. Le scénario RCP-4.5 montre une augmentation des précipitations assez nette assez nette sur les saisons hivernales et d'automne (plus de 10%), une faible augmentation au printemps (moins de 10%) et une légère diminution en été. Le scénario RCP-8.5 montre une augmentation de plus de 10% en automne et au printemps et une augmentation de plus de 15% en hiver. (IRM, 2022).

En revanche, le scénario SSP5-8.5 intégré dans le modèle MAR montrait une diminution des valeurs de précipitations à l'échelle annuelle. En été, les précipitations diminueraient de 15% d'ici 2030. Xavier Fettweis lors de son intervention au parlement de Wallonie (2021) nous expliquait que, si l'on suivait ce scénario pessimiste SSP5-8.5, on verrait la quantité de précipitations annuelle augmenter jusque 2030-2040, puis diminuer après ce pic. Si on arrivait à rester sur un scénario plus optimiste (comme le SSP1-2.6), le Belgique connaîtrait uniquement une longue augmentation de la quantité de précipitations annuelle, qui finirait par stagner (Parlement de Wallonie, 2021).

0.1.2. Les précipitations fortes et extrêmes

A côté de ce régime de précipitations courant, la Belgique connaît également plusieurs fois par ans des épisodes de précipitations plus forts. Les prendre en considération est d'une importance cruciale pour nos sociétés, car elles ont un impact important sur les événements extrêmes comme les inondations¹¹.

⁷ Différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant du système terre, mesuré au sommet de l'atmosphère.

⁸ RCP: representative concentration pathway

⁹ SSP: shared socioeconomic pathway

¹⁰ Voir Annexe 1 pour des précisions sur les scénarios SSP

¹¹ Notons que le lien entre précipitations et inondations n'est pas toujours immédiat. En effet, dans le cas des précipitations neigeuses, elles favoriseront les inondations un temps plus tard, lors de leurs fontes. La fonte rapide des neiges est impliquée dans environ 50% des inondations dans les vallées ardennaises. Les cas de fonte de neige ne rentrant pas dans la question de recherche, ils ne seront pas analysés dans ce rapport (Epicum *et al.*, 1996).

Si on considère uniquement la station de Uccle, sur la même période de référence (1991-2019), on compte 2,24 jours par an dont les précipitations sont qualifiées « d'abondantes ». Et la contribution de ces précipitations abondantes par rapport au total de précipitation annuel vaut environ 12,8%¹² (données provenant de Bertrand *et al.*, 2020).

Le sixième rapport du Giec affirme que l'intensité et la fréquence des précipitations extrêmes a augmenté depuis 1850 en raison du changement climatique. A l'échelle belge, le rapport de l'IRM indique que les précipitations extrêmes sont de plus en plus fréquentes. En effet, depuis 1981, on observe une tendance à l'augmentation du nombre de jours avec des précipitations abondantes durant l'été (annexe 2) et de la part par de précipitations abondantes par rapport au cumul total annuel (annexe 3). De plus, les précipitations maximales annuelles sur une heure ont également augmenté (annexe 4). Notons que les extrêmes ont été également fortement influencés par la NAO (Bertrand *et al.*, 2020 ; Willems, 2013a ; Aria *et al.*, 2021)

Concernant les projections futures, à l'exception des scénarii optimistes (comme le RCP-2.6) pour lesquels la tendance semble stable, les précipitations extrêmes vont augmenter d'ici 2100, tant en termes de fréquence (figure 5) qu'en terme d'intensité et de durée de l'évènement (figure 6). Et cette tendance est particulièrement marquée sur la Province de Liège (annexe 5). Les nouveaux scénarii SSP sont encore plus alarmants indiquent une augmentation encore nettement plus claire des précipitations extrêmes (Berckmans *et al.*, 2020 ; Aria *et al.*, 2021 ; Willems, 2013b).

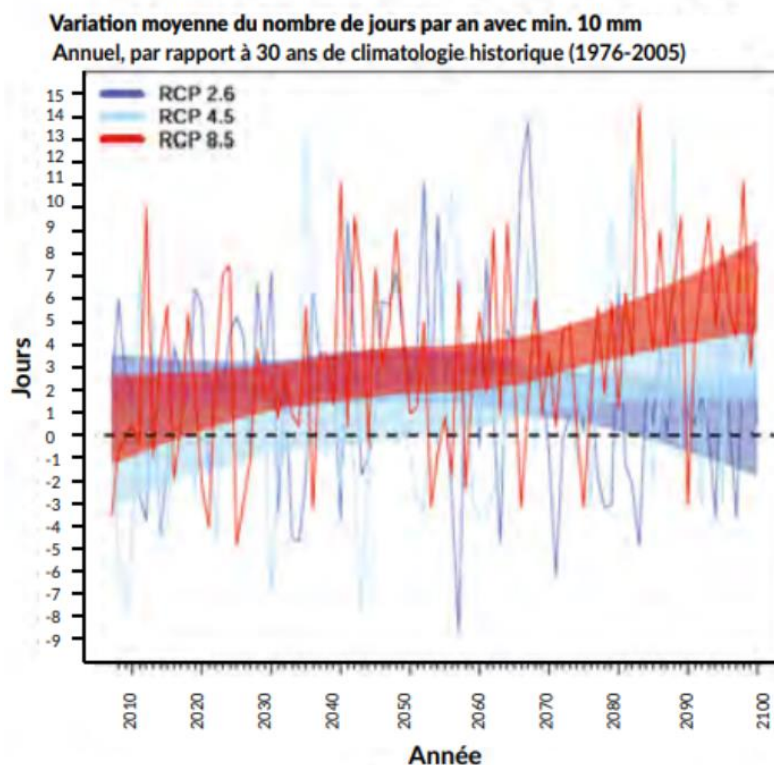


Figure 5 : Augmentation du nombre moyen de jour de précipitation (>10 mm par jour) par an en fonction des scénarii du rapport AR5 (Berckmans *et al.*, 2022)

¹² Période de référence de 1892 à 2019.

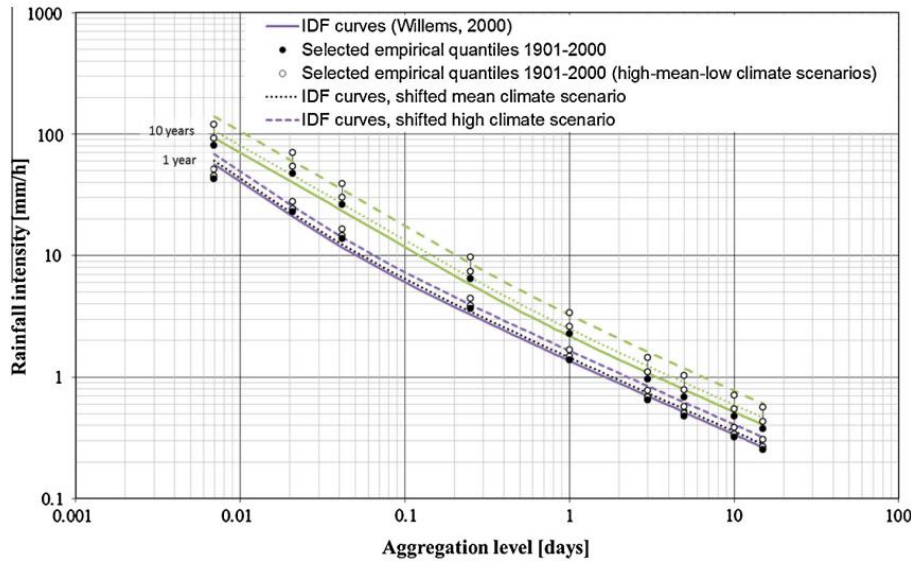


Figure 6 : Courbe IDF (intensité-durée-fréquence) pour Uccle en fonction de deux scénarii et pour deux fréquences pour 2100 (Willems, 2013).

Plusieurs phénomènes liés au réchauffement climatiques permettent d'expliquer l'augmentation des précipitations extrêmes. Premièrement, plus l'atmosphère se réchauffe, plus elle est capable de contenir une quantité importante d'eau sous forme gazeuse¹³. La quantité qui peut être contenue, déplacée et réémise par l'atmosphère est donc de plus en plus importante (Kahraman *et al.*, 2021).

Deuxièmement, le réchauffement climatique provoque un ralentissement de la dynamique atmosphérique. En effet, la différence de température entre l'équateur et les pôles constitue le moteur initial des masses d'air. L'air chaud de l'équateur monte, créant une accumulation d'air au niveau de la tropopause alors que l'air froid des pôles descend, en s'accumulant au niveau de la surface. Pour rééquilibrer l'air, il y a un mouvement de masses d'air en direction des pôles en haute troposphère et un autre en direction de l'équateur en bas de la troposphère. Les choses sont bien entendu plus complexes mais ce n'est pas le sujet de ce rapport. Ainsi, avec la fonte des glaciers et calottes situées aux pôles, les températures se réchauffent plus vite aux pôles qu'au niveau de l'équateur. La différence de température diminue et les masses d'air sont amenées à rester plusieurs jours au même endroit. En effet, le risque d'avoir des situations de blocages, comme cela a été le cas lors des inondations de juillet 2021, pourrait être 14 fois plus élevé d'ici la fin du siècle (Kahamaram *et al.*, 2021 ; Hufty, 2001)

0.1.3. Les précipitations exceptionnelles du 13 au 15 juillet 2021

Cet épisode de précipitations intense et long a affecté une bonne partie de l'Europe de l'Ouest (Belgique, Allemagne, Luxembourg, Pays-Bas). Sur trois jours, il a plu un peu plus de 120 millimètres en moyenne sur l'ensemble de la Province de Liège, avec des zones qui ont enregistré plus de 200 millimètres (Mont-Rigi, Spa, Ternell, Jalhay). Il a donc plu nettement plus que ce qu'il pleut d'habitude sur tout le mois de juillet. La figure 7 quantifie notamment les épisodes pluvieux maximaux (de trois jours) par année, sur la Province de Liège. On peut voir que l'événement de 2021 était le plus important jamais enregistré depuis au moins 1950 (Parlement de Wallonie, 2021 ; Krienkamp *et al.*, 2021).

¹³ Il s'agit de la relation de Clausius Clayperon.

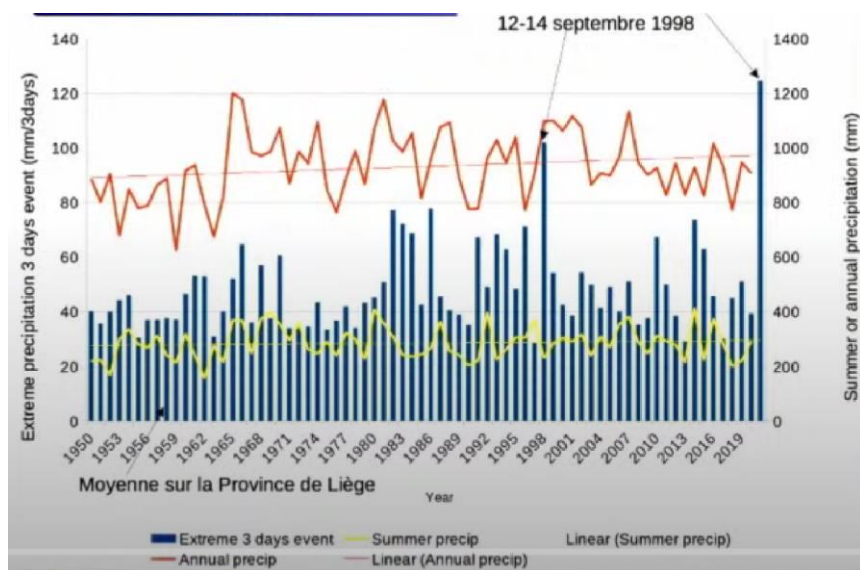


Figure 7 : Moyenne journalière des cumuls (sur trois jours) maximums pour chaque année en Province de Liège (Parlement de Wallonie, 2021).

Aujourd’hui, on sait que cet événement est lié au réchauffement climatique, et que des événements de ce genre sont amenés à se produire plus fréquemment dans le futur. La période de retour pour un environnement actuel serait de 400 ans, mais le modèle MAR suggérait qu’elle pourrait descendre à seulement 10-20 ans pour les décennies de 2030 et de 2040 (selon le scénario SSP5-8.5) (Krienkamp *et al.*, 2021 ; Parlement de Wallonie, 2021).

0.2. Les outils

0.2.1. Les pluviomètres

Deux types pluviomètres automatiques sont utilisés dans ce rapport. Premièrement, les **pluviomètres à pesée**, dans lesquels l’eau recueillie est pesée en continue et vidée par un siphon lorsque la quantité est trop importante. Deuxièmement, les **pluviomètres à augets basculeurs** (annexe 6), un dispositif qui comprend deux augets symétriques situés sur un pivot. L’eau recueillie par la surface réceptrice se déverse dans un des augets qui bascule (et se vide) lorsqu’il est suffisamment rempli. C’est alors l’autre auget qui vient prendre sa place afin de se remplir. Chaque basculement est comptabilisé et correspond à une certaine hauteur de précipitations (Petit, 1993 ; IRM, 2022)

Bien que les valeurs obtenues par les pluviomètres soient plus fiables que celles obtenue par la modélisation, on ne peut pas dire que les pluviomètres permettent une représentation exacte de la « réalité des précipitations » car ils contiennent diverses sources d’erreurs. En effet, le vent, l’effet Splash¹⁴, les obstacles, le rayonnement solaire¹⁵ ou encore l’inclinaison du terrain¹⁶ font varier et donc perturbent la hauteur de précipitations obtenue dans le récipient. De plus, des événements imprévisibles tels qu’un renversement du bocal, ou encore la présence éventuelle d’une branche l’obstruant l’ouverture du pluviomètre sont toujours susceptibles de se produire. Enfin, notons que

¹⁴ Effet de l’impact des gouttes de pluie sur la surface sur laquelle elle tombe.

¹⁵ Cela peut provoquer de l’évapotranspiration.

¹⁶ Cela peut mener à une surestimation des données (Annexe 7).

l'aspect unique des mesures est également un frein à la confiance que nous pouvons accorder aux pluviomètres (Petit, 1993).

Ainsi, avant d'utiliser ces données de terrains pour évaluer la qualité des prévisions du modèle MAR, une longue partie préliminaire visant à qualifier (et à quantifier) la qualité des stations pluviométriques a été réalisée.

0.2.2. Le modèle atmosphérique régional MAR

Pour comprendre la modélisation météorologique et climatique, il faut savoir qu'il y a deux grands types de modèles. D'une part, les modèles globaux, modélisent la dynamique atmosphérique générale de l'ensemble du globe. D'autre part, les modèles climatiques régionaux, comme le modèle MAR, se concentrent sur une zone plus petite, comme un pays. Cette restriction de la taille de la zone permet une diminution du nombre de données, ce qui permet au modèle de simuler la météo et le climat avec une résolution plus fine et avec une physique plus complexe. La paramétrisation est réalisée en fonction des caractéristiques de la zone d'intérêt (Wyrd, 2018).

Dans le cas de MAR, le modèle fournit des informations pour la Belgique, avec une résolution horizontale de 5 kilomètres¹⁷ et 24 niveaux verticaux (entre 3 et 18 000 mètres au-dessus de la surface). Notons que des phénomènes plus petits que la résolution peuvent quand même être détectés (Wyrd, 2018).

Pour fonctionner, ces modèles régionaux ont besoin d'un point de départ. Dans le cas de MAR, il reçoit diverses informations (humidité, température, pression, vent) à des intervalles de temps constants et aux frontières latérales. Ces informations proviennent soit de modèles globaux, soit des réanalyses¹⁸. Cela est appelé le mode d'imbrication unidirectionnelle (Wyrd, 2018).

Le modèle MAR prend en compte un grand nombre de phénomènes : la dynamique atmosphérique, le cycle hydrologique de l'atmosphère (et les bilans hydriques en surface), le transfert radiatif à travers l'atmosphère, les bilans énergétiques en surface et l'affectation du sol (y compris les différentes formes de végétations). Les différentes formes de l'eau dans l'atmosphère sont très détaillées. Les précipitations restent cependant un des paramètres les plus compliqués à simuler (Kouassi, 2015).

0.3. Structure du travail

Afin de déterminer la validité du modèle concernant les précipitations, un premier chapitre sera consacré aux données qui ont été utilisées, à savoir les données récoltées aux niveaux des pluviomètres et celles qui ont été simulées par MAR. La méthodologie sera ensuite développée dans le second chapitre.

La troisième partie visera à tester la qualité des données pluviométriques. Pour cela, une méthode de classification des stations sera détaillée et utilisée. Les conclusions tirées dans cette troisième partie seront primordiales pour relativiser celles qui pourront être tirées dans la quatrième partie, centrée sur l'analyse de la qualité des données MAR, par rapport aux données pluviométriques.

Enfin, une brève conclusion clôturera ce travail.

¹⁷ Les modèles globaux ont une résolution d'environ 200 km.

¹⁸ Longue série climatique.

1. Données

1.1. Données pluviométriques

La base de données initiale contenait les valeurs horaires des hauteurs de précipitations pour 16 stations¹⁹, sur la période s'étalant du premier janvier 1996 (à minuit) au 21 novembre 2021 (à 23 heures). Cette base a été obtenue sous réserve d'une demande sur le site du SPW (2022). Cependant, j'ai écarté les stations de Bierset et de Balmoral car elles ont été retirées avant les inondations de juillet 2021.

L'ensemble des 14 stations sont situées dans la Province de Liège. Afin de visualiser leurs positions absolues et relatives, elles ont été localisées sur la figure 8. Les coordonnées ont été obtenues par le site de la SPW (2022), et ont été superposées au fond de carte Openstreetmap (2022) grâce au programme Qgis. Leurs altitudes est indiquée en-dessous du nom de la station.

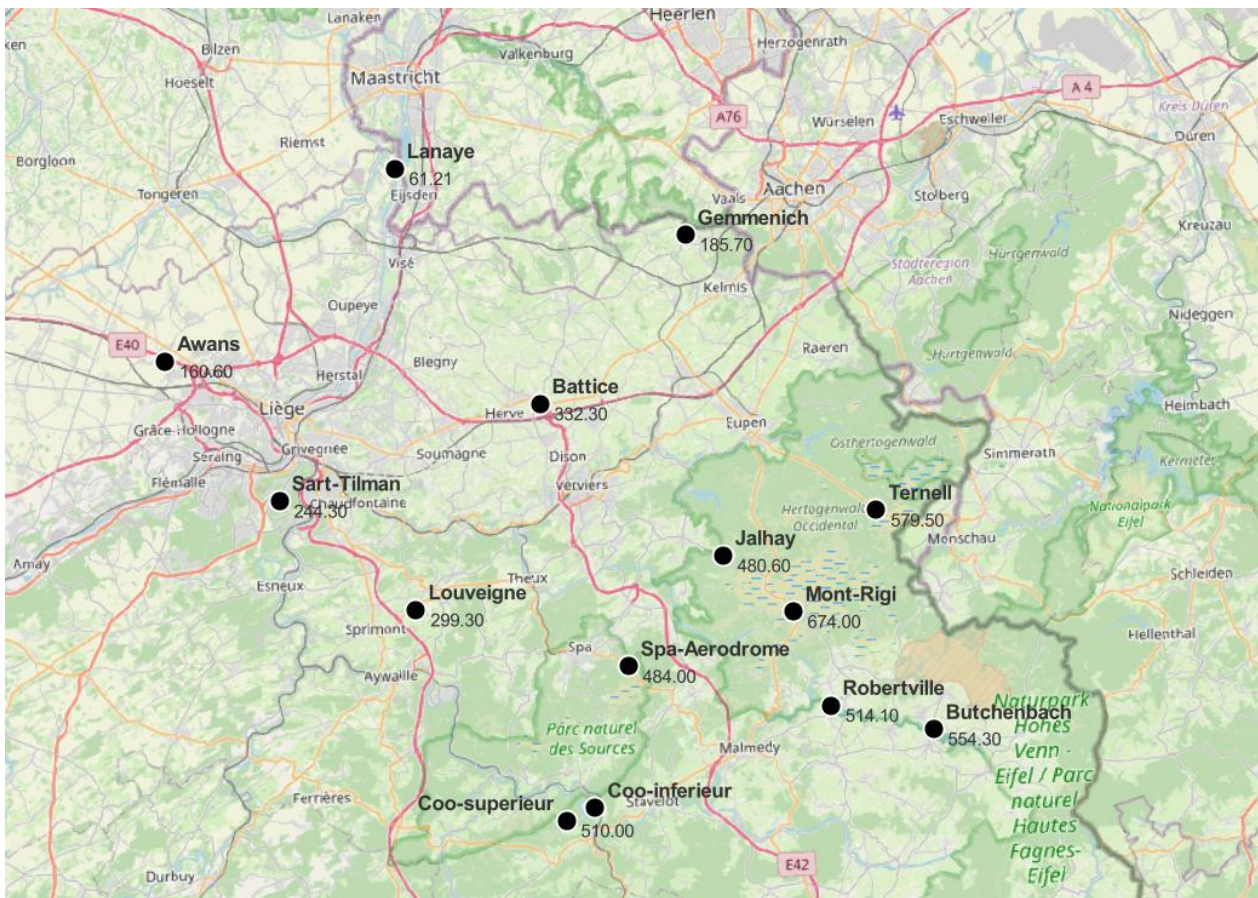


Figure 8 : localisation (et altitudes) des stations pluviométriques utilisées dans le travail. Echelle : 1/400 000

Deux périodes d'étude différentes seront utilisées dans ce travail. Premièrement, j'ai traité une période restreinte allant du premier janvier 2018 au 21 novembre 2021 (maximum disponible pour les données terrains). La question de la représentativité de cette période de quatre ans sera abordée dans la partie relative à l'évaluation de la qualité des observations pluviométriques.

¹⁹ Mont Rigi, Battice, Lanaye, Gemmenich, Robertville, Awans, Butgenbach, Ternell, Sart Tilman, Spa-Aerodr, Jalhay, Louveigné, Coo-Inf, Coo-Sup et Bierset et Balmoral

Deuxièmement, une période élargie sera également considérée. Elle prend en compte les hauteurs de précipitations allant du premier janvier 2002 au 21 novembre 2021. Elle sera utilisée à différentes reprises, notamment pour tenter de valider la période restreinte, ou encore lorsque les résultats entre les deux périodes diffèrent trop. Cette période de 20 ans est pertinente car elle est suffisamment grande pour avoir des résultats statistiques significatifs, mais suffisamment limitée pour éviter les changements structurels météorologiques. C'est pourquoi ce pas de temps est fréquemment utilisé dans les études climatologiques. De plus, les stations de Gemmenich et Lanaye ayant été installées durant l'année de 2001, commencer en 2002 permet d'avoir des données complètes pour ces deux stations.

J'ai alors réalisé les cumuls journaliers sur ces deux jeux de données. Tous les jours incomplets ont été invalidés et enregistré sous la forme « NA ». Les cumuls annuels, moyennes hebdomadaires et moyennes glissantes sur trois jours²⁰ ont été réalisés et seront utilisés pour diverses applications.

1.2. Données du modèles MAR

La base de données du modèle MAR contenait déjà initialement les cumuls journaliers du premier janvier 2001 au 31 décembre 2021, pour 17 stations²¹. Notons que les stations de Coo inférieur et de Coo supérieur sont situées sur le même pixel du modèle, et donc, contrairement à la base de données pluviométriques, ils prendront toujours la même valeur de hauteur de précipitations

Je l'ai ensuite façonnée pour qu'elle corresponde au mieux à la base des pluviomètres. Ainsi, bien que toutes les séries soient complètes, j'ai quand même conservé uniquement les 14 stations qui avaient été sélectionnées pour les données pluviométriques. Et, de nouveau, deux jeux de donnée (une base de données restreinte et une base de données élargie) de période identique aux jeux de données pluviométriques ont été réalisés.

Ensuite, pour permettre une comparaison parfaite, les données qui n'étaient pas disponibles pour les pluviomètres ont également été enregistrées sous l'appellation NA pour la base de données MAR.

Enfin, les cumuls journaliers ayant déjà été réalisés, il a suffi de réaliser les cumuls annuels, moyennes hebdomadaires et moyennes glissantes.

²⁰ Cela consiste à réaliser, pour chaque jour, une moyenne entre le jour considéré, la veille et le lendemain.

²¹ Mont Rigi, Battice, Lanaye, Gemmenich, Robertville, Awans, Butgenbach, Ternell, Sart Tilman, Spa-Aerodr, Jalhay, Louveigné, Coo-Inf, Coo-Sup et Bierset, Balmoral et Vielsalm

2. Méthodologie

2.1. Méthode d'évaluation de la qualité des observations pluviométriques

Pour évaluer la qualité des stations, seule la base de données des observations pluviométriques a été utilisée, et deux stratégies ont été adoptées.

Premièrement, les pluviomètres ont été classés en différents groupes, afin de pouvoir comparer l'évolution temporelle (relative aux précipitations) des pluviomètres similaires entre eux. Les pluviomètres qui semblent s'éloigner de la tendance générale de ses propres groupes (par exemple, avec des pics de hauteur de précipitations différents, trop marqués, trop peu marqués ou encore décalés) seront jugés suspects. Cette première stratégie nécessite donc une méthode de classification des stations, elle sera détaillée ci-dessous.

Deuxièmement, une comparaison inter-années des évolutions temporelles sera réalisée pour chaque station pluviométrique. Un changement marqué d'une année à l'autre dans les données, qui n'aurait pas eu lieu dans les faits, sera alors naturellement jugé suspect.

Au terme de cette partie, les pluviomètres se verront attribuer une note de fiabilité (qualité allant de bonne à médiocre). Cela permettra d'une part d'écarter les stations de qualité jugée trop mauvaise, s'il y en a, et d'autre part de relativiser les informations obtenues pour les stations restantes lors de l'évaluation de MAR (seconde partie du travail).

2.1.1. Classifications automatiques

Afin de classer les différentes stations, j'ai décidé d'utiliser la classification automatique (cluster analysis), via le logiciel R. Ces méthodes ont été tirées du livre de Zuur *et al.* (2007). Afin de maximiser la qualité de l'analyse, j'ai décidé de réaliser deux classifications différentes : une première basée sur les cumuls annuels et une seconde sur les cumuls d'intervalle de 14 jours.

2.1.1.1. Classification sur base de cumuls annuels

La première classification qui a été réalisée se base sur les cumuls annuels. Elle évalue « l'ordre de grandeur » des précipitations tombées à un certain endroit.

Les données intégrées sur le logiciel R sont un tableau de 14 individus (pour les 14 stations) et de 4 variables (correspondant aux 4 cumuls annuels de 2018 à 2021), à l'exception du Mont Rigi qui n'aura que 3 variables car la valeur du cumul annuel de 2018 pour le mont Rigi n'a pas été considérée, et a été encodée sous forme « NA ». En effet, comme les données du Mont Rigi débutent au cours de l'année 2018 et que la fin d'année 2018 semble avoir été particulièrement pluvieuse pour l'ensemble des stations de l'étude, considérer l'année 2018 (avec un coefficient d'extrapolation) aurait conduit à une surestimation des précipitations pour le mont Rigi. Prendre un si faible nombre de variables par station peut paraître à première vue insuffisant mais ce choix sera justifié plus tard (aux pages 20 et 21).

Avant toute chose, le logiciel calcule la distance euclidienne pour chaque couple de station. Cette distance est basée sur la somme des différences de valeur pour les deux stations, pour chaque modalité. En considérant un indice i correspondant aux différentes années, classées par ordre chronologique de 1 à 4. La formule de la distance euclidienne est donnée par :

$$\text{distance euclidienne entre la station A et la station B} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\text{Station } A_i - \text{Station } B_i)^2}$$

L'ensemble des distances euclidiennes est alors repris dans une la matrice de distance. Il s'agit alors d'une matrice carrée de dimension 14 (pour les 14 stations).

J'ai ensuite utilisé un algorithme hiérarchique ascendant et les regroupements ont été faits par la méthode du lien moyen. En effet, après avoir testé différents types de liens (lien simple, complet, moyen et Ward), il est apparu que c'était le lien moyen qui fournissait les classes les plus nettes (inertie intragroupe faible et inertie intergroupe élevée). Enfin, en raison du fait que l'unité de mesure des différentes modalités et stations étaient identiques (hauteur d'eau en millimètres), les données n'ont pas été normalisées.

La méthode hiérarchique ascendante comprend toujours une étape de moins qu'il y a d'individus, soit 13 étapes (14 individus - 1) dans ce cas. L'algorithme démarre en considérant autant de classes que de stations et agglomère, à chaque étape, deux classes ensemble.

Chacune des 13 étapes se déroule en suivant le même schéma. Premièrement, l'algorithme repère la distance la plus faible qui puisse exister dans la matrice de distance. Autrement dit, il repère les deux classes (stations ou groupe de stations) qui sont les plus similaires. Ces deux classes seront groupées et considérées comme une seule classe pour les étapes qui suivent. Deuxièmement, une nouvelle matrice de distance est recréée. Les valeurs de distance indépendantes des deux classes fraîchement regroupées restent intactes. En revanche, pour les distances entre une des deux classes fraîchement regroupées et une classe indépendante, les lignes et les colonnes sont fusionnées, et la valeur prise sera la moyenne des deux distances concernées.

2.1.1.2. Classification sur base d'intervalles de 14 jours

Une seconde classification basée sur des intervalles plus faibles me semble également pertinente. En effet, en plus de s'intéresser à l'ordre de grandeur des précipitations, elle s'intéresserait également à la répartition des précipitations au cours d'une année. Ainsi, j'ai réalisé les cumuls sur des intervalles de 14 jours pour la période restreinte de 4 ans.

Cette fois, le tableau contiendra 94 variables (correspondant aux nombres d'intervalles de deux semaines qui résident dans la période d'étude restreinte) pour les 14 stations, à l'exception du mont Rigi car ces données avant le 21 novembre 2018 seront simplement encodées sous la forme « NA » dans le logiciel. Il en contient alors que 78 variables.

Une matrice de distance été réalisée, selon la même méthode que celle qui a été créée pour la première classification.

J'ai de nouveau utilisé un algorithme hiérarchique ascendant. Les étapes seront donc les mêmes que pour la première classification à la différence que j'ai utilisé le lien complet qui fournissait des classes plus nettes. Ce lien a été privilégié uniquement pour permettre une meilleure visualisation graphique des classes par le lecteur, car les groupes qui ont été créés avec le lien complet sont en réalité les mêmes qu'avec le lien moyen. Ainsi, pour ce type de lien, ce sera la plus grande valeur qui sera conservée lors de la fusion des lignes et des colonnes.

2.1.2. Indicateurs statistiques

Pour les indicateurs statistiques, j'ai voulu maximiser la taille de l'échantillon, et donc utilisé une donnée par jour. Cependant, pour éviter de passer à côté de certaines corrélations qui auraient pu être masquées par un décalage temporel des précipitations (par exemple, lors du passage d'un front) ce qui reporterait les précipitations pour le jour suivant, j'ai utilisé la moyenne glissante (sur 3 jours). Notons qu'étant donné que toutes les stations sont assez proches les unes des autres (la distance entre deux stations ne dépasse pas 60 kilomètres) et qu'un front lent se déplace à 20 km/heure, on peut dire que le front traverse toutes les stations en une petite quinzaine de minutes. Cet intervalle de 3 jours est donc largement suffisant. Il n'est pas indispensable mais je l'ai utilisé comme une sécurité supplémentaire.

Trois indicateurs statistiques seront calculés : le coefficient de corrélation, le biais et l'erreur quadratique moyenne (ou RMS). Leurs formules et interprétations peuvent être retrouvées dans le livre de référence de Zuur *et al.* (2007). Pour chaque station, ces indicateurs seront calculés en prenant, comme référence, les moyennes (ligne par ligne²²) de l'ensemble des stations du groupe auquel la station appartient.

Le calcul des indicateurs sera effectué d'une part pour l'ensemble des données (1419 observations), et d'autre part en considérant uniquement les précipitations jugées « moyennes et fortes ». Pour ces derniers, j'ai sélectionné uniquement les observations dont la moyenne du groupe était supérieure à 4mm, afin de ne pas avoir à garder la même taille d'échantillon pour les stations d'un même groupe.

Tous les indicateurs seront indiqués avec trois chiffres significatifs après la virgule (les zéros inutiles ne seront pas inscrits).

Tout d'abord, le coefficient de corrélation quantifie la relation linéaire qui peut exister entre la station considérée et les autres stations de son groupe (représentées par les moyennes par groupe). En considérant que l'indice i correspond aux moyennes glissantes (sur 3 jours) classées par ordre chronologique, la corrélation se calcule grâce à la formule :

$$\begin{aligned} \text{Coeff. de corrélation} &= \frac{\sum_{i=1}^n (\text{station}_i - \overline{\text{station}}) (\text{moyenne du groupe}_i - \overline{\text{moyenne du groupe}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{station}_i - \overline{\text{station}})^2 \sum_{i=1}^n (\text{moyenne du groupe}_i - \overline{\text{moyenne du groupe}})^2}} \\ &= \frac{\text{covariance} (\text{Station}, \text{moyenne du groupe})}{\text{Variance} (\text{station}) \text{Variance} (\text{moyenne du groupe})} \end{aligned}$$

Une valeur positive de ce coefficient, comme ce sera toujours le cas dans cette partie, indiquera une relation croissante entre la moyenne du groupe et la station. Et, plus la valeur de ce coefficient se rapprochera de 1, plus la station sera corrélée aux autres stations de son groupe, ce qui impliquera une confiance en ses données.

Notons que la matrice de corrélation a également été réalisée et qu'une valeur suspecte sera mentionnée.

²² Pour chacune des moyennes de 3 jours

Le second indicateur qui a été utilisé dans ce travail est le biais. Il s'agit de la moyenne des différences et, en prenant la même interprétation de l'indice i , il se calcule par la formule

$$\text{biais} = \text{moyenne}(\sum_{i=1}^n (\text{station}_i - \text{moyenne du groupe}_i))$$

Ainsi, une valeur importante de ce biais peut indiquer, soit une erreur systématique dans les données fournies (provoquée par exemple par le système instrumental du pluviomètre), soit une différence structurelle de précipitations sur la zone. Des analyses complémentaires pourraient être nécessaires pour déterminer la cause de ce biais. Notons qu'une sous-estimation des données fournies par la station sera détectée par un biais négatif et une surestimation pourra être détectée si le biais est positif.

Enfin, l'erreur quadratique moyenne (RMS) caractérise l'amplitude moyenne de ces différences. Elle se calcule par la formule :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{station}_i - \text{moyenne du groupe}_i)^2}$$

De nouveau, plus sa valeur est élevée, plus le risque d'un problème lors de l'enregistrement des données est important.

Il est important de prendre en compte le fait que station considérée fait elle-même partie des moyennes par groupe améliorera artificiellement la valeur des indicateurs statistiques. Et plus le groupe est petit, plus cet effet est significatif.

2.1.3. Graphiques

2.1.3.1. Dendrogrammes

Ils seront utilisés pour visualiser les différents groupements.

2.1.3.2. Boite à moustache

Il s'agit d'une représentation graphique qui permettra de visualiser la distribution des valeurs en fonction des différents groupes réalisés. La boîte débute au premier quartile et termine au troisième quartile. La médiane est indiquée par une ligne verticale au centre la boîte (Zuur *et al.*, 2007).

A gauche et à droite de la boîte, on représente respectivement les 25% d'observations les plus faibles et les 25% les plus élevées. On peut encore retrouver des points isolés, hors des moustaches, qui seront considérés comme des valeurs aberrantes (Zuur *et al.*, 2007).

2.1.3.3. Diagramme de Taylor

Ce type de graphique, développé par Taylor (2001), permet de résumer les différents indicateurs statistiques de chaque station sur une même figure. Ils seront utilisés dans le but d'obtenir une vision rapide et claire de l'homogénéité (qualité) des groupes, ainsi que de certaines stations s'écarteraient de la tendance du groupe.

Ce diagramme représente, sur une même figure, la corrélation (visualisée par l'angle), de l'écart-type (visualisée par la distance à l'origine du cercle) et de l'erreur quadratique moyenne (visualisée par des courbes de niveaux). Chaque point est associé à une station et coloré en fonction du groupe auquel il appartient (Taylor, 2001).

Les données seront normalisées, il est donc logique que les valeurs du diagramme puissent sembler différentes celles qui seront présentées lors de l'analyse.

2.1.3.4. Régression linéaire simple

Une droite de régression correspond à la droite d'équation $y = mx + b$, qui minimise la somme des différences d'ordonnées, entre chaque observations P_j et la droite prise à la même valeur abscisse que cette observation. Pour que toutes ces distances soient considérées positivement, on les élève au carré, c'est pourquoi on appelle cette méthode « les moindres carrés » (Zuur *et al.*, 2007).

Pour J observations, la valeur de la fonction à minimiser est donnée par :

$$E = \sum_{j=1}^J \left(y_j - (m x_j + b) \right)^2.$$

Cela permet alors d'obtenir une mesure de la dépendance entre deux variables (ou plus pour les régressions multiples), et cela sera utilisé dans le cadre de l'explication des différents groupes réalisés (Zuur *et al.*, 2007).

2.1.3.5. Evolution temporelle

Pour chacun des groupes, des graphiques de l'évolution temporelle (sur la période restreinte) des précipitations par station ont été réalisés. Comme les courbes se recouvraient fréquemment, la visualisation et l'interprétation n'était pas toujours aisée. C'est pourquoi, j'ai décidé d'utiliser les moyennes hebdomadaires.

De plus, j'ai réalisé les graphiques qui contenaient uniquement des semaines « moyennes et fortes » (ou « extrêmes »), soit de plus de 4 millimètres de précipitations en moyenne. Pour que les semaines correspondent entre elles sur le graphique, j'ai sélectionné les semaines dont la moyenne du groupe était supérieure à 4mm. Ainsi, les inondations de juillet 2021 peuvent clairement être identifiées car elles correspondent au pic à la droite du graphique.

2.2. Méthode d'évaluation de la qualité des simulations MAR

Les valeurs de hauteur de précipitations fournies par les stations pluviométriques ont été comparées avec celles fournies par le modèle atmosphérique régional MAR. Ainsi, les deux bases de données ont été exploitées. L'objectif sera double : d'une part, il s'agira d'évaluer la capacité de MAR à modéliser les précipitations et d'autre part, à quantifier l'éventuel biais.

2.2.1. Indicateurs statistiques

Les trois mêmes indicateurs statistiques ont été exploités : le coefficient de corrélation, le biais et l'erreur quadratique moyenne (RMS). Pour chaque observation pluviométrique, la « référence » choisie sera la valeur simulée par MAR pour le même jour (toujours en moyenne glissante). Les formules et les interprétations sont identiques à celles qui ont été présentées dans le cadre de l'évaluation de la qualité des observations pluviométriques, à la différence que le terme « Station » doit être remplacé par « valeurs modélisées » et le terme « Moyenne du groupe » doit être remplacé par « valeurs de terrain ».

Dans le cadre de l'indicateur « biais », cet ordre a une importance. Ainsi, un biais positif indique que le modèle surestime la réalité alors qu'un biais négatif la sous-estime.

$biais = moyenne(\sum_{i=1}^n (Valeur\ modélisées\ (MAR)_i - Valeur\ de\ terrain\ (pluviomètre)_i))$

2.2.2. Graphiques

Par station, la visualisation graphique de la fiabilité de MAR sera obtenue grâce à un histogramme (nombres de jours en fonction de la hauteur de précipitation). Pour se faire, les bases de données restreintes (MAR et pluviométrique) ont été séparées en classes de 1 millimètre et l'effectif présent dans chaque classe sera représenté. Bien que des précipitations négatives soient impossibles, la première classe comprendra les observations comprises entre -0.5 et 0.5 mm (donc dans les faits entre 0 et 0.5 mm) afin d'isoler au mieux les journées sèches.

Notons que la superposition de deux histogrammes (MAR et pluviométriques) sur un même graphique ne rendait pas la visualisation aisée. C'est pourquoi j'ai choisi de convertir les barres en lignes.

On utilisera également des diagrammes de Taylor pour comparer les données MAR aux données de terrain. Notons que les diagrammes de Taylor ont été conçus initialement dans le but d'évaluer la fidélité des données modélisées par rapport aux données observées, dans le cadre de modèles complexes, notamment les modèles climatiques. Il est donc particulièrement bien adapté à cet objectif (Taylor, 2001).

Enfin, des boîtes à moustaches et des régressions seront utilisées pour aider à déterminer les facteurs qui influencent la capacité de modélisation de MAR (comme la qualité des pluviomètres ou le régime pluviométrique).

3. Evaluation de la qualité des observations pluviométriques

3.1. Analyse du groupement établi sur base des cumuls annuels

Les résultats de la première classification ont été représentés sous la forme d'un dendrogramme (figure 9). On peut alors voir que quatre classes se dessinent :

- **Le premier groupe** est composé de 6 stations : Gemmenich, du Sart-Tilman, de Battice, Louveigné et de Coo (inférieur et supérieur).
- **Le second** contient uniquement Awans et Lanaye.
- **Le troisième** contient 5 stations : Jalhay, Ternell, Spa, Robertville et Butgenbach.
- **Le quatrième groupe** contient uniquement le Mont Rigi.

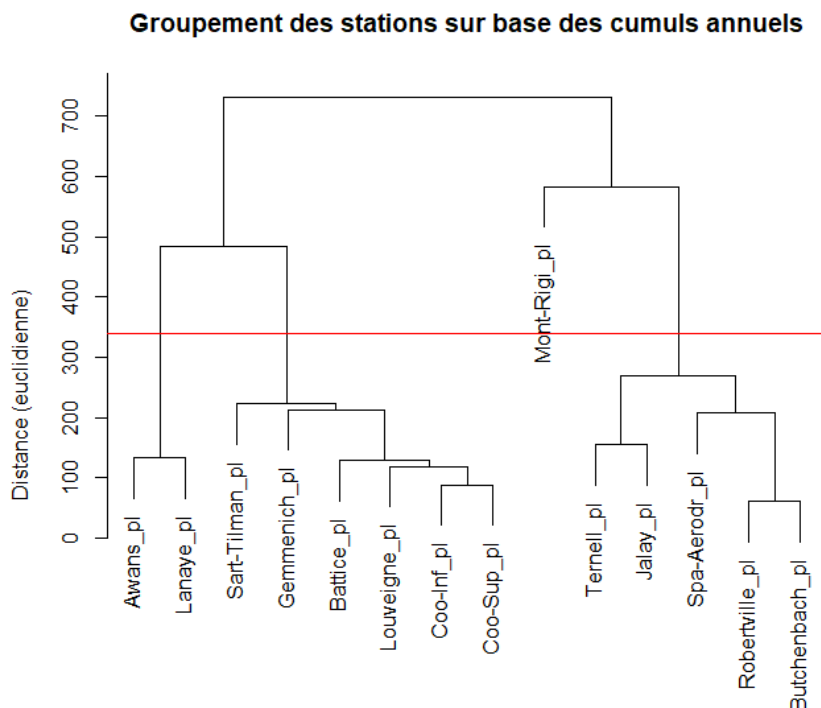


Figure 9 : Groupement basé sur les cumuls annuels (période restreinte)

Période d'étude : 2018 – 2021 (sauf mont Rigi : 2019-2021)

Taille de l'échantillon : 4 observations (sauf Mont Rigi : 3)

Ligne rouge = délimitation du groupement

3.1.1. Question de la représentativité de la période d'étude

Pour évaluer la représentativité de la base de données restreinte (2018-2021), j'ai réalisé un groupement en utilisant les mêmes algorithmes (hiérarchiques descendants), le même lien (moyen) et les mêmes distances (euclidiennes) que le groupement exposé plus haut. La seule différence est que la période d'étude a été agrandie (2002-2021).

Étant donné les stations d'Awans, de Spa et du Mont-Rigi comportaient des « trous » dans les données²³, quelques précisions méthodologiques sont nécessaires. Pour séries incomplètes (Awans, Spa et Mont-Rigi), une analyse a été réalisée sur base des autres stations (pour lesquelles les données

²³ Les données disponibles pour la station d'Awans débutent le 5 octobre 2010, le 4 octobre 2016 pour celle de Spa et le 21 novembre 2018 pour le Mont-Rigi.

sont disponibles pour toute l'année) afin de déterminer si la partie de l'année qui contient des données est représentative et peut être utilisée. Si c'est le cas, la valeur annuelle pour la station considérée sera multipliée par un simple coefficient d'extrapolation dépendant du pourcentage de l'année qui ne contenait pas de données (comme pour Awans en 2010). Sinon, elle sera enregistrée sous la forme « NA » (comme pour Spa en 2016 et pour le Mont-Rigi en 2018).

*Cumul extrapolé = cumul annuel incomplet * coefficient d'extrapolation*

$$= \text{cumul annuel incomplet} * \frac{\text{nombre de jours dans l'année}}{\text{Nombre de jours avec donnée disponible}}$$

Ainsi, j'ai obtenu la figure 10, sur laquelle on peut voir que les groupements sont extrêmement similaires, à la différence de la station Spa. Cela pourrait porter à la méfiance envers cette station. Cependant, étant donné que je n'avais des données pour cette station seulement à partir du mois d'octobre 2016 (soit seulement une année de plus que la période restreinte), il est compliqué de tirer des conclusions pour cette station.

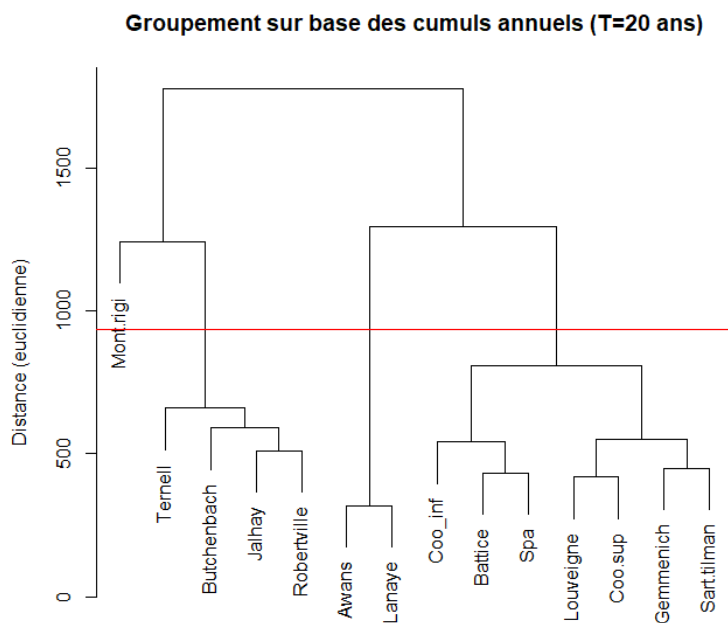


Figure 10 : Groupement basé sur les cumuls annuels (période élargie)

Taille de l'échantillon et période d'étude pour le Mont Rigi : 3 observations (2018-2021)

Taille de l'échantillon et période d'étude pour Spa : 5 observations (2017-2021)

Taille de l'échantillon et période d'étude pour Awans : 12 observations (2010-2021)

Taille de l'échantillon et période d'étude pour les 11 autres stations : 20 observations (2002-2021)

Ligne rouge = délimitation du groupement

La classification initiale est alors validée. Notons que cela permet de valider la période restreinte de 4 ans d'une manière générale car cela signifie que les régimes pluviométriques n'ont pas changé de manière relative entre les deux périodes d'études.

3.1.2. Caractéristiques en fonction des groupes

3.1.2.1. Valeurs

Les figures 11 et 12 permettent de visualiser les tendances de précipitations en fonction des groupes.

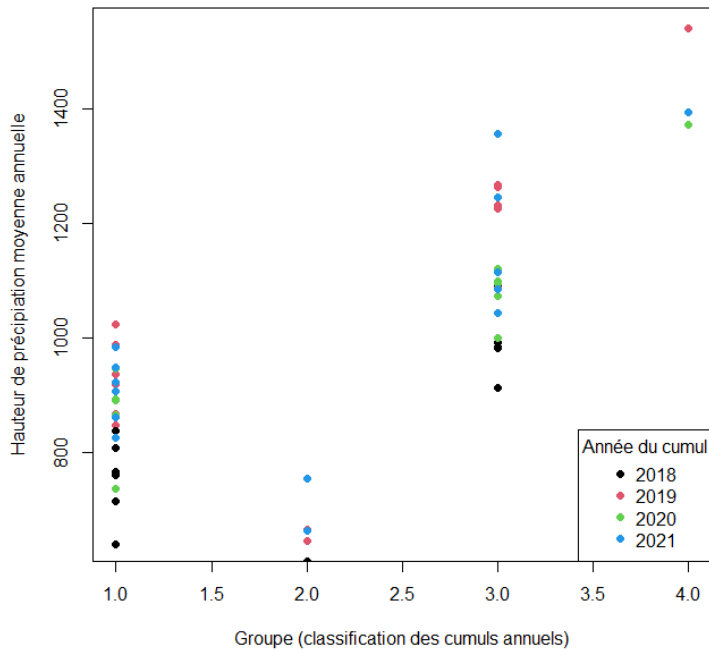


Figure 11 : Graphique représentant les cumuls annuels de la périodes 2018-2021 en fonction du groupe (classification des cumuls annuels) dans lequel est contenu la station

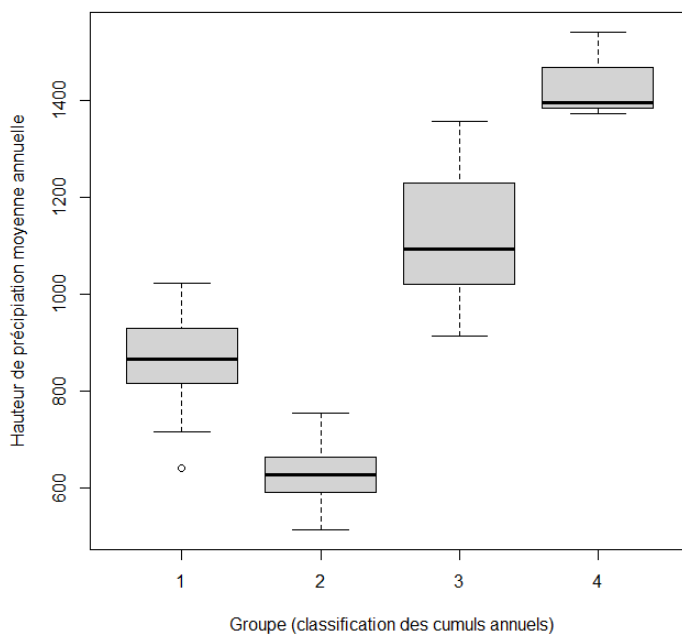


Figure 12 : Boîtes à moustaches des cumuls annuels par groupe

D'une manière générale, on peut dire que les régimes pluviométriques sont très différents selon les groupes. Le second groupe contient les stations où il pleut le moins (moyenne de 628.8 mm par an), suivi du premier groupe (moyenne de 862,8 mm par an) et le troisième groupe contient les stations où il pleut le plus (moyenne de 1113.8 mm par an). Enfin, le Mont-Rigi, seul dans le quatrième groupe, a enregistré encore beaucoup plus de précipitations (moyenne de 1435.9 mm par an).

La figure 13 provient du site officiel de l'IRM (2022), sur laquelle j'ai localisé les 14 stations (et indiqué le groupe auquel elles appartiennent) grâce au programme Qgis. La figure confirme les résultats qui viennent d'être énoncés ci-dessus.

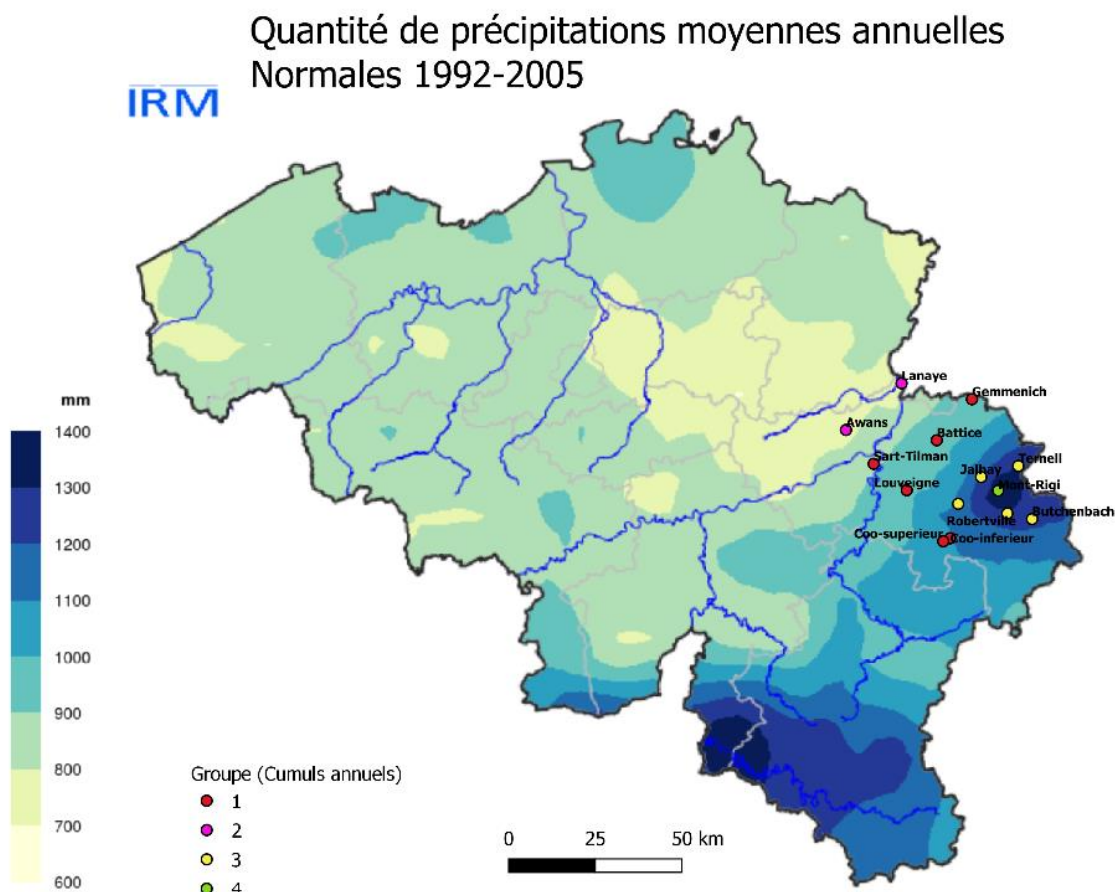


Figure 13 : Position des stations ajoutées sur le fond de carte représentant les régimes pluviométriques de la Belgique (IRM, 2022). Echelle : 1/2 000 000

Ainsi, cela valide une nouvelle fois la période d'étude, tant concernant la classification (les groupes pluviométriques sont clairement organisés en fonction des « lignes d'égaux hauteurs de précipitations », définies par l'IRM), que pour les quantités de précipitations (moyennes similaires). Il n'y aurait donc pas eu de changement de régime notable entre les deux périodes (2018-2021 et 1992-2005).

3.1.2.2. Qualité

La figure 14 montre le diagramme de Taylor pour les 14 stations. Notons que le Mont-Rigi n'a pas pu être représenté étant donné qu'il était seul dans son groupe.

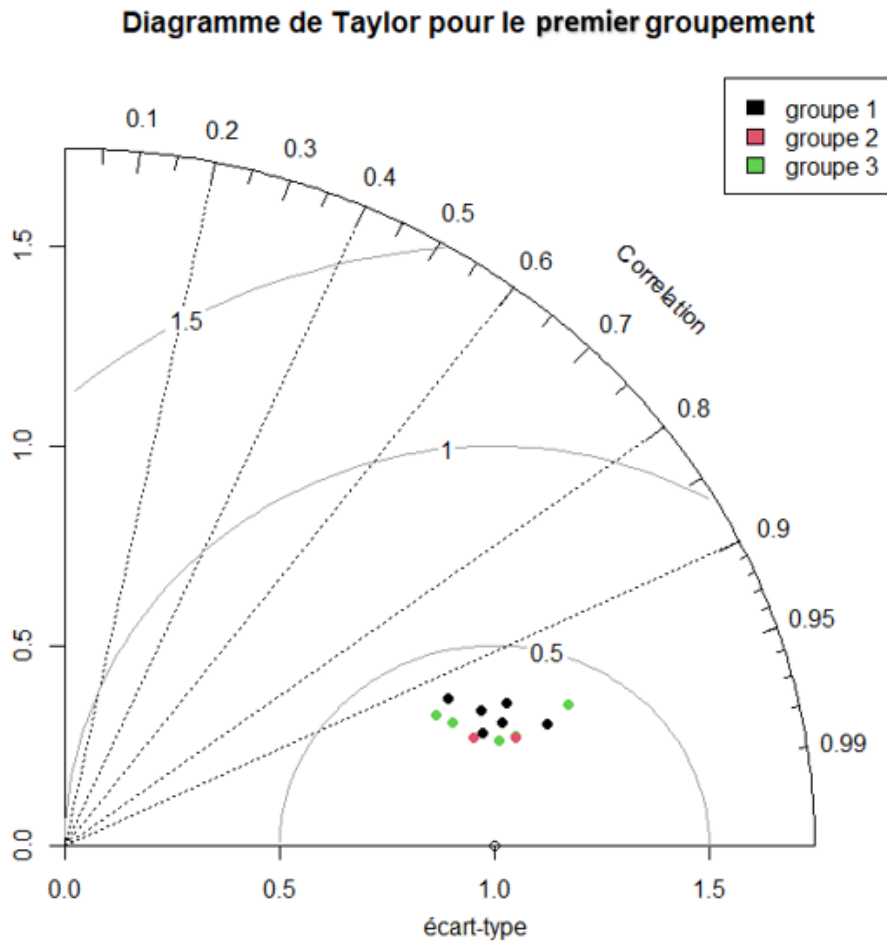


Figure 14 : Diagramme de Taylor pour le groupement basé sur les cumuls annuels

On peut voir que toutes les observations sont situées dans la région idéale : en bas du graphique (corrélation proche de 1), proche de la valeur 1 d'écart type et dans le cercle de faible RMS. On peut dès lors qualifier les groupes de très homogènes.

3.1.3. Interprétation du groupement

Une première explication physique de ces classes serait naturellement le relief. En effet, la figure 15 montre une relation linéaire²⁴ claire entre l'altitude et la quantité de précipitation. Notons que la corrélation vaut 0.909. Ce lien s'explique principalement car plus une masse d'air est froide, moins elle peut contenir de vapeur d'eau.

²⁴ Si on considère une relation polynomiale, le coefficient du second degré et du troisième degré sont négligeables

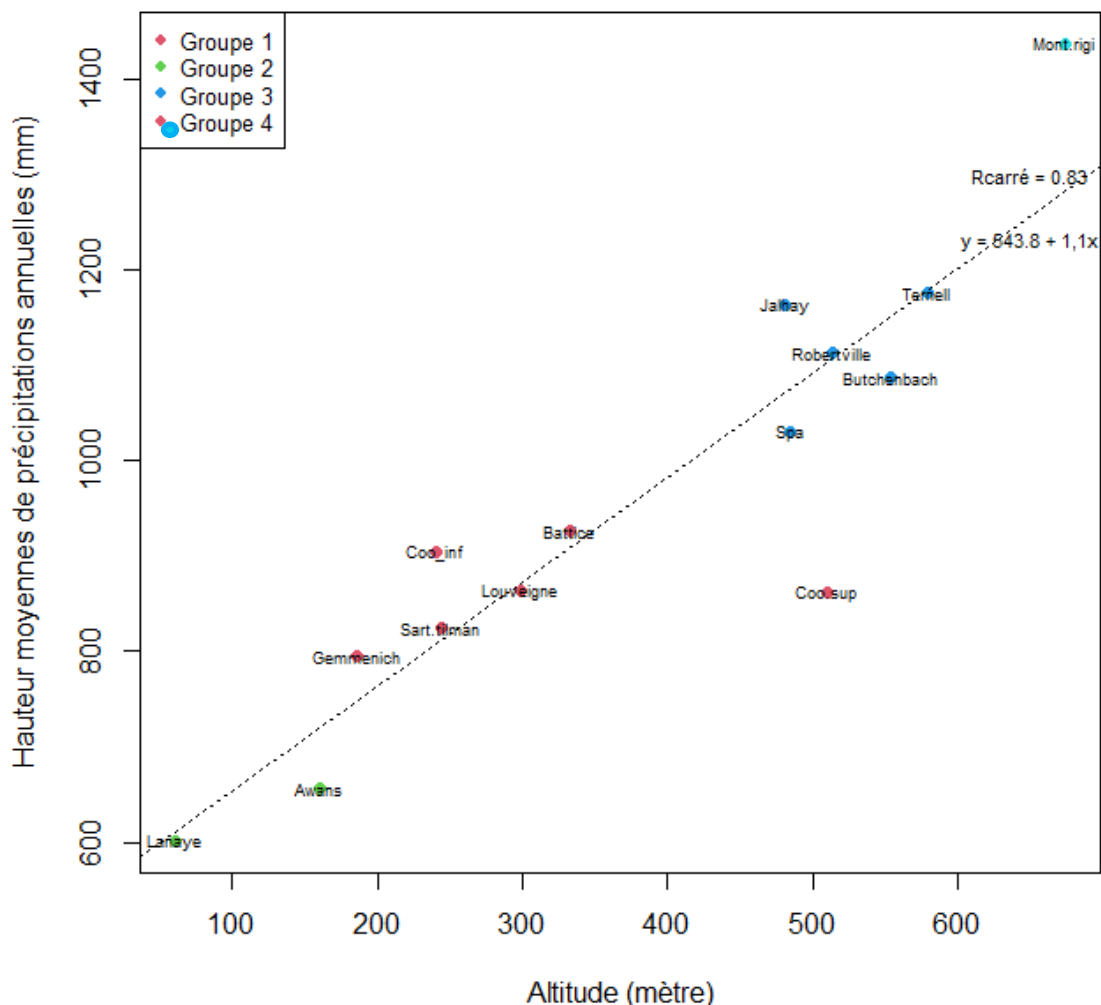


Figure 15 : Hauteurs moyennes de précipitations annuelles en fonction de l'altitude des stations.
Ligne pointillée = droite de régression

Ainsi, les stations de la classe 2 sont situées sur les régions d'altitudes les plus faibles alors que celles des classes 3 et 4 sont situées sur les altitudes plus élevées. Enfin, le mont Rigi est la station la plus élevée en altitude. L'équation de la droite montre que la station gagne 100 mm de précipitation par an pour chaque 100 m d'altitude supplémentaire.

Cependant, deux stations semblent s'éloigner de ce modèle linéaire : Coo supérieure et le Mont Rigi. Concernant Coo supérieure, elle se situe dans la gamme d'altitude du groupe 3 alors que son régime pluviométrique le place dans le groupe 1. En d'autres termes, son altitude prédit des précipitations plus importantes que ses précipitations réelles. Je vais tenter d'émettre une hypothèse liée à la disposition spatiale des stations et à l'orientation des vents.

Sur la figure 16, j'ai replacé les 14 stations sur le modèle numérique de terrain de Wallonie (Géoportail de la Wallonie) grâce au programme Qgis et indiqué l'altitude de chaque station sous leurs noms. La figure 17 montre le relief à une échelle plus grossière.

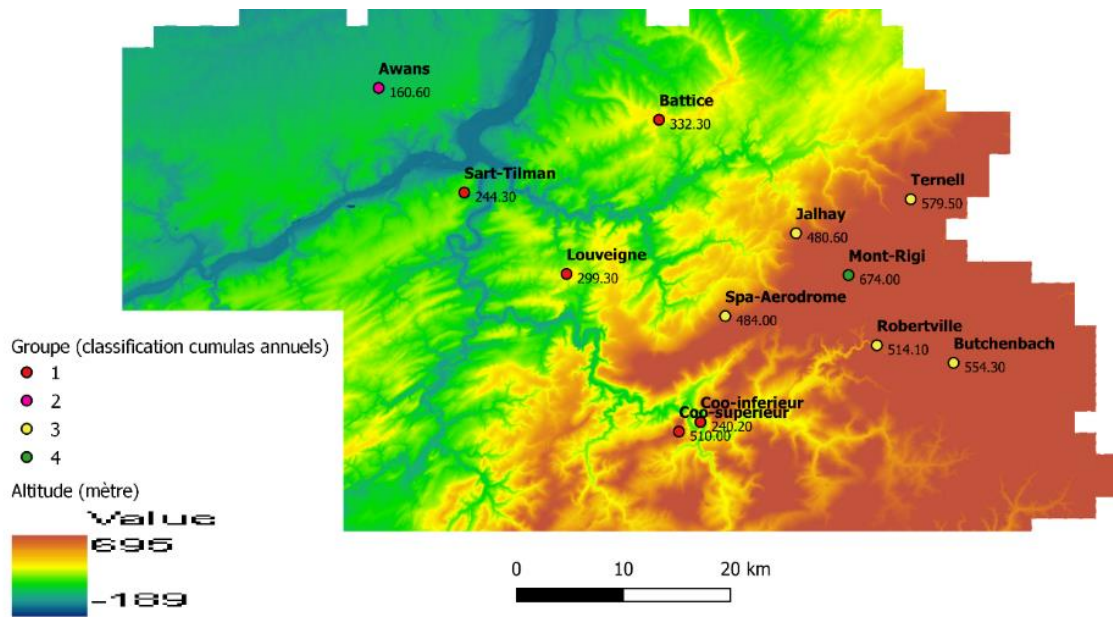


Figure 16 : Visualisation des stations en fonction de leurs altitudes : stations replacées sur un MNT (Wal on map, 2013-2014)

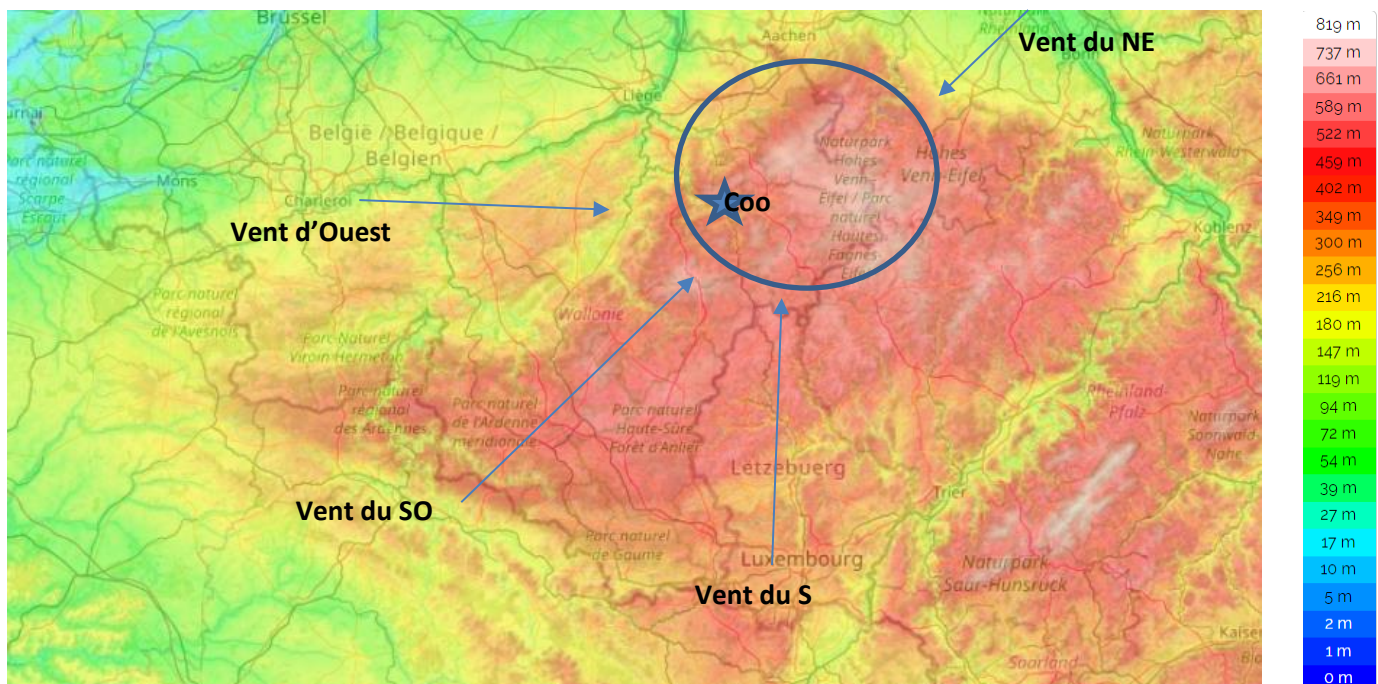


Figure 17 : Visualisation de la direction des vents sur la zone d'étude : annotations sur le fond de carte de topographic map (2022)

Flèches bleues = direction du vent.

Les vents dominants en Belgique, aussi appelés air tropical maritime, viennent du Sud-Ouest. Ensuite, la Belgique subit fréquemment des vents du Nord-Est (air maritime arctique), de l'Ouest (retour d'air

maritime) et du Sud (air tropical continental). Vous trouverez un diagramme des fréquences des directions des vents, qui confirme ces informations en annexe 8 (Hufty, 2001 ; IRM, 2022).

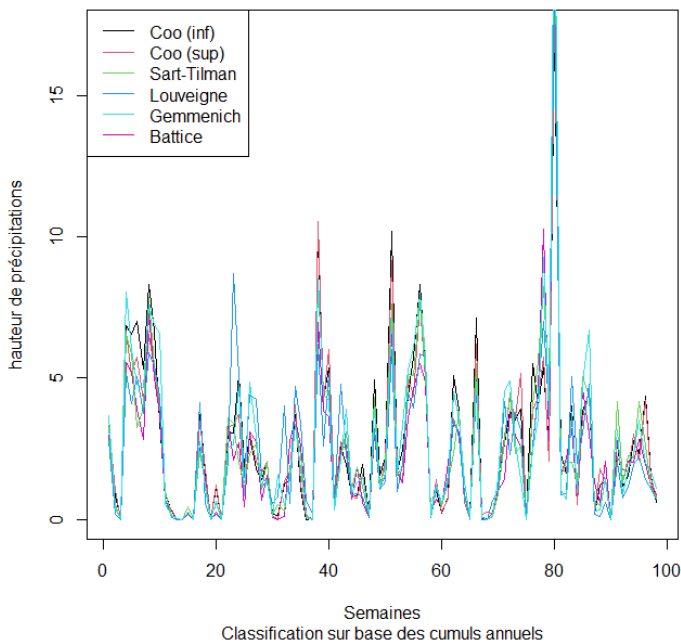
Ainsi, dans la majorité des cas, les vents proviennent de la zone du Sud à l’Ouest. Lorsqu’ils arrivent à Coo, les masses d’air peuvent redescendre. La pression atmosphérique et la température augmentent, ce qui ne permet donc pas la condensation. Cet effet peut s’assimiler à l’ombre pluviométrique d’un effet de Foehn. A l’inverse, les stations du groupe 3 et 4 sont situées sur un plateau où les masses d’air sont forcées de monter (première condensation) pour toutes les directions de vent présentées ici (Hufty, 2001).

Concernant le Mont Rigi, sa position dominante (quelle que soit l’orientation des vents), explique cette grande quantité de précipitations. La station connaît un régime pluviométrique particulier, avec également une grande quantité qui tombe sous forme neigeuse (Hufty, 2001 ; Wyard, 2018).

3.1.4. Analyse de la qualité des observations pluviométriques

La figure 18 représente l’évolution temporelle des précipitations en 2020 et 2021 (l’évolution temporelle pour 2018 et 2019 est disponible en annexe 9) et la figure 19 les précipitations moyennes et fortes (ou « extrêmes »). Le tableau 1 reprend les indicateurs statistiques, pour les précipitations en général et pour les extrêmes.

Précipitations hebdomadaires du groupe 1 (2020-2021)



Précipitations extrêmes (>4mm de moyenne)

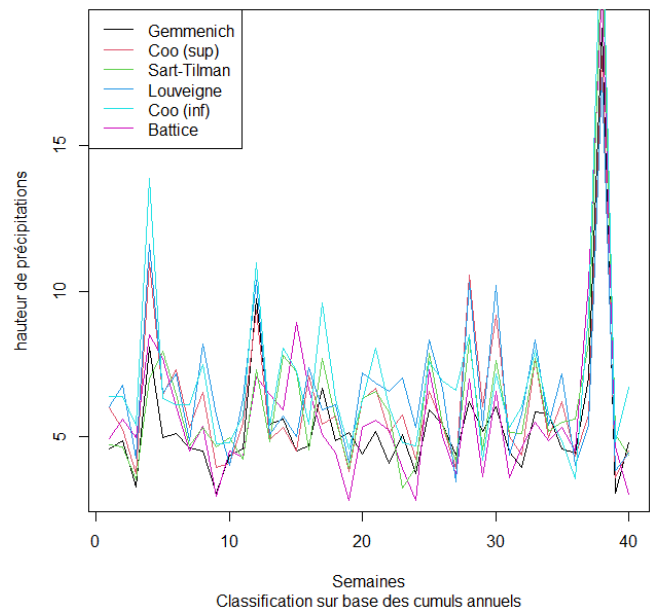


Figure 18 (à gauche) : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyennes hebdomadaires) au niveau des stations du groupe 1 (classification des cumuls annuels), du 6 janvier 2020 au 21 novembre 2021.

Figure 19 (à droite) : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations dont les moyennes hebdomadaires ont été considérées comme « moyennes et fortes » au niveau des stations du groupe 1 (classification des cumuls annuels), entre 2018 et 2021

		Sart-Tilman	Louveigné	Gemmenich	Battice	Coo inférieur	Coo supérieur,
Corrélation	Pour l'ensemble des données	0.944	0.945	0.924	0.965	0.957	0.961
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	0.886	0.887	0.859	0.936	0.901	0.919
Biais	Pour l'ensemble des données	-0.106	0.005	-0.193	0.179	0.115	-0.001
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	-0.197	0.087	-0.709	0.624	0.335	-0.139
Erreur quadratique moyenne	Pour l'ensemble des données	1.183	1.244	1.35	1.151	1.074	0.979
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	2.237	2.453	2.493	2.248	2.078	1.849

Tableau 1 : Indicateurs statistiques calculés entre la moyenne des précipitations pour le groupe 1 et celles de la station considérée

Période d'étude : 1^{er} janvier 2018 – 20 novembre 2021

Taille de l'échantillon total : 1419 observations

Taille de l'échantillon pour les précipitations moyennes et fortes : 307 observations

On peut voir une tendance générale suivie par toutes les stations. Les corrélations sont en effet très élevées. On peut mentionner Gemmenich, qui a la corrélation la plus faible ainsi que le biais et la RMS les plus importants, tant pour l'ensemble des données que pour les précipitations moyennes et fortes. La station pourrait avoir du mal à représenter des précipitations élevées. Louveigné et la station du Sart-Tilman ont également une corrélation faible en comparaison avec les autres stations du groupe, mais le biais de la station de Louveigné est pratiquement négligeable.

Le second groupe ne contenant que deux stations, il était très difficile de tirer des informations. Leurs graphiques et le tableau seront donc placés à titre informatifs dans les annexes (annexes 10 à 13). Notons que, comme il n'y avait que deux stations, il n'a pas été nécessaire de passer par une moyenne. Les indicateurs statistiques ont alors directement été calculés entre les deux stations, c'est pourquoi il n'est pas surprenant de voir des corrélations plus faibles.

Enfin, on peut analyser le troisième groupe sur base des figures 20 et 21 (ainsi que de l'annexe 14) et du tableau 2.

Précipitations hebdomadaires du groupe 3 (2020-2021)

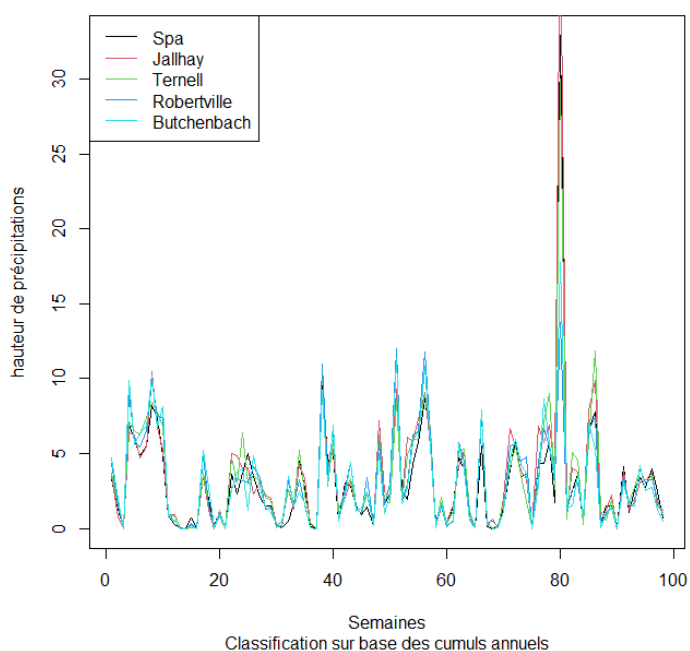


Figure 20 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyennes hebdomadaires) au niveau des stations du groupe 2 (classification des cumuls annuels), du 6 janvier 2020 au 21 novembre 2021.

Précipitations extrêmes moyennes (>4mm)

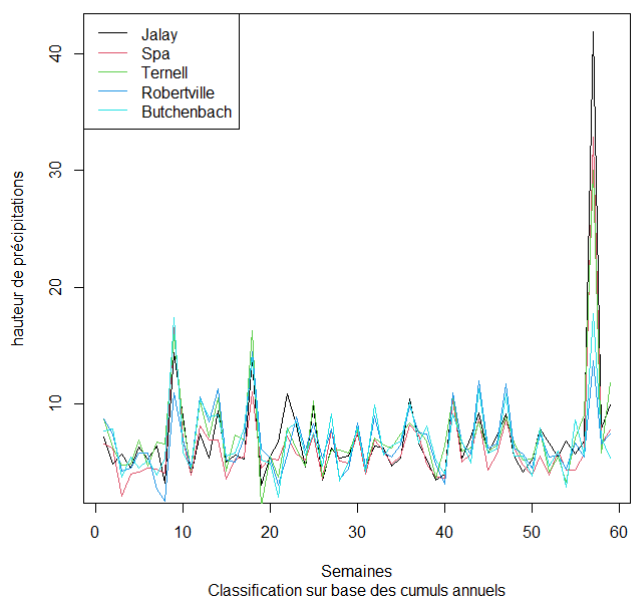


Figure 21 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations dont les moyennes hebdomadaires ont été considérées comme « moyennes et fortes » au niveau des stations+ du groupe 3 (classification des cumuls annuels), entre 2018 et 2021

		Ternell	Spa	Jalhay	Robertville	Butgenbach
Corrélation	Pour l'ensemble des données	0.968	0.968	0.958	0.935	0.946
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	0.945	0.958	0.95	0.856	0.891
Biais	Pour l'ensemble des données	0.173	-0.235	0.139	-0.003	-0.074
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	0.335	-0.637	0.344	0.011	0.053
Erreur quadratique moyenne	Pour l'ensemble des données	1.26	1.201	1.771	1.599	1.458
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	2.148	2.106	3.179	2.919	2.553

Figure 2 : Indicateurs statistiques calculés entre la moyenne des précipitations pour le groupe 1 et celles de la station considérée

Période d'étude : 1^{er} janvier 2018 – 20 novembre 2021

Taille de l'échantillon total : 1419 observations

Taille de l'échantillon pour les précipitations moyennes et fortes : 393 observations

On voit qu'ils ont tous des corrélations très élevées, à l'exception de la station de Robertville, lorsque l'on considère les précipitations moyennes et fortes. Son biais vaut seulement -0.003 mm et l'erreur quadratique moyenne vaut 1,176 mm, ce qui signifie qu'il ne s'agit pas d'une différence d'ordre de grandeur mais plutôt d'un oscillement relativement « aléatoire ».

Ensuite, comme on peut le voir par les valeurs en rouge dans le tableau, un biais (négatif) important pour Spa et une RMS élevée pour la station de Jalhay.

Évidemment, le dernier groupe ne sera pas analysé étant donné qu'il contient uniquement le mont Rigi.

3.2. Analyse du groupement établi sur base des intervalles de 14 jours

Le dendrogramme de la seconde classification est également fourni ci-dessous (figure 22).

- **Le premier groupe** contient 5 stations : Awans, Sart-Tilman, Louveigné, Lanaye et Gemmenich.
- **Le second** contient 6 stations : Coq inférieur et supérieur, Battice, Spa, Robertville et Butgenbach.
- **Le troisième groupe** en contient 3 : Ternell, Jalhay et le Mont Rigi.

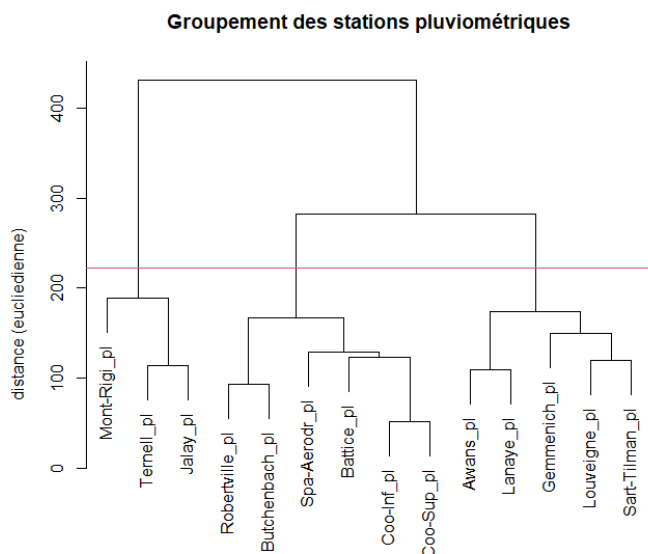


Figure 22 : Groupement basé sur les intervalles de 14 jours
 Période d'étude : 1^{er} janvier 2018 – 20 novembre 2021 (sauf Mont Rigi : 27 novembre 2018 – 20 novembre 2021)
 Taille de l'échantillon : 96 observations (sauf Mont Rigi : 78)
 Ligne rouge = Délimitation du groupement

3.2.1. Question de la représentativité de la période d'étude

A l'instar de ce qui a été réalisé plus haut, j'ai réalisé un groupement sur base des intervalles de 14 jours sur la période agrandie. Pour les cumuls journaliers ainsi que les cumuls à intervalles de 14 jours, toutes les données inexistantes ou incomplètes sur la plage du cumul ont été enregistrées sous l'appellation « NA » afin de ne pas être prises en compte lors de l'analyse. Afin de les comparer, les dendrogrammes des deux périodes sont présentés sur les figures 23 et 24.

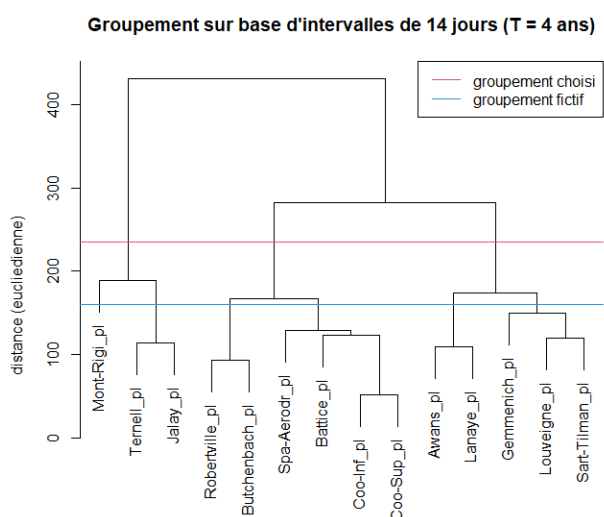


Figure 23 : voir figure 22

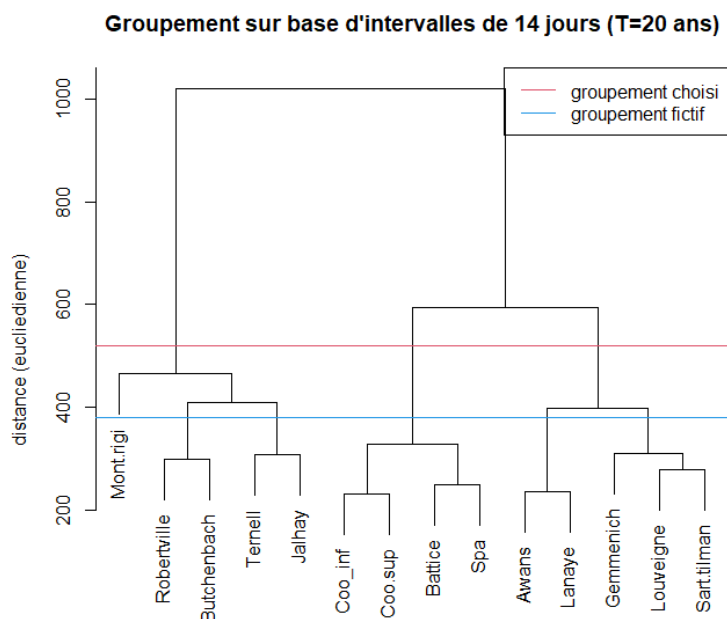


Figure 24 : Groupement basé sur les intervalles de 14 jours

Taille d'échantillon et période d'étude pour Battice, Lanaye, Gemmenich, Robertville, Butgenbach, Ternell, Sart Tilman, Jalhay, Louveigné, Coo-Inf, Coo-Sup : 519 (1^{er} janvier 2001 – 20 novembre 2021)

Taille d'échantillon et période d'étude pour Awans : 290 (12 octobre 2010 – 20 novembre 2021)

Taille d'échantillon et période d'étude pour Spa : 133 (18 octobre 2016– 20 novembre 2021)

Taille d'échantillon et période d'étude pour le Mont Rigi : 78 (27 novembre 2018 – 20 novembre 2021)

Ainsi, on peut voir une grande similitude entre les groupements des deux périodes d'études. Seul Butgenbach et Robertville ont changé de groupe. De plus, si on avait choisi un plus grand nombre de groupements (voir « groupements fictifs » dans les figures 23 et 24), on aurait exactement les mêmes groupements. Cela signifie que, malgré les changements de régimes pluviométriques (et niveaux) qu'il y a pu avoir au cours de ces 20 dernières années, les différentes stations ont évolué de façon similaire. Cela montre ainsi que la période allant de 2018 à 2021, bien que petite, est représentative et suffisante, non seulement pour les classifications automatiques mais également pour les analyses qui suivront.

Pour comprendre le changement du groupe Butgenbach-Robertville, il peut être pertinent de définir une période de référence de 4 ans parmi cette base de 20 ans. Ainsi, cela reviendra à diviser la base de données en 5 parties presque égales (la fin de l'année 2021 n'étant pas disponible), dont la dernière correspondra à la période allant de 2018 à 2021. Il apparaît alors qu'il est associé au troisième groupe (Jalhay et Ternell) pour toutes les autres périodes de référence, comme c'était prévu dans la classification sur la période élargie. Deux explications sont à mentionner : soit il y a eu un changement dans les mesures, soit la période de référence n'était pas adaptée et il aurait fallu placer ces deux stations dans le groupe contenant Ternell et Jalhay.

Comme les analyses portent sur la dernière période d'étude, j'ai décidé de garder la classification initiale pour les analyses.

3.2.2. Caractéristiques en fonction des groupes

3.2.2.1. Valeurs

En moyenne, le premier groupe est celui qui enregistre les précipitations moyennes journalières les plus faibles, suivie du second groupe, puis du troisième groupe. Les valeurs moyennes par jour, reprises sur le tableau 3, diffèrent très peu selon si on prend la période restreinte ou élargie.

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Période et classification de la période restreinte (Butgenbach et Robertville dans le groupe 2)	2.106 mm par jour	2.779 mm par jour	3.462 mm par jour
Période et classification de la période élargie (Butgenbach et Robertville dans le groupe 3)	2.219 mm par jour	2.868 mm par jour	3,449 mm par jour

Tableau 3 : Tableau des moyennes journalières de hauteur de précipitations par groupe

Et ce critère semble avoir été le plus déterminant dans la définition des classes, tant pour la période restreinte que pour la période élargie. En effet, à l'exception de Coo supérieur qui a enregistré une hauteur de précipitations moyennes journalières plus faible que certaines stations du groupe 1, toutes les stations de faible pluviométrie sont dans le groupe 1, les stations de pluviométrie moyenne sont dans le groupe 2 et les stations de pluviométrie élevée dans le groupe 3 (figures 25 et 26).

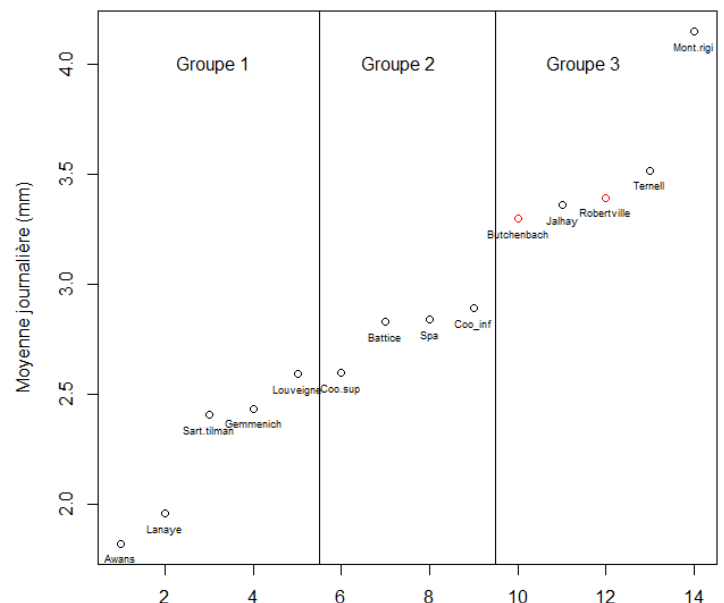
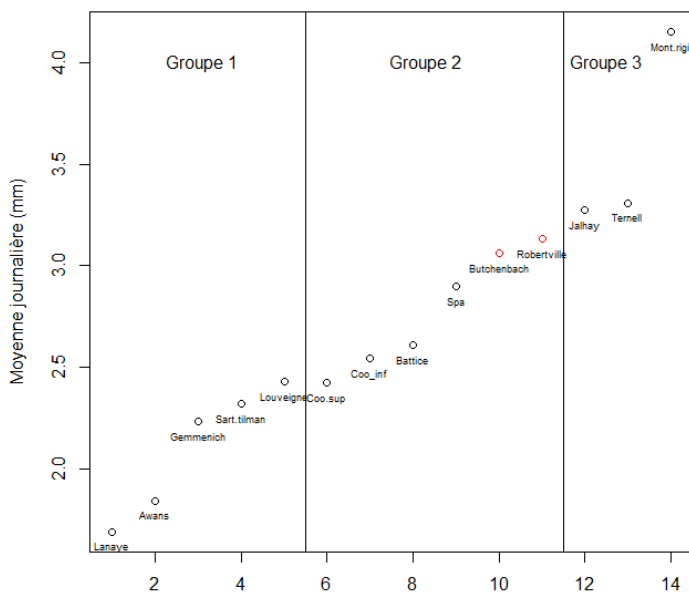


Figure 25 (à gauche) : hauteur moyenne journalière de précipitations par station (période restreinte).
Points rouges = stations qui changent de groupe entre les deux périodes.

Figure 26 (à droite) : hauteur moyenne journalière de précipitations par station (période élargie).
Points rouges = stations qui changent de groupe entre les deux périodes.

Ainsi, il n'y a pas eu de réel changement notable ni entre les deux méthodes de classification (cumuls annuels et intervalles de 14 jours), ni entre les deux périodes d'étude (restreinte et élargie) mais l'algorithme automatique a simplement choisi un « autre découpage ». On peut dire que cela conduit encore davantage à valider la période de 4 ans.

Concernant la répartition des précipitations sur une année (figure 27), on peut dire d'une manière générale qu'il y a deux pics clairs, quel que soit le groupe : un au cœur de l'hiver (décembre-janvier) et un au cœur de l'été (juin-juillet). La figure pour la période élargie est reprise en annexe (annexe 15).

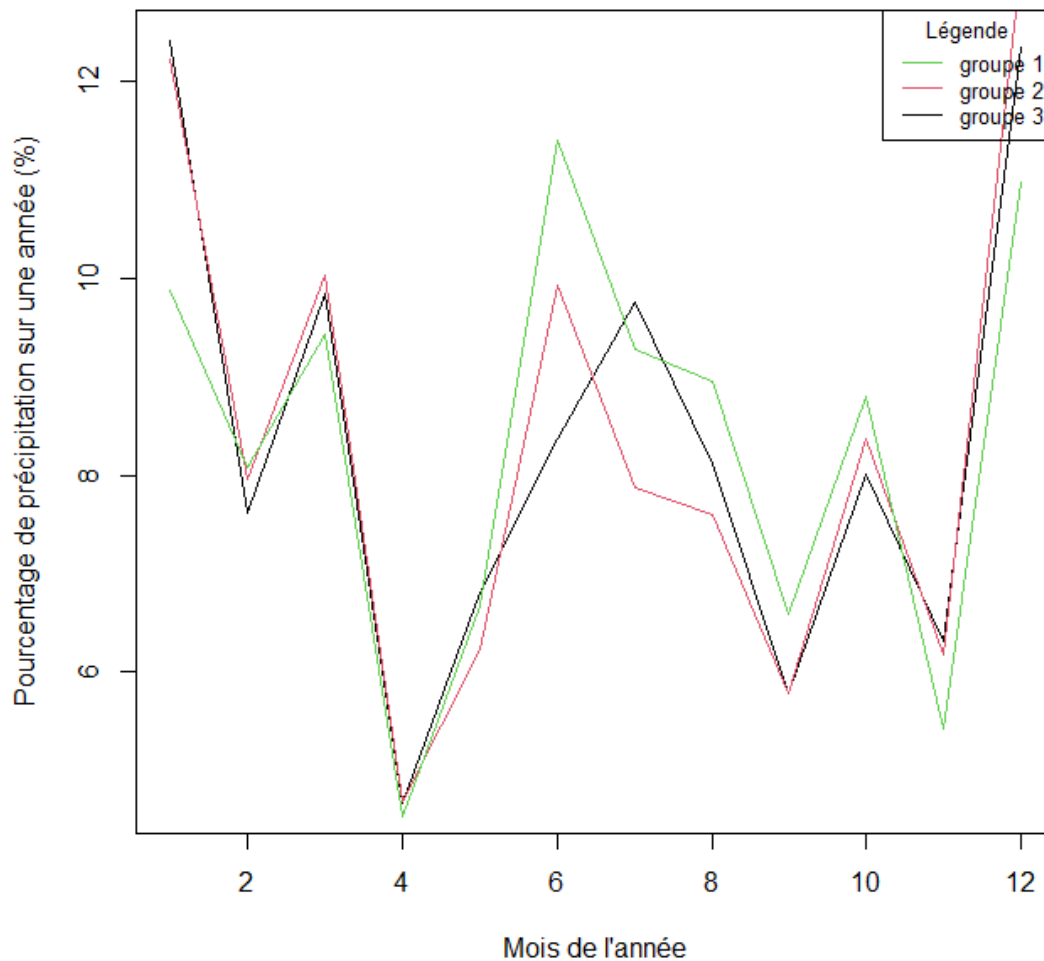


Figure 27 : répartition des précipitations en fonction des mois (période restreinte).
1 = janvier, 12 = décembre

Pour visualiser la différence entre les groupes, j'ai représenté la répartition saisonnière (normalisée en pourcentage) pour chaque groupe, en considérant les deux périodes d'études (figures 28 et 29).

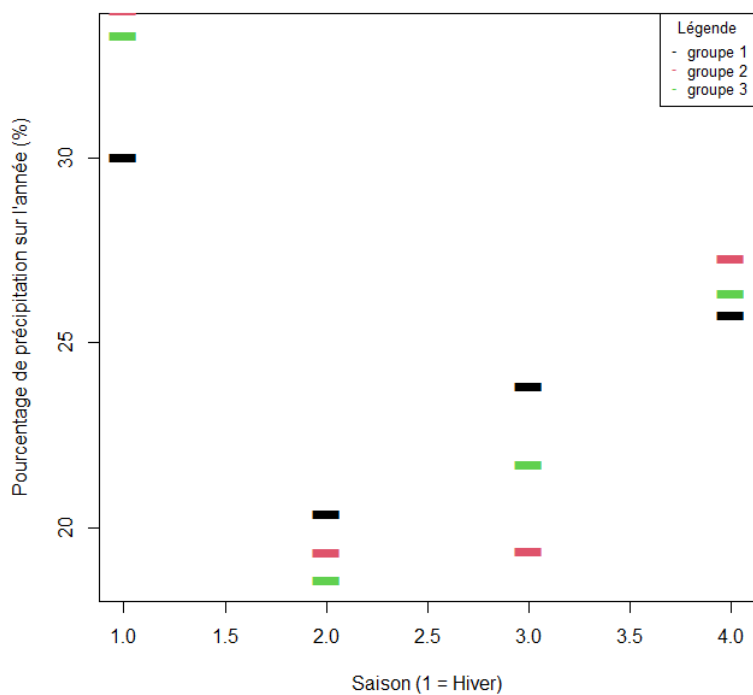


Figure 28 : répartition des précipitations en fonction des saisons (période restreinte). 1 = Hiver, 2 = Printemps, 3 = Eté, 4 = Automne

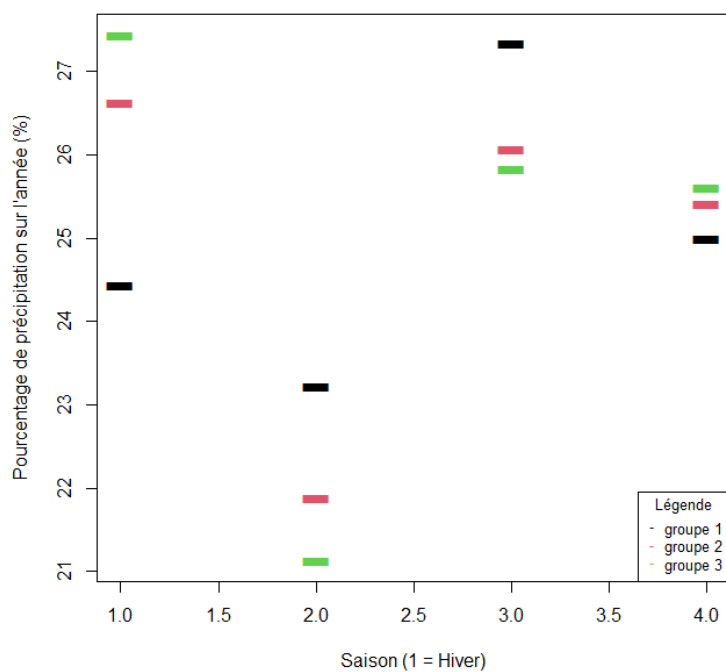


Figure 29 : répartition des précipitations en fonction des saisons (période élargie). 1 = Hiver, 2 = Printemps, 3 = Eté, 4 = Automne

De manière relative, on peut voir que le groupe 1 répertorie les hauteurs de précipitations les plus faibles pour les saisons « froides » (hiver et automne) et les hauteurs les plus élevées pour les saisons « chaudes » (printemps et l'été).

Et, si on considère la période de 20 ans, le groupe 3 suit une situation opposée au groupe 1 mais cet effet n'est pas visible lorsqu'on considère la période de 4 ans. À la suite d'analyses station par station, on peut dire que cela s'explique car les précipitations au niveau des stations de Robertville et Butgenbach sont particulièrement élevées pour les saisons froides et particulièrement faibles pour les saisons chaudes, et influencent donc la tendance générale du groupe (annexe 16).

3.2.2.2. Qualité

J'ai également réalisé un diagramme de Taylor pour ce second groupement (figure 30)

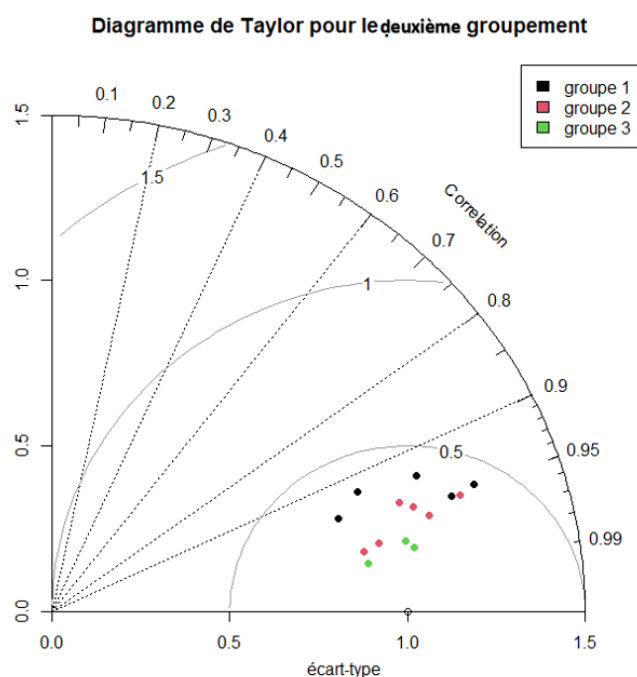


Figure 30 : Diagramme de Taylor pour le groupement basé sur les intervalles de 14 jours

On peut également qualifier ces 3 groupes d'homogènes, bien qu'ils le soient moins que les groupes de la première classification. Le groupe le plus hétérogène est le premier car ses points sont plus hauts et plus éloignés de la valeur 1 d'écart type.

3.2.3. Interprétation du groupement

La grande majorité du groupement peut s'expliquer par les mêmes raisons que celles qui ont été énoncées plus haut, lors de l'explication du premier groupement, c'est-à-dire le relief (principalement l'altitude) et la direction des vents.

Concernant la répartition, celle du groupe 1 pourrait s'expliquer par une plus faible variation saisonnière et celle du groupe 3 par une condensation presque systématique en hiver, étant donné la température plus faible en altitude.

3.2.4. Analyse de la qualité des observations pluviométriques

Commençons par l'analyse du premier groupe. De nouveau, l'évolution temporelle pour 2020-2021 (figure 31) ainsi que les précipitations moyennes et fortes (figure 32) seront fournies ci-dessous ; l'évolution pour 2018-2019 est disponible en annexe (annexe 17). Les valeurs des indicateurs statistiques sont reprises dans le tableau 4.

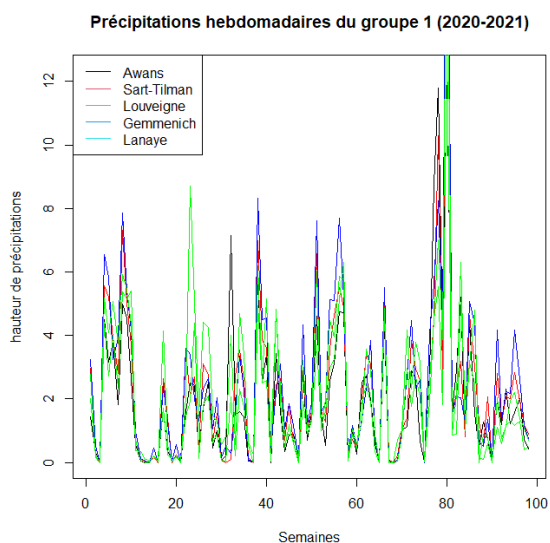


Figure 31 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyennes hebdomadaires) au niveau des stations du groupe 1 (classification des intervalles de 14 jours), du 6 janvier 2020 au 21 novembre 2021.

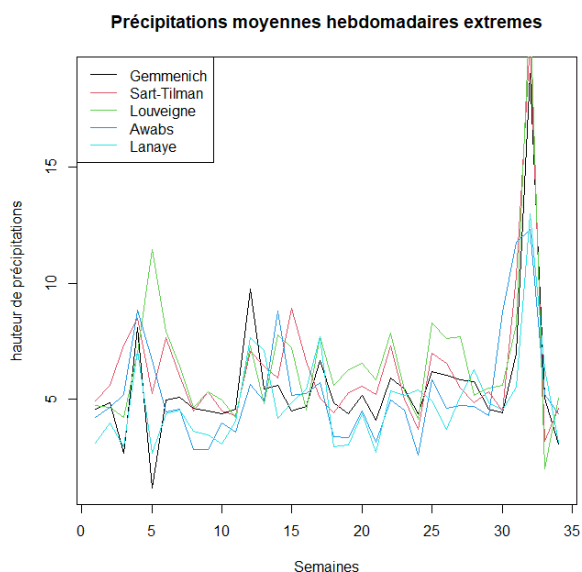


Figure 32 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations dont les moyennes hebdomadaires ont été considérées comme « moyennes et fortes » au niveau des stations du groupe 1 (classification des intervalles de 14 jours), entre 2018 et 2021

		Awans	Sart – Tilman	Louveigné	Lanaye	Gemmenich
Corrélation	Pour l'ensemble des données	0.922	0.955	0.951	0.944	0.929
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	0.828	0.906	0.91	0.88	0.842
Biais (en mm)	Pour l'ensemble des données	-0.26	0.216	0.327	-0.4115	0.1285882
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	-0.86	0.8	1.045	-1.265	0.285
Erreur quadratique moyenne (en mm)	Pour l'ensemble des données	1.205	1.139	1.334	1.114	1.25
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	2.47	2.338	2.798	2.277	2.582

Tableau 4 : Indicateurs statistiques calculés entre la moyenne des précipitations pour le groupe 1 et celles de la station considérée

Période d'étude : 1^{er} janvier 2018 – 20 novembre 2021

Taille totale de l'échantillon: 1419 observations

Taille de l'échantillon pour les précipitations moyennes et fortes : 247 observations

Aucune station de ce groupe ne semble réellement suspecte. Elles semblent toutes suivre la même tendance, la même évolution. Elles ont en effet toutes une corrélation supérieure à 92 % avec la moyenne du groupe. Lorsqu'on considère exclusivement les précipitations « moyennes et fortes », la corrélation diminue mais reste correcte. On peut cependant mentionner le 3 septembre 2018 qui montre des différences importantes de précipitations selon les stations²⁵.

On peut tout de même retenir les stations d'Awans et de Gemmenich qui semblent être les plus éloignées de la tendance générale, surtout pour les moyennes et fortes. Concernant Awans, on peut voir un biais et une erreur quadratique relativement important. Si le biais est vérifié, il indiquerait une sous-estimation des données par rapport à la réalité.

Pour Gemmenich, le biais est très faible, il s'agit même du biais le plus faible, tant pour l'ensemble des données que pour les précipitations moyennes et fortes. Ainsi, tout comme lors de l'analyse de la première classification, cette corrélation plus faible s'explique par l'erreur quadratique moyenne. En

²⁵ 3 septembre 2018 : Awans : 5,24 mm ; Sart – Tilman : 6,69 mm ; Louveigné : 11,44 mm ; Lanaye : 2,7mm et Gemmenich : 1,2mm

combinant cette information avec l'observation des figures 31 et 32, on pourrait déduire que la station est « trop stable », les pics sont généralement moins marqués que pour les autres stations.

Contrairement à la première classification, la station de Louveigné a un biais qui dépasse 1mm de précipitations ainsi que l'erreur quadratique moyenne la plus élevée du groupe. Lanaye a un biais de -1,265 millimètre.

Poursuivons avec le second groupe, que l'on peut observer sur base des figures 33, 34 (de l'annexe 18) et du tableau 5.

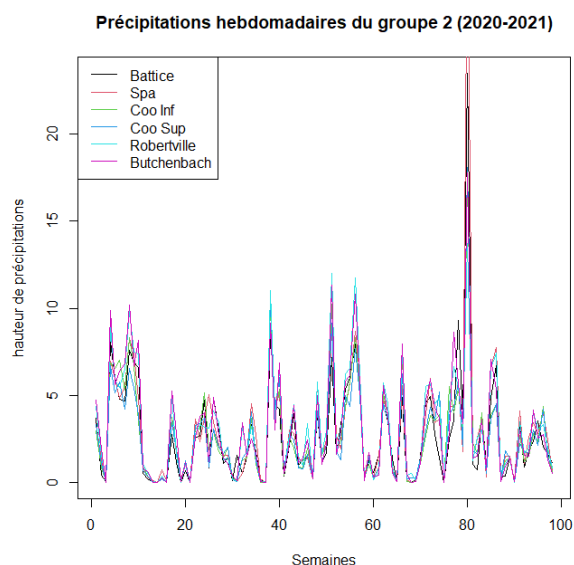


Figure 33 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyennes hebdomadaires) au niveau des stations du groupe 2 (classification des intervalles de 14 jours), du 6 janvier 2020 au 21 novembre 2021.

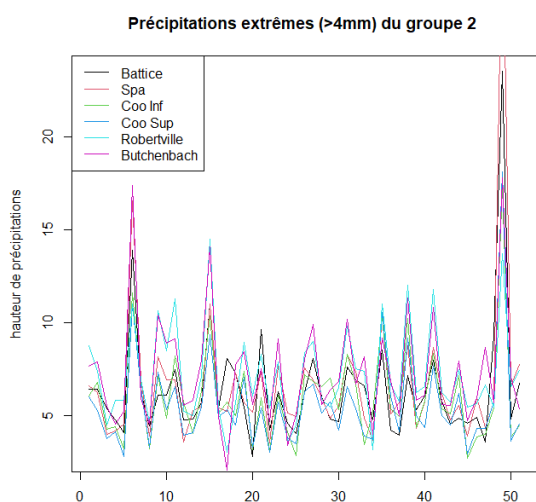


Figure 34 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations dont les moyennes hebdomadaires ont été considérées comme « moyennes et fortes » au niveau des stations du groupe 2 (classification des intervalles de 14 jours), entre 2018 et 2021.

		Battice	Spa	Robertville	Butgenbach	Coo inférieur	Coo supérieur,
Corrélation	Pour l'ensemble des données	0.948	0.956	0.955	0.965	0.976	0.979
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	0.92	0.93	0.895	0.929	0.951	0.963
Biais	Pour l'ensemble des données	-0.17	0.12	0.352	0.281	-0.234	-0.35
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	-0.565	0.328	0.972	0.894	-0.591	-1.038
Erreur quadratique moyenne	Pour l'ensemble des données	1.3	1.5	1.282	1.189	0.893	0.922
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	2.242	2.833	2.353	2.044	1.59	1.656

Tableau 5 : Indicateurs statistiques calculés entre la moyenne des précipitations pour le groupe 1 et celles de la station considérée.

Période d'étude : 1^{er} janvier 2018 – 20 novembre 2021

Taille totale de l'échantillon : 1419 observations

Taille de l'échantillon pour les moyennes et fortes : 356

Toutes les stations sont fortement corrélées entre elles, le groupe semble en effet très homogène. On a un biais assez important pour Robertville (la station la moins corrélée pour les précipitations moyennes et fortes) et, dans une moindre mesure, pour Butgenbach. On peut également noter le cas de Spa, pour qui l'erreur quadratique moyenne est élevée, s'approchant des 3 millimètres pour les précipitations moyennes et fortes.

Enfin, pour le troisième groupe, on peut voir des corrélations encore plus élevées (figures 34, 35, annexe 19 et tableau 6). Bien que ces bons scores soient notamment expliqués par le faible nombre de stations présentes dans le groupe, il augmente la confiance que l'on peut avoir en ces stations.

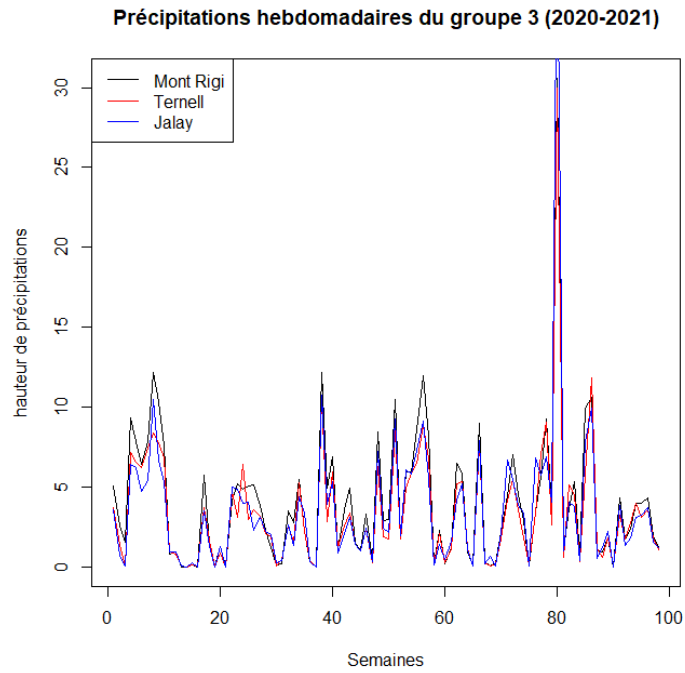


Figure 34 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyennes hebdomadaires) au niveau des stations du groupe 3 (classification des intervalles de 14 jours), du 6 janvier 2020 au 21 novembre 2021.

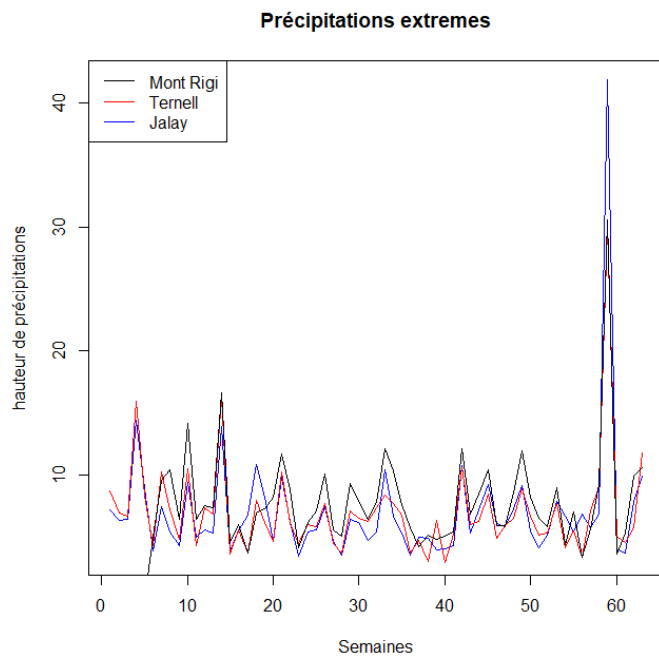


Figure 35 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations dont les moyennes hebdomadaires ont été considérées comme « moyennes et fortes » au niveau des station du groupe 3 (classification des intervalles de 14 jours), entre 2018 et 2021.

		Ternell	Jalhay	Mont Rigi
Corrélation	Pour l'ensemble des données	0.987	0.978	0.982
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	0.979	0.976	0.975
Biais (en millimètre)	Pour l'ensemble des données	-0.231	-0.216	0.447
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	-0.509	-0.449	0.958
Erreur quadratique moyenne (en millimètre)	Pour l'ensemble des données	0.941	1.268	1.148
	Pour les précipitations moyennes et fortes (>4mm)	1.499	2.034	1.797

Tableau 6 : Indicateurs statistiques calculés entre la moyenne des précipitations pour le groupe 1 et celles de la station considérée

Période d'étude : 1^{er} janvier 2018 – 20 novembre 2021 (sauf Mont-Rigi : 22 novembre 2018 – 20 novembre 2021)

Taille totale de l'échantillon : 1419 observations (sauf Mont Rigi :1095)

Taille de l'échantillon pour les précipitations moyennes et fortes : 696 observations

On peut voir que le Mont Rigi a un biais plus important que les deux autres stations du groupe 3 ce qui s'explique par son régime pluvial (et plus particulièrement nival) très différent de toutes les stations analysées dans ce rapport.

3.3. Comparaison par années

Des comparaisons par années ont été effectuées et aucun changement significatif ne me semble avoir eu lieu (excepté pour 2021, mais c'est le cas pour toutes les stations, on peut alors émettre l'hypothèse que les précipitations n'ont pas été proportionnelles le long de l'année). Les graphiques seront disponibles en annexe (annexes 20 à 33).

3.4. Détermination des classes de qualité des observations pluviométriques

Les analyses établies dans le cadre de cette première partie ne permettent pas d'écarter clairement une ou plusieurs stations. Elles démontrent globalement que toutes les stations relativement fiables. Ainsi, toutes les stations seront jugées fiables et on utilisera le terme « qualité » et non celui de « fiabilité ».

Pour évaluer la qualité de ses observations pluviométriques, chaque station s'est vu attribuer une note allant de 1 (qualité excellente) à 4 (qualité médiocre) pour chacun de ses indicateurs statistiques. Comme cela a déjà été mentionné plus haut, les petits groupements tendent à surestimer la qualité des stations en raison du fait que le poids pour chaque station dans la moyenne augmente à mesure que la taille du groupe diminue. C'est pourquoi, seuls les groupes qui contiennent au moins 5 stations seront pris en compte dans cette conclusion.

Ainsi, la situation du Mont-Rigi car la station a été placée uniquement dans des petits groupes (de 3 stations pour la première classification et seul pour la seconde), ce qui rend l'évaluation de sa qualité très difficile. J'ai choisi de lui attribuer la classe la plus élevée de fiabilité car il s'agit d'une station particulièrement contrôlée.

Pour la corrélation on définit les classes qualitatives selon les seuils suivants :

- 1 si toutes les corrélations sont supérieures à 92%, même pour les moyennes et fortes
- 2 si toutes les corrélations sont supérieures à 89%, même pour les moyennes et fortes et si au moins une des corrélations est inférieure à 92%
- 3 si toutes les corrélations sont supérieures à 85%, même pour les moyennes et fortes et si au moins une des corrélations est inférieure à 89%
- 4 si une des corrélations (y compris des moyennes et fortes) est inférieure à 85%

Pour le biais, on définit les classes qualitatives selon les seuils suivants :

- 1 s'il est inférieur (en valeur absolue) à
 - o 0,2 mm pour l'ensemble de la base de données
 - o ET 0.5 mm pour les précipitations moyennes et fortes
- 2 s'il est compris (en valeur absolue) entre
 - o 0.2 et 0.4 mm pour l'ensemble de la base de données
 - o OU 0.5 et 0.65 mm pour les précipitations moyennes et fortes
- 3 s'il est compris (en valeur absolue) entre
 - o 0.4 et 0.6 mm pour l'ensemble de la base de données
 - o OU 0.65 et 1 mm pour les précipitations moyennes et fortes
- 4 s'il est supérieur (en valeur absolue) à
 - o 0.6 mm pour l'ensemble de la base de données
 - o OU 1 mm pour les précipitations moyennes et fortes

Pour la RMS, on définit les classes qualitatives selon les seuils suivants :

- 1 si elle est inférieure à
 - o 1.25 mm pour l'ensemble de la base de données
 - o ET 2.5 mm pour les précipitations moyennes et fortes
- 2 si elle est comprise entre
 - o 1.25 mm et 1.6 mm pour l'ensemble de la base de données
 - o OU 2.5 et 2.75 mm pour les précipitations moyennes et fortes
- 3 si elle est comprise entre
 - o 1.6 mm et 2 mm pour l'ensemble de la base de données
 - o OU 2.7 et 3 mm pour les précipitations moyennes et fortes
- 4 si elle est supérieure à
 - o 2 mm pour l'ensemble de la base de données

- OU 3 mm pour les précipitations moyennes et fortes

Concernant le biais et la RMS, étant donné que certaines stations apparaissent dans deux groupements, une moyenne sera réalisée si les deux groupements donnent des qualités différentes.

J'ai choisi un indicateur de qualité par station sur base de la somme des indices de qualité de la corrélation, du biais et de la RMS. Ainsi, on définit :

- Une bonne qualité si la somme est inférieure à 6.
- Une qualité intermédiaire si la somme est comprise entre 6 (inclus) et 8 (exclu).
- Une qualité médiocre si la somme est supérieure ou égale à 8.

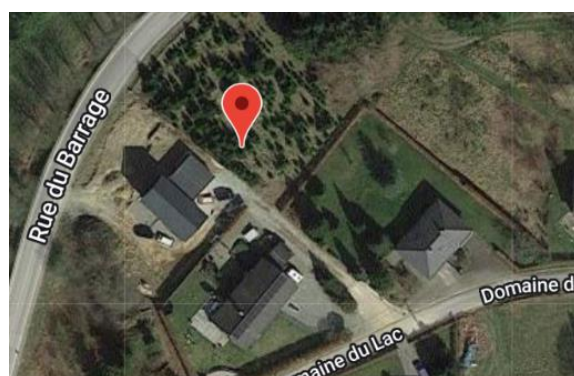
Pour résumer les résultats, l'ensemble des notes par station et par indicateur statistique est repris sur le tableau 7 ci-dessous. Les stations ont pu alors être classées en fonction de leurs qualités.

	Corrélation	Biais	RMS	Conclusion
Battice	1	2 (Biais positifs et négatifs)	1	Bonne qualité (Somme = 4)
Ternell	1	1 (Biais négatifs)	2	Bonne qualité (Somme = 4)
Mont Rigi	Cas particulier (1)	Cas particulier (Le Biais est positif, sans surprise)	Cas particulier (1)	Bonne qualité Choisi sur base d'autres critères
Spa	1	2 (Biais positifs et négatifs)	2	Bonne qualité (Somme = 5)
Coo-Inf.	2	2 (Biais négatifs)	1	Bonne qualité (Somme = 5)
Coo-Sup.	2	2 (Biais positifs et négatifs)	1	Bonne qualité (Somme = 5)
Butgenbach	2	2 (Biais positifs et négatifs)	2	Qualité moyenne (Somme = 6)
Sart Tilman	3	2 (Biais positifs et négatifs)	1	Qualité moyenne (Somme = 6)
Jalhay	1	2 (Biais positifs)	4	Qualité moyenne (Somme = 7) → Pluviomètre « instable »
Louveigné	3	3 (Biais positifs mais de valeurs très différentes selon les groupements)	2	Qualité médiocre (Somme = 8)

Lanaye	3	4 (Biais négatifs)	1	Qualité médiocre (Somme = 8) → Une possibilité serait de corriger le biais (sous-estimation d'environ 0.41mm) car c'est ce qui semble être le principal problème.
Awans	4	3 (Biais négatifs)	1	Qualité médiocre (Somme = 8) → Une possibilité serait de corriger le biais (sous-estimation d'environ 0.26mm) car c'est ce qui semble être le principal problème.
Gemmenich	4	2 (Biais positifs et négatifs)	2	Qualité médiocre (Somme = 8)
Robertville	3	2 (Biais positifs mais de valeurs très différentes selon les groupements)	3	Qualité médiocre (Somme = 8)

Tableau 7 : Qualité des pluviomètres. Valeur en rouge = valeurs remarquables

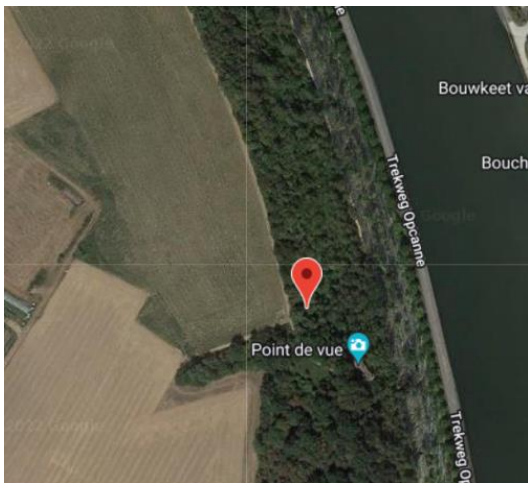
Pour les quatre stations de qualité médiocre, j'ai voulu voir si le problème pouvait venir de la position de la station. Ainsi, j'ai été rechercher les photos sur Google Maps (figures 36, 38, 40 et 42) via les coordonnées ainsi des photos des stations provenant du site de la SPW (figures 37, 39, 41 et 43).



Figures 36 et 37 : Photo de la station de Gemmenich



Figures 38 et 39 : Photo de la station de Robertville



Figures 40 et 41 : Photo de la station de Lanaye



Figures 42 et 43 : Photo de la station d'Awans

Pour Gemmenich, je ne vois rien qui pourrait influencer artificiellement les précipitations. Pour Robertville en revanche, la présence de buissons pourrait fausser les données. Cependant, le biais était plutôt positif, ce qui correspondrait à une surestimation des données, et ne coïnciderait donc pas avec l'hypothèse selon laquelle les gouttes de pluies n'auraient pas pu atteindre le pluviomètre à cause des buissons. Enfin, concernant Awans et Lanaye, leur biais négatif peut s'expliquer par le fait qu'il s'agit des stations qui reçoivent le moins de précipitations de manière générale. Concernant Lanaye, on pourrait penser également que la présence de l'eau à proximité du pluviomètre conduirait à fausser les données par l'évapotranspiration.

Pour la suite de ce rapport, le biais de Lanaye, celui d'Awans et la RMS de Jalhay sont également à garder en mémoire.

4. Evaluation de la qualité des simulations MAR

4.1. En général

4.1.1. Evaluation de la qualité station par station

4.1.1.1. Comparaison des valeurs journalières

J'ai utilisé la période d'étude restreinte (2018-2021), étant donné qu'elle a déjà été validée lors de la partie précédente. Un tableau récapitulatif reprenant les trois indicateurs statistiques ainsi que tous les groupes auxquels appartiennent chacune des stations pluviométriques (tableau 8) est présenté ci-dessous.

Le diagramme de Taylor (figure 44) et les histogrammes pour certaines stations ont également été ajoutés (figures 45 à 48), les autres histogrammes sont disponibles en annexes (annexes 34 à 42).

Station	Fiabilité de la station	Groupe lors du premier groupement	Groupe lors du second groupement	Corrélation	Biais	RMS
Battice	Bonne	1	2	0.782	-0.27	2.549
Ternell	Bonne	3	3	0.851	-0.106	2.588
Mont Rigi <i>Taille de l'échantillon : 1095</i> <i>Période d'étude : 22 novembre 2018 – 20 novembre 2021</i>	Bonne	4	3	0.84	-0.629	3.12
Spa	Bonne	3	2	0.832	-0.104	2.61
Coo-Inf	Bonne	1	2	0.783	0.023	2.377
Coo-Sup	Bonne	1	2	0.811	0.139	2.16
Butgenbach	Moyenne	3	2	0.798	-0.386	2.636
Sart-Tilman	Moyenne	1	1	0.764	-0.131	2.359
Jalhay	Moyenne	3	3	0.826	0.053	3.12
Louveigné	Mediocre	1	1	0.77	-0.088	2.481
Lanaye	Mediocre	2	1	0.755	0.329	1.977
Robertville	Mediocre	3	2	0.803	-0.209	2.556
Gemmenich	Mediocre	1	1	0.796	0.183	2.208
Awans	Mediocre	2	1	0.715	0.158	2.117

Tableau 8 : Indicateurs statistiques calculés entre les mesures de terrains et les mesures modélisées.

Période d'étude : 1^{er} janvier 2018 – 20 novembre 2021 (Sauf Mont-Rigi : 22 novembre 2018 – 20 novembre 2021)

Taille de l'échantillon : 1419 observations (sauf le Mont-Rigi : 1095)

Diagramme de Taylor (données modélisée - données terrains)

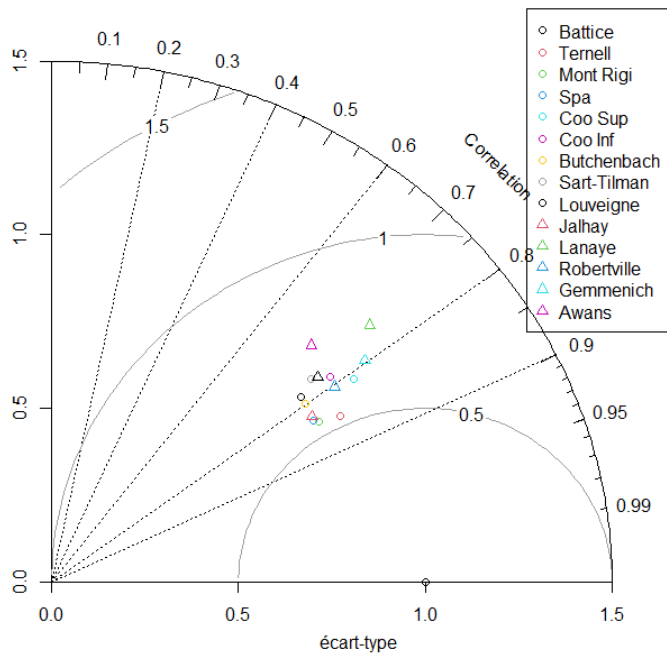


Figure 44 : Diagramme de Taylor, réalisé entre les mesures de terrains et les mesures modélisées (pour les valeurs journalières).

Période d'étude : 1^{er} janvier 2018 – 20 novembre 2021 (Sauf Mont-Rigi : 22 novembre 2018 – 20 novembre 2021)

Taille de l'échantillon : 1419 observations (sauf le Mont-Rigi : 1095)

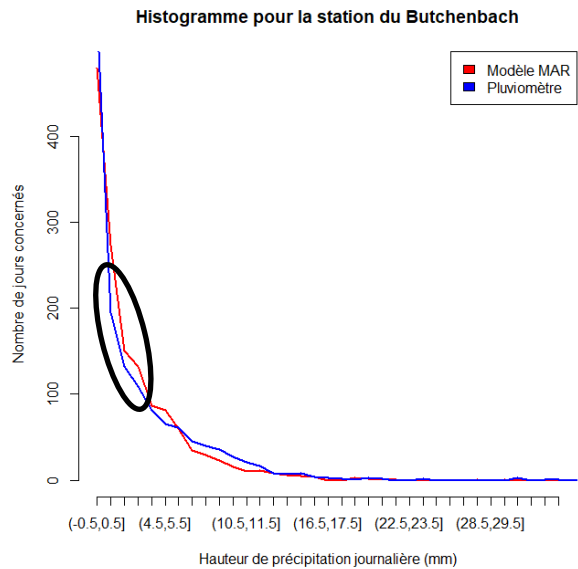
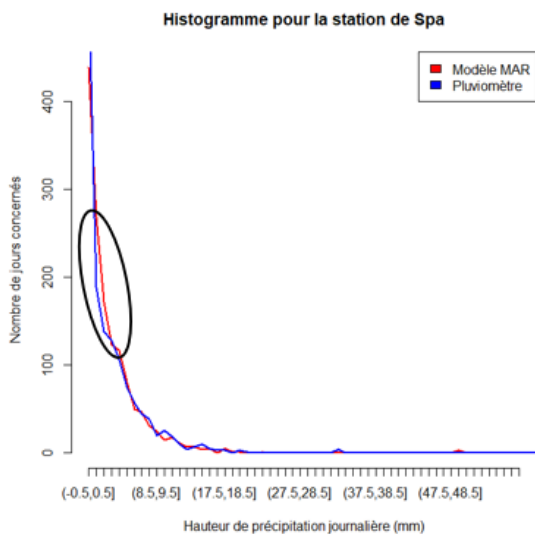


Figure 45 (à gauche) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Spa (Aérodrome).

Figure 46 (à droite) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Butgenbach

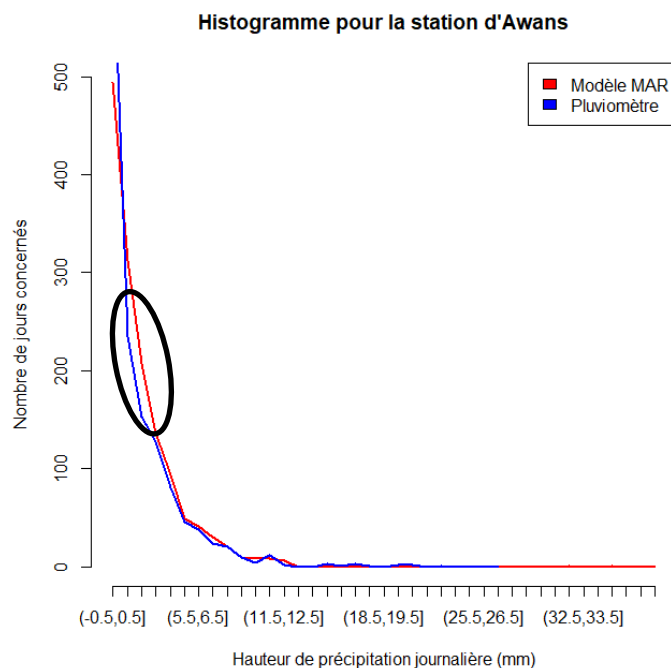
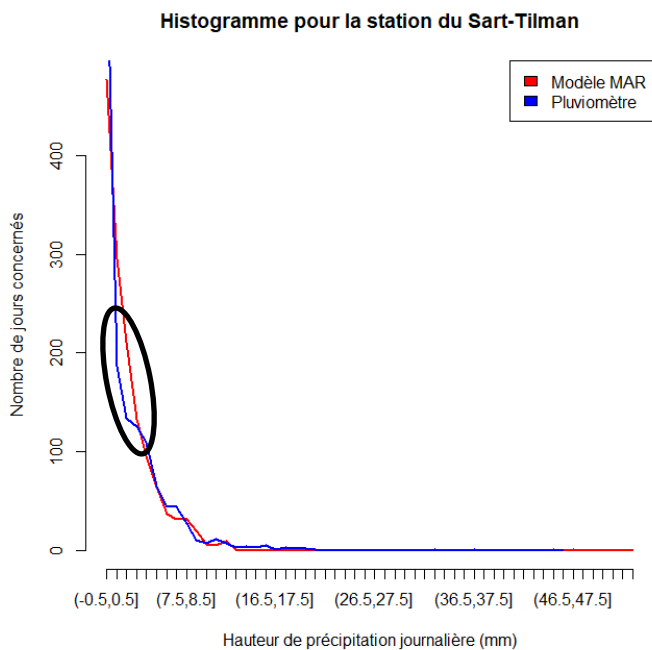


Figure 47 (à gauche) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour le Sart-Tilman.

Figure 48 (à droite) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Awans.

4.1.1.1.1. Analyse de la corrélation et de la RMS

De manière générale, les corrélations sont assez élevées, ce qui témoigne d'une modélisation assez fiable. Awans a néanmoins donné une corrélation plus faible que les autres stations (71,5%), suivi de Lanaye (75,5%). Ils ressortent en effet sur le Diagramme de Taylor.

Les erreurs quadratiques moyennes quant à elles, sont de l'ordre de quelques millimètres (de 1,977 à 3,12), ce qui n'est pas négligeable. Notons que concernant Jalhay, on peut également établir un lien avec ce qui a été dit lors de l'évaluation de la qualité des pluviomètres : étant donné que les données de terrains pour Jalhay fournissaient une RMS très élevée, il se pourrait que cette valeur de 3,12 soit causée par la station et non par la modélisation.

4.1.1.1.2. Analyse du biais

Même si le biais est dans la plupart des cas négatif, son amplitude varie assez fortement. Sur la plupart des histogrammes, on peut voir que le modèle MAR sous-estime légèrement le nombre de jours secs (intervalles de -0,5 à 0,5 mm), puis surestime le nombre de jours dont la quantité tombée se situe approximativement entre 2,5 et 5,5 mm (intervalle variable selon les stations). Cet effet est clairement visible notamment sur les histogrammes du Sart-Tilman (figure 47), de Butgenbach (figure 46) ou encore d'Awans (figure 48) : certains histogrammes ont alors été marqués d'un cercle noir pour permettre de le visualiser. Ensuite, les courbes se rejoignent.

Quelques cas particuliers peuvent cependant être mentionnés. Tout d’abord, les biais du Mont-Rigi (-0,629 mm) et de Butgenbach (-0,386 mm) qui traduisent une sous-estimation claire du modèle au niveau de la station. Ensuite, le biais de Lanaye est élevé et étrangement positif.

Rappelons que la station pluviométrique de Lanaye avait un biais négatif de -0,41 millimètres, lors de l’évaluation de la qualité des stations, ce qui pouvait conduire à penser que les mesures de terrain étaient sous-estimées, et donc expliquer ce biais positif entre MAR et le pluviomètre. Le tableau 9 nous montre que lorsqu’on corrige ce biais dans la base de données pluviométriques, on observe un biais pour le modèle MAR plus conforme aux autres stations. Cet effet est également observable, dans une moindre mesure, pour la station d’Awans.

Station		Correlation	Biais (en millimètres)	RMS (en millimètres)
Lanaye	Base de données pluviométrique initiale :	0.755	0.329	1.977
	Base de données pluviométrique « corrigée » :	0.755	-0.081	1.951
Awans	Base de données pluviométrique initiale :	0.715	0.158	2.117
	Base de données pluviométrique « corrigée » :	0.715	-0.102	2.113

Tableau 9 : comparaison de la base de données initiale et corrigée pour les stations de Lanaye et Awans.

On pourrait alors penser que le problème vient du pluviomètre et non de la modélisation. C’est une explication possible mais une autre explication sera développée plus loin lors des facteurs explicatifs (page 61).

Notons que l’évolution du biais est un peu particulière et mérite d’être mentionnée. Pour évaluer son évolution, j’ai séparé ma base de données en cinq périodes de référence de quatre ans (comme cela avait déjà été fait lors de la première partie) et calculé le biais pour chaque période. Les valeurs par station et par période ont été reprises sur le tableau 10.

Si on considère la moyenne des 14 stations, on peut voir que le biais semblait stable lors des quatre premières périodes de références : il est toujours légèrement supérieur à 0.3 mm par jour. Cependant, lors de la dernière période de référence, on voit que le biais diminue fortement pour se rapprocher de 0. En plus d’être visible si on considère la moyenne des 14 stations, cet effet est également présent pour la majorité des stations si on les considère individuellement.

Il est important de mentionner l’évolution n’est pas due à une amélioration du modèle. En effet, l’ensemble des valeurs de hauteurs de précipitations depuis 2002 ont été simulées avec la dernière version du modèle.

Station	Période 2002-2005 (Biais en mm)	Période 2006-2009 (Biais en mm)	Période 2010-2013 (Biais en mm)	Période 2014-2017 (Biais en mm)	Période restreinte : 2018-2021 (Biais en mm)	Période élargie : 2002-2021 (Biais en mm)
Gemmenich	0.03	-0.14	-0.18	-0.15	0.18	-0.06
Awans	Pas de données	Pas de données	0.11	0.08	0.16	0.11
Battice	-0.68	-0.58	-0.58	-0.57	-0.27	-0.54
Lanaye	-0.04	-0.23	-0.12	-0.1	0.33	-0.04
Ternell	0.04	-0.26	-0.48	-0.67	-0.11	-0.3
Mont Rigi	Pas de données	Pas de données	Pas de données	Pas de données	-0.63	-0.63
Spa	Pas de données	Pas de données	Pas de données	-0.13	-0.11	-0.11
Jalhay	0.09	0.21	-0.07	-0.36	0.05	-0.02
Louveigné	-0.45	-0.34	-0.31	-0.21	-0.09	-0.28
Coo inférieur	-0.52	-0.45	-0.68	-0.31	0.02	-0.39
Coo supérieur	-0.2	-0.11	-0.19	-0.12	0.14	-0.1
Robertville	-0.74	-0.53	-0.42	-0.61	-0.21	-0.51
Butgenbach	-0.75	-0.94	-0.64	-0.71	-0.39	-0.69
Sart-Tilman	-0.12	-0.53	-0.2	-0.4	-0.13	-0.28
Moyenne	-0.304	-0.355	-0.313	-0.328	-0.076	-0.274

Tableau 10 : Biais en fonction de la station et de la période de référence

Si on analyse année par année, la diminution semble bien venir à partir 2018, même s'il y a des variations interannuelles parfois importantes pour la période 2002-2017.

Notons que cette analyse en 5 périodes de référence a également été réalisée pour la RMS mais aucune évolution significative n'a été détectée (valeur de RMS légèrement plus élevée pour la période 2018-2021 mais cela variait en fonction des stations).

4.1.1.2. Comparaison des cumuls annuels

Pour avoir une idée de la capacité du le modèle MAR à modéliser les ordres de grandeurs, il est intéressant d'analyser les cumuls annuels. Ainsi, pour ce second point, j'ai exploité les cumuls annuels, sur la période élargie (2002 à 2021), afin d'avoir plus grand nombre de données.

Etant donné que l'année 2021 est incomplète dans la base de données des pluviomètres, le coefficient d'extrapolation (mentionné lors de la partie 1) a été réalisé et a été multiplié au cumul annuel incomplet de l'année 2021. Il vaut dans ce cas 1,123. Il n'aurait en effet pas été judicieux de supprimer l'année complète l'importance de l'année 2021 dans ce travail.

Les indicateurs statistiques ont été repris sur le tableau 11 et le diagramme de Taylor sur la figure 49. Les stations du Mont Rigi et de Spa contiennent seulement respectivement 3 et 4 observations, ce qui est très faible pour pouvoir tirer des conclusions. Ainsi, seuls les indicateurs statistiques relatifs aux valeurs journalières rentreront dans les analyses qui suivront.

Station	Période d'étude	Fiabilité de la station	Groupe lors du premier groupement	Groupe lors du second groupement	Corrélation	Biais (en mm)	RMS (en mm)
Battice	2002-2021 20 observations	Bonne	2	1	0.736	-197.26	216.06
Ternell	2002-2021 20 observations	Bonne	3	3	0.653	-109.54	181.45
Mont Rigi	2019-2021 3 observations	Bonne	3	4	0.622	-146.61	256.1
Spa	2017-2021 5 observations	Bonne	2	3	0.979	-52.58	59.13
Coo-Inf	2002-2021 20 observations	Bonne	2	1	0.603	-142.52	182.32
Coo-Sup	2002-2021 20 observations	Bonne	2	1	0.827	-35.89	86.37
Butgenbach	2002-2021 20 observations	Moyenne	2	3	0.675	-245.17	281.47
Sart-Tilman	2002-2021 20 observations	Moyenne	1	1	0.485	-101.56	157.88
Jalhay	2002-2021 20 observations	Moyenne	3	3	0.641	-8.87	148.39
Louveigné	2002-2021 20 observations	Mediocre	1	1	0.578	-103.08	145.34
Lanaye	2002-2021 20 observations	Mediocre	1	2	0.511	-13.46	94.96
Robertville	2002-2021 20 observations	Mediocre	2	3	0.73	-184.51	217.44
Gemmenich	2002-2021 20 observations	Mediocre	1	1	0.573	-20.42	101.37
Awans	2010-2021 12 observations	Mediocre	1	2	0.796	41.58	67.7

Tableau 11 : Indicateurs statistiques calculés entre les mesures de terrains et les mesures modélisées, sur base des cumuls annuels.

Diagramme de Taylor (données modélisée - données terrains)

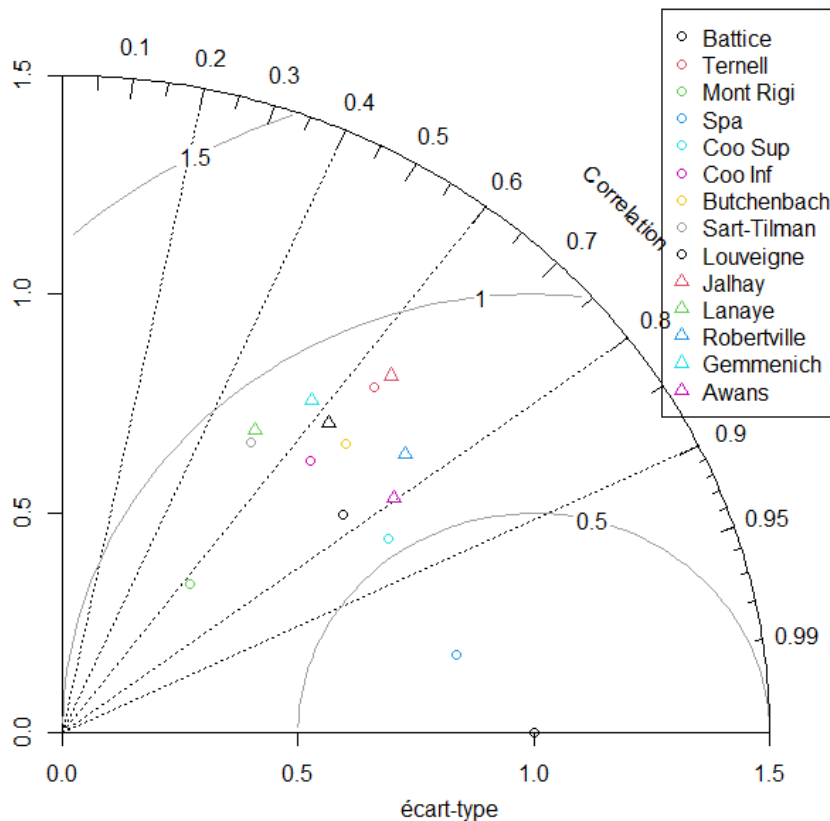


Figure 49 : Diagramme de Taylor, réalisé entre les mesures de terrains et les mesures modélisées (pour les cumuls annuels).
Période d'étude et nombre d'observations : Voir tableau

4.1.1.2.1. Analyse de la corrélation et de la RMS

D'une manière générale, on peut voir sur le diagramme (ainsi que sur le tableau) que les corrélations sont nettement plus faibles pour les cumuls annuels que pour les valeurs journalières. Certaines stations (Gemmenich, Lanaye, Sart-Tilman, Louveigné) ont même des corrélations inférieures à 60%.

Concernant les biais et les RMS, il est logique que leurs valeurs soient beaucoup plus élevées étant donné que la variance est logiquement plus élevée sur une période d'un an que sur une période d'une journée. Cependant, même lorsqu'on normalise les bases de données, on a une RMS plus élevée dans le cadre des cumuls annuels que dans le cadre des valeurs journalières. En effet, les points sont plus proches de la courbe de niveau « RMS =1 » sur le diagramme de Taylor des cumuls annuels que pour celui des valeurs annuelles. Le tableau 12 compare les deux types de RMS (grâce à la normalisation), seules Awans et Coo supérieurs ont des valeurs de RMS plus faibles pour les cumuls annuels.

Station	RMS normalisé pour les valeurs journalières	RMS normalisé pour les cumuls annuels
Gemmenich	0.64	0.9
Awans	0.76	0.61
Battice	0.66	0.67
Lanaye	0.7	0.96
Ternell	0.55	0.82
Mont-Rigi	0.57	0.71
Spa	0.58	0.19
Jalhay	0.59	0.83
Louveigné	0.68	0.86
Coo inférieur	0.66	0.83
Coo Supérieur	0.61	0.56
Butgenbach	0.64	0.78
Sart-Tilman	0.69	0.98
Robertville	0.63	0.7

Tableau 12 : comparaison des RMS pour les valeurs journalières et annuelles

De plus, on peut voir que l'ordre de grandeur de la RMS est très différent selon les stations. La RMS maximale (Butgenbach) est plus de 4 fois plus élevée que la RMS minimale (Awans²⁶).

Bien que cela soit à relativiser étant donné le nombre beaucoup plus faible d'observations pour les cumuls annuels, ces faibles valeurs de corrélations et ces valeurs élevées de RMS nous indiquent que le modèle modélise mieux les valeurs journalières que les cumuls annuels.

Cela peut s'expliquer par le fonctionnement même du modèle MAR. Comme cela a été mentionné dans l'introduction sur base de la thèse de Wyard (2018), on fournit à intervalle de temps réguliers, des informations provenant de réanalyse ou d'un modèle global. Ainsi, à l'échelle journalière, le modèle est censé connaître l'existence des phénomènes météorologiques (front, anticyclones...) qui se produisent au-dessus de la Belgique. En d'autres mots, il y a une relation physique directe entre la réalité et la modélisation, ce qui diminue les risques erreurs. Cependant, à l'échelle annuelle, les erreurs sont simplement sommées, ce qui peut les amplifier.

4.1.1.2.2. Analyse du biais

Ensuite, concernant les biais, on peut voir qu'ils sont tous négatifs à l'exception d'Awans. Tout comme pour les valeurs journalières, leurs amplitudes varient nettement en fonction des différentes stations mais ils peuvent être qualifiés, dans la plupart des cas, de non-négligeable. Butgenbach et Battice ont des biais qui dépassent les 200 millimètres par an.

Concernant l'évolution du biais, on observe un phénomène similaire à celui qui avait été décrit à l'échelle journalière : une diminution nette du biais pour la période 2018-2021 par rapport aux quatre autres périodes de références. En effet, le biais moyen pour les 14 stations prend une valeur allant de -110 à -130 mm pour les 4 premières périodes de référence, et vaut seulement -30,312 mm pour la période 2018-2021 (annexe 43).

On peut dire que l'importance de la négativité des biais des valeurs annuelles par rapport aux biais des valeurs journalières peut s'expliquer par deux raisons (en plus de la différence d'ordre de grandeur). Premièrement, tout comme pour la RMS et la corrélation, cela s'explique en raison du fonctionnement

²⁶ Je n'ai pas considéré Spa vu le faible nombre d'observations

de MAR. Deuxièmement, cela est dû à l'évolution du biais. En effet, les cumuls annuels ont été réalisés sur la période élargie, où le biais était plus important alors que les valeurs journalières ont été considérées sur la période restreintes, où le biais était plus faible.

Enfin, il semble y avoir de correspondance claire entre les stations qui étaient bien modélisées à l'échelle journalières et celles qui le sont à l'échelle annuelle.

4.1.1.3. Détermination des classes de qualité des simulations MAR

Pour conclure cette seconde partie, je vais attribuer des classes en fonction de la qualité des données simulées par MAR. Chaque station se verra attribuer une note allant de 1 (qualité excellente) à 5 (qualité mauvaise) pour chacun de ses indicateurs statistiques. Etant donné que les trois indicateurs statistiques ont été calculés à deux reprises (pour les valeurs journalières et pour les cumuls annuels), chaque station sera associée à 6 notes. Les choix d'attribution de ces notes sont détaillés dans le tableau 13.

	Valeurs journalières	Cumuls annuels
Corrélation	1 pour une corrélation supérieure à 0.8 2 pour une corrélation entre 0.7 et 0.8 3 pour une corrélation entre 0.6 et 0.7 4 pour une corrélation entre 0.5 et 0.6 5 pour une corrélation inférieure à 0.5	
Biais	1 pour un biais inférieur à 0.1 mm en valeur absolue 2 pour un biais entre 0.1 et 0.2 mm en valeur absolue 3 pour un biais entre 0.2 et 0.3 mm en valeur absolue 4 pour un biais entre 0.3 et 0.4 mm en valeur absolue 5 pour un biais supérieur à 0.4 mm en valeur absolue	1 pour un biais inférieur à 50 mm en valeur absolue 2 pour un biais entre 50 et 100 mm en valeur absolue 3 pour un biais entre 100 et 150 mm en valeur absolue 4 pour un biais entre 150 et 200 mm en valeur absolue 5 pour un biais supérieur à 200 mm en valeur absolue
RMS	1 pour un biais inférieur à 2 mm 2 pour un biais entre 2 et 2.5 mm 3 pour un biais entre 2.5 et 3 mm 4 pour un biais entre 3 et 3.5 mm (5 pour un biais supérieur à 3.5 mm) ²⁷	1 pour un biais inférieur à 100 mm 2 pour un biais entre 100 et 150 mm 3 pour un biais entre 150 et 200 mm 4 pour un biais entre 200 et 250 mm 5 pour un biais supérieur à 250 mm

Tableau 13 : Notes de fiabilité de MAR

La somme de ces 6 notes permettra de donner une note globale à chaque station. Chaque station prendra donc une note variant théoriquement de 6 à 30, avec une capacité de modélisation qui se dégrade au fur et à mesure que la note augmente. Concernant les stations de Spa et du Mont Rigi, le

²⁷ Aucune station ne rencontre ce critère.

nombre d'observations dans le cadre des cumuls annuels a été jugé trop faible. Ces deux stations ne se verront donc pas attribuer de notes concernant les cumuls annuels et leurs notes relatives aux valeurs journalières seront doublées.

On définit les classes qualitatives selon les seuils suivants :

- Une bonne qualité pour les stations dont la note est inférieure ou égale à 13
- Une qualité intermédiaire pour les stations dont la note varie entre 13 et 17
- Une qualité médiocre pour les stations dont la note est strictement supérieure à 17

Ces classes sont reprises dans le tableau 14

Station	Notes relatives aux corrélations		Notes relatives aux biais		Notes relatives aux RMS		Somme
	Valeurs journalières	Cumuls annuels	Valeurs journalières	Cumuls annuels	Valeurs journalières	Cumuls annuels	
Battice	2	2	3	4	3	4	18 Qualité médiocre
Ternell	1	3	2	3	3	3	15 Qualité intermédiaire
Mont Rigi	1	/	5	/	4	/	20 Qualité médiocre
Spa	1	/	2	/	3	/	12 Bonne Qualité
Coo-Inf	2	3	1	3	2	3	14 Qualité intermédiaire
Coo-Sup	1	1	2	2	2	1	9 Bonne Qualité
Butgenbach	2	3	4	5	3	5	22 Qualité médiocre
Sart-Tilman	2	5	2	3	2	3	17 Qualité intermédiaire
Jalhay	1	3	1	1	4	2	12 Bonne Qualité
Louveigné	2	4	1	3	2	2	14 Qualité intermédiaire

Lanaye	2	4	4	1	1	1	12 Bonne Qualité
Robertville	1	2	3	4	3	4	17 Qualité intermédi aire
Gemmenich	2	4	2	1	2	3	14 Qualité intermédi aire
Awans	2	2	2	1	2	1	10 Bonne Qualité

Tableau 14 : Qualité des simulations MAR en fonction des stations

4.1.2. Les facteurs explicatifs

4.1.2.1. La qualité des pluviomètres

Lorsque l'on lie cette classification des données modélisées à la classification réalisée concernant la qualité des pluviomètres, on peut voir des résultats inattendus. En effet, comme le montre la figure 50, la qualité d'une station ne semble pas influencer la capacité du modèle à prédire les précipitations.

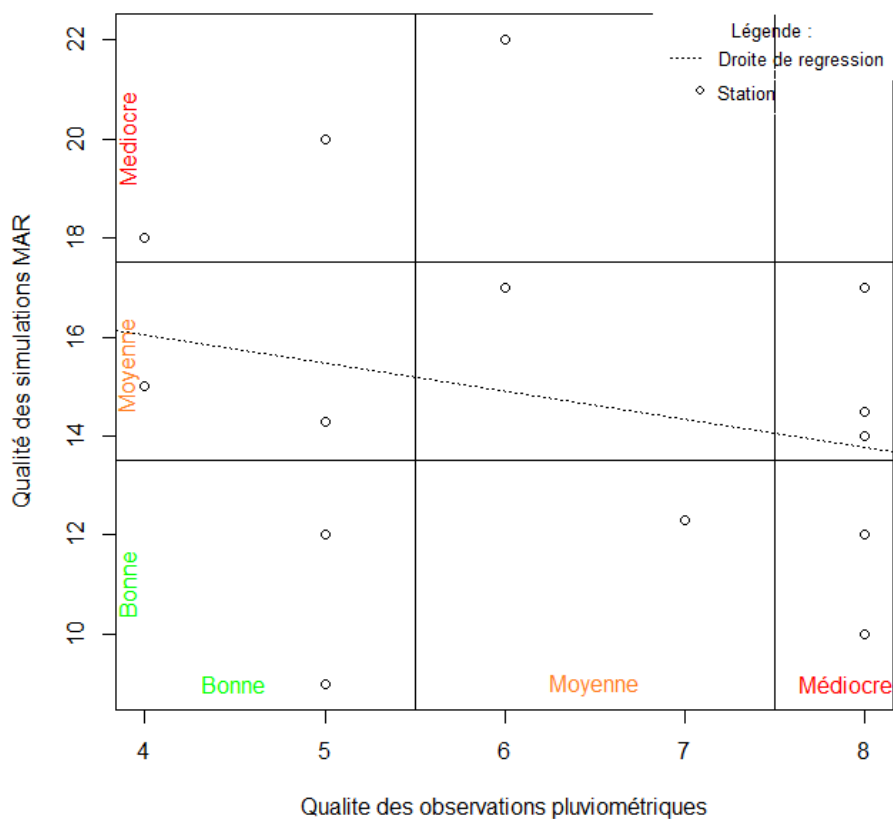


Figure 50 : relation entre la qualité des observations pluviométriques et des simulations MAR.

La droite de régression légèrement négative, ce qui signifierait que plus une station est de qualité élevée, plus la capacité est faible, mais le R carré est tellement faible (0.02) que l'on peut la considérer l'influence de la qualité comme négligeable. J'ai également fait un test Chi carré, et l'hypothèse nulle d'indépendance ne peut pas être rejetée (p-valeur = 0.74), ce qui va dans le même sens.

Ainsi, bien que certains effets sur des pluviomètres particuliers pourraient permettre d'expliquer des indicateurs statistiques hors-normes, comme la RMS pour Jalhay²⁸, on peut considérer que la qualité de la donnée de terrain n'influence pas celle de la donnée modélisée. En d'autres termes, toutes les stations sont suffisamment fiables pour permettre la modélisation.

4.1.2.2. Les groupements des pluviomètres (ou régimes pluviométriques)

Concernant la première classification (sur base des cumuls annuels), la figure 51 (et l'annexe 44) permet de visualiser la variation de la capacité du modèle MAR à modéliser les observations pluviométriques.

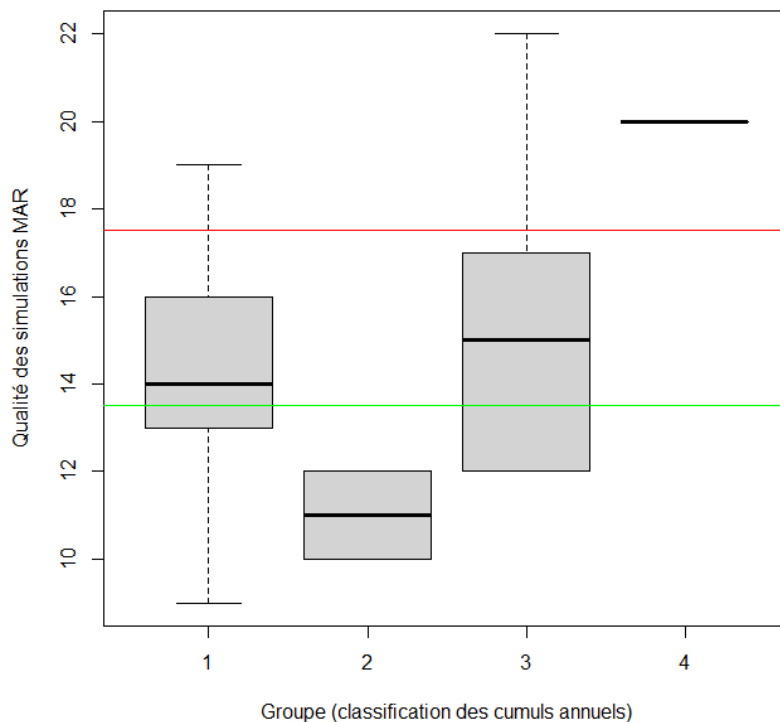


Figure 51 : Boîte à Moustache de la qualité pour chaque groupe (de la classification des cumuls annuels)

On voit que le second groupe qui obtient les meilleurs scores de modélisation. Rappelons qu'il s'agit du groupe qui recevait le moins de précipitations à l'échelle annuelle. A l'inverse, les stations du groupe 3 (et du groupe 4), qui recevaient la plus grande quantité de précipitation, obtiennent les moins bons

²⁸ Concernant le biais pour Awans et Lanaye, je pense que la seconde hypothèse (qui sera développée page 61) est la plus plausible.

scores. Ainsi, on peut émettre l'hypothèse que la capacité du modèle à représenter les précipitations se dégrade au fur et à mesure que la quantité de précipitation augmente.

Concernant le second groupement (sur base des intervalles de 14 jours), on peut voir sur la figure 52 (et l'annexe 45) que ce sont les stations contenues dans la première classe semblent être les mieux modélisées. De nouveaux, il s'agit des stations qui reçoivent le moins de précipitations.

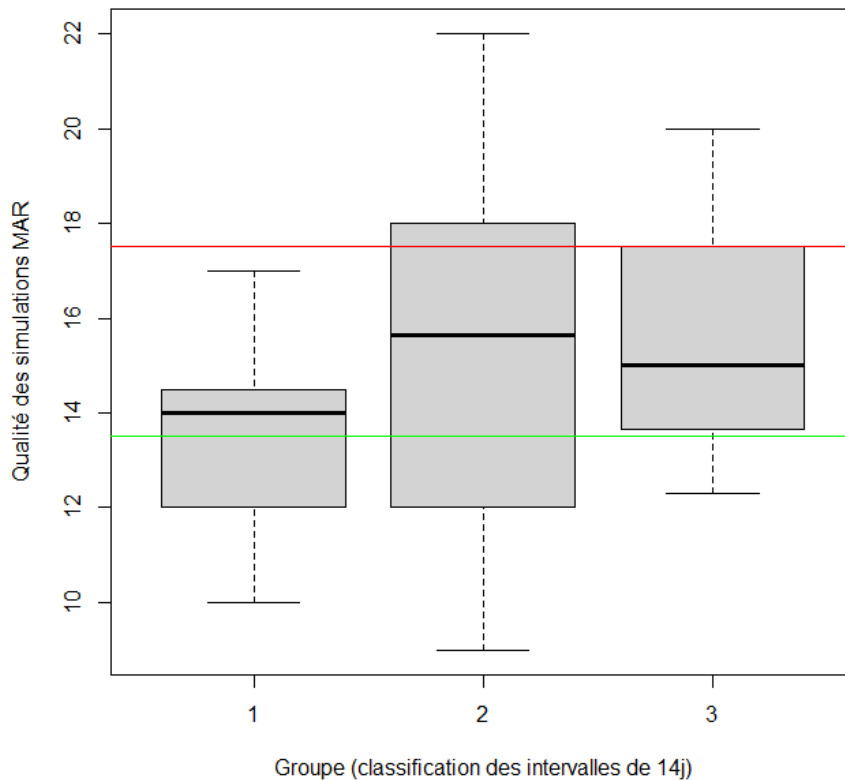


Figure 52 : Boîte à Moustache de la qualité pour chaque groupe (de la classification des intervalles de 14 jours)
Période d'étude et nombre d'observations : voir tableaux précédents

Pour vérifier l'hypothèse selon laquelle les précipitations moyennes (et donc l'altitude) influencent la capacité de modélisation, j'ai réalisé une régression linéaire (figure 53). Bien que le R carré soit faible (0.3), il y a en effet une relation linéaire entre la qualité des données modélisées et la quantité de précipitations moyennes. La corrélation est positive et vaut 0.592.

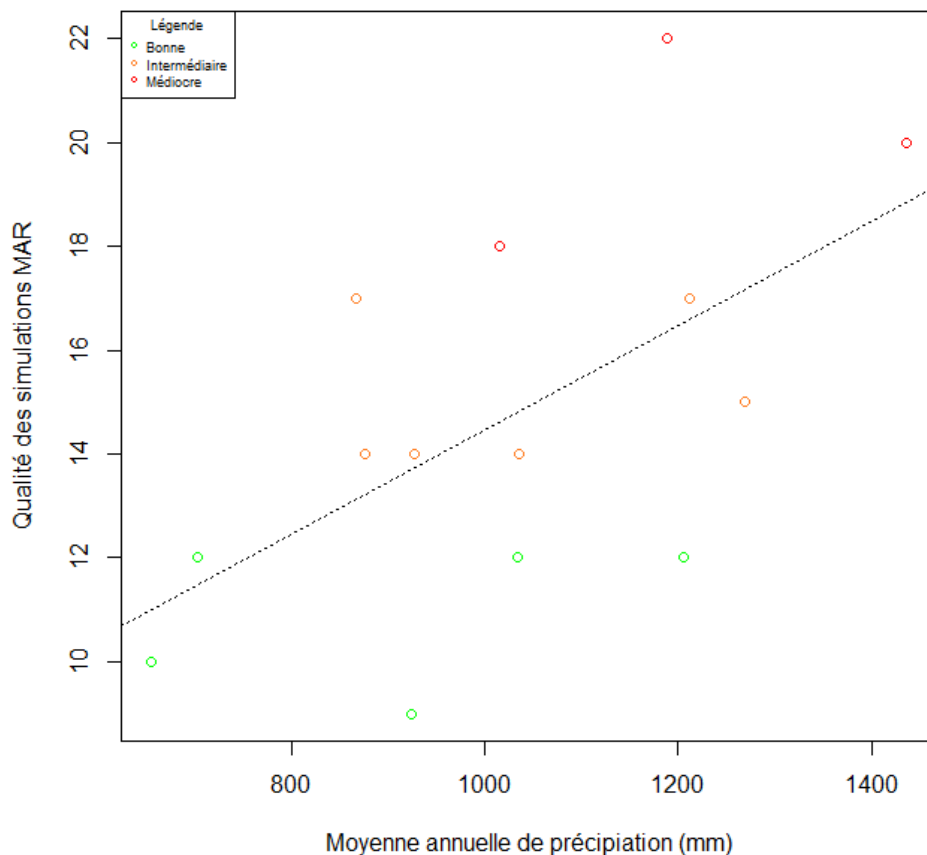


Figure 53 : relation entre la moyenne annuelle de précipitations et la qualité des simulations MAR.
Ligne en pointillé = droite de régression linéaire

Une étude réalisée sur l'étude du climat de l'Afrique de l'Ouest, grâce au modèle MAR, avait montré des résultats similaires. Selon les auteurs, le modèle sous-estimerait les précipitations d'origine orographique en raison d'un lissage de la topographie. Bien-sûr, cela est à relativiser étant donné que la zone et la période d'étude diffère (Kouassi, 2015).

De plus, on peut voir une relation, encore plus claire entre le biais et la quantité moyenne de précipitations. En effet, comme le montrent les figures 54 et 55, plus la quantité de précipitations est élevée, plus le biais est négatif. La corrélation est de -75,8% pour les biais à l'échelle journalière et de -70.5% pour les biais annuels. Au vu du R carré et de la corrélation, la dépendance entre les deux variables est encore plus forte à l'échelle journalière.

Ainsi, les biais positifs (ou très faibles) de Lanaye et d'Awans s'expliqueraient surtout par une tendance du modèle MAR à vouloir « stabiliser » les hauteurs de précipitations, en diminuant davantage les précipitations importantes que les précipitations faibles. Awans et Lanaye étant les stations avec une quantité particulièrement faible de précipitations, le modèle fournit même un biais positif. Ainsi, on peut émettre l'hypothèse que le modèle MAR ne considère pas assez les différences topo

climatologiques, et qu'il pas assez de liberté par rapport aux informations fournies par les réanalyses (ou le modèle global).

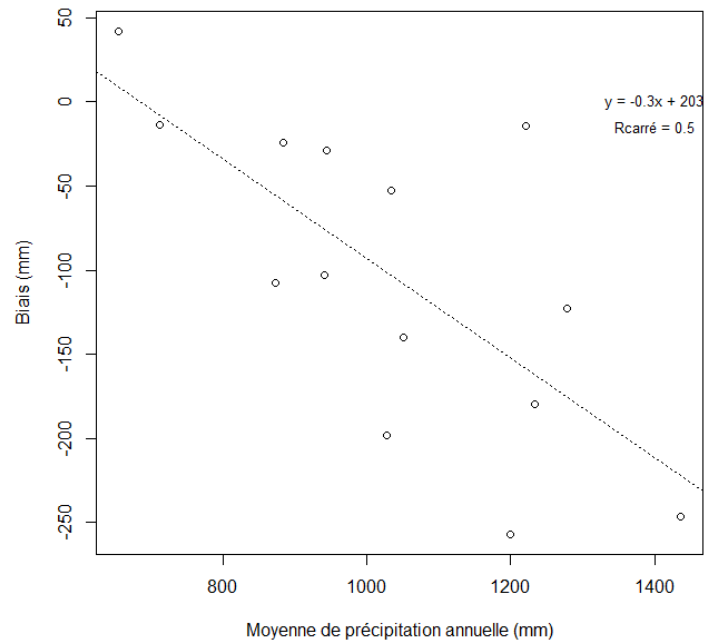
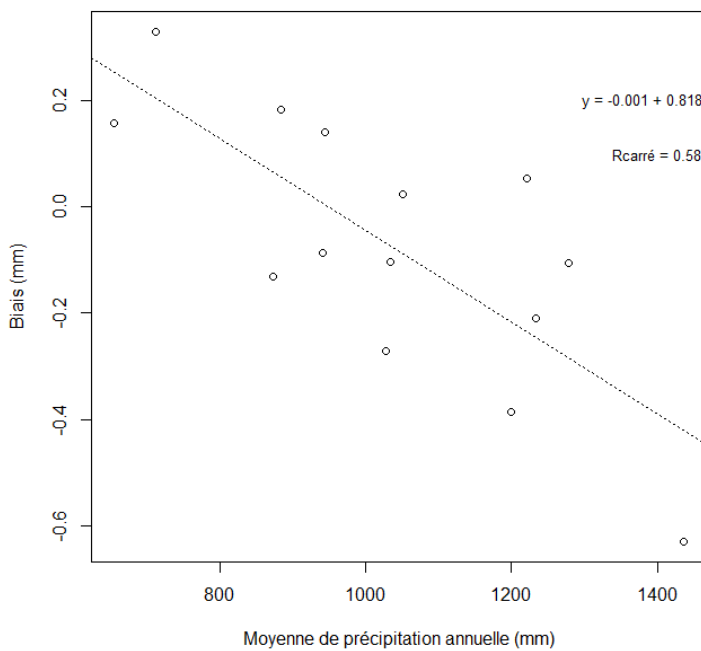


Figure 55 (à gauche) : relation entre la moyenne annuelle de précipitations et le biais journalier.

Ligne en pointillé = droite de régression linéaire

Figure 54 (à droite) : relation entre la moyenne annuelle de précipitations et le biais annuel.

Ligne en pointillé = droite de régression linéaire

4.1.2.3. L'intensité de précipitation (journalière)

Pour évaluer l'évolution des indicateurs statistiques en fonction de l'intensité des précipitations, j'ai réalisé 5 classes d'intensité en fonction de la moyenne des données pluviométriques des 14 stations (pour chaque jour). Ces classes ont été définies selon les seuils suivants :

- Classe 1 : Jour sec, pour les précipitations hautes à 1 millimètre
- Classe 2 : Jour de précipitations faibles, pour les hauteurs entre 1 et 4 millimètres
- Classe 3 : Jour de précipitations moyennes, pour les hauteurs entre 4 et 10 millimètres
- Classe 4 : Jour de précipitations fortes, pour les hauteurs entre 10 et 20 millimètres
- Classe 5 : Jour de précipitations abondantes²⁹, pour les hauteurs supérieures à 20 millimètres

Bien sûr, pour la base de données MAR, j'ai pris les mêmes jours que les données pluviométriques, même si leurs moyennes n'entraient pas dans l'intervalle de la classe. Notons que j'ai utilisé la période élargie, pour éviter que les classes de fortes intensités ne comportent trop peu d'observations.

Pour chacune des classes, le biais a été calculé pour chaque station (figure 56). On peut voir que lors des jours secs ou d'intensité faible, le biais est positif ; il diminue ensuite progressivement pour atteindre la valeur de -7.19mm en moyenne pour les précipitations abondantes. Ainsi, plus l'épisode

²⁹ Seuil défini par l'IRM (Bertrand *et al.*, 2020)

de pluie est intense, plus le biais est négatif. Il y a une relation linéaire très claire entre la moyenne de précipitations dans chaque classe et le biais moyen de chaque classe³⁰ (Annexe 46).

Notons que l'on peut établir un lien avec le facteur précédent (régime pluviométrique). En effet, même lors des épisodes de précipitations abondantes, on retrouve les stations qui reçoivent généralement le moins de précipitations comme ayant le biais le moins important, à savoir Awans, Lanaye et Gemmenich.

Concernant l'erreur quadratique moyenne (figure 57), on peut voir qu'elle augmente au fur et à mesure que les précipitations s'intensifient. On s'attend à une erreur quadratique moyenne de 15,388 mm environ pour les précipitations abondantes. La relation linéaire entre la moyenne de précipitation dans chaque classe et la RMS moyenne de chaque classe est également très nette³¹ (Annexe 47). Notons cependant que, bien que cet effet semble important sur le graphique, le pourcentage d'erreur (quadratique moyenne) par rapport aux moyennes de précipitations dans la classe est plus important pour les jours secs et de précipitations faible, et diminue au fur et à mesure que l'intensité augmente.

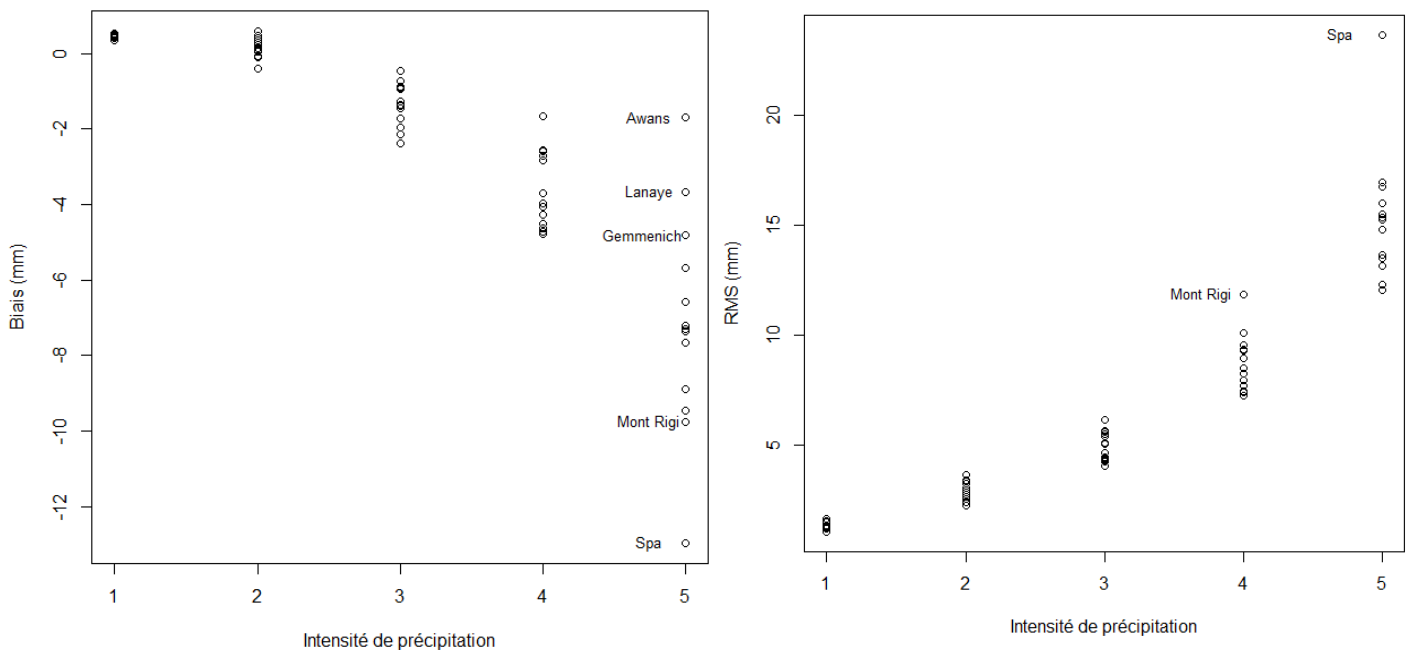


Figure 56 (à gauche) : Biais en fonction de l'intensité de précipitations.

Figure 57 (à droite) : RMS en fonction de l'intensité de précipitations.

De plus, la différence de biais et de RMS entre les stations augmente également avec l'intensité des précipitations. On peut donc dire que la variabilité spatiale de la qualité des simulations augmente à mesure que les précipitations s'intensifient.

³⁰ R carré = 0.995 ; y = - 0.279 x + 0.524

³¹ R carré = 0.997 ; y = 0.497 x + 1.626

4.2. L'épisode du 13 au 15 juillet

4.2.1. Contexte atmosphérique

Avant d'analyser les quantités de précipitations observées et simulées lors des inondations de juillet 2021, je vais commencer par situer le contexte atmosphérique dans lequel l'épisode s'est produit. Grâce au site wetter3.de (2022), j'ai pu avoir accès aux archives des cartes synoptiques et géopotentielle (à l'échelle européenne).

Les conditions atmosphériques générales sont couramment définies grâce aux cartes géopotentielle à 500 Hectopascal. Ce niveau de pression correspond à une altitude approximative de 5500 m, soit au milieu de la troposphère. Ces cartes géopotentielle fournissent d'une part la pression de surface réduite au niveau de la mer en hectopascal (lignes blanches) et d'autre part les altitudes géopotentielle³² en décimètre (Isohypse³³ et couleurs). Des conditions anticycloniques seront détectées par une pression de surface et une altitude géopotentielle élevée alors que les valeurs dépressionnaires seront plus faibles (Hufty, 2001).

Dans la nuit du 10 au 11 juillet 2021, une goutte froide s'est détachée au niveau du Groenland, elle est visible tant en altitude qu'au niveau du sol (figure 58).

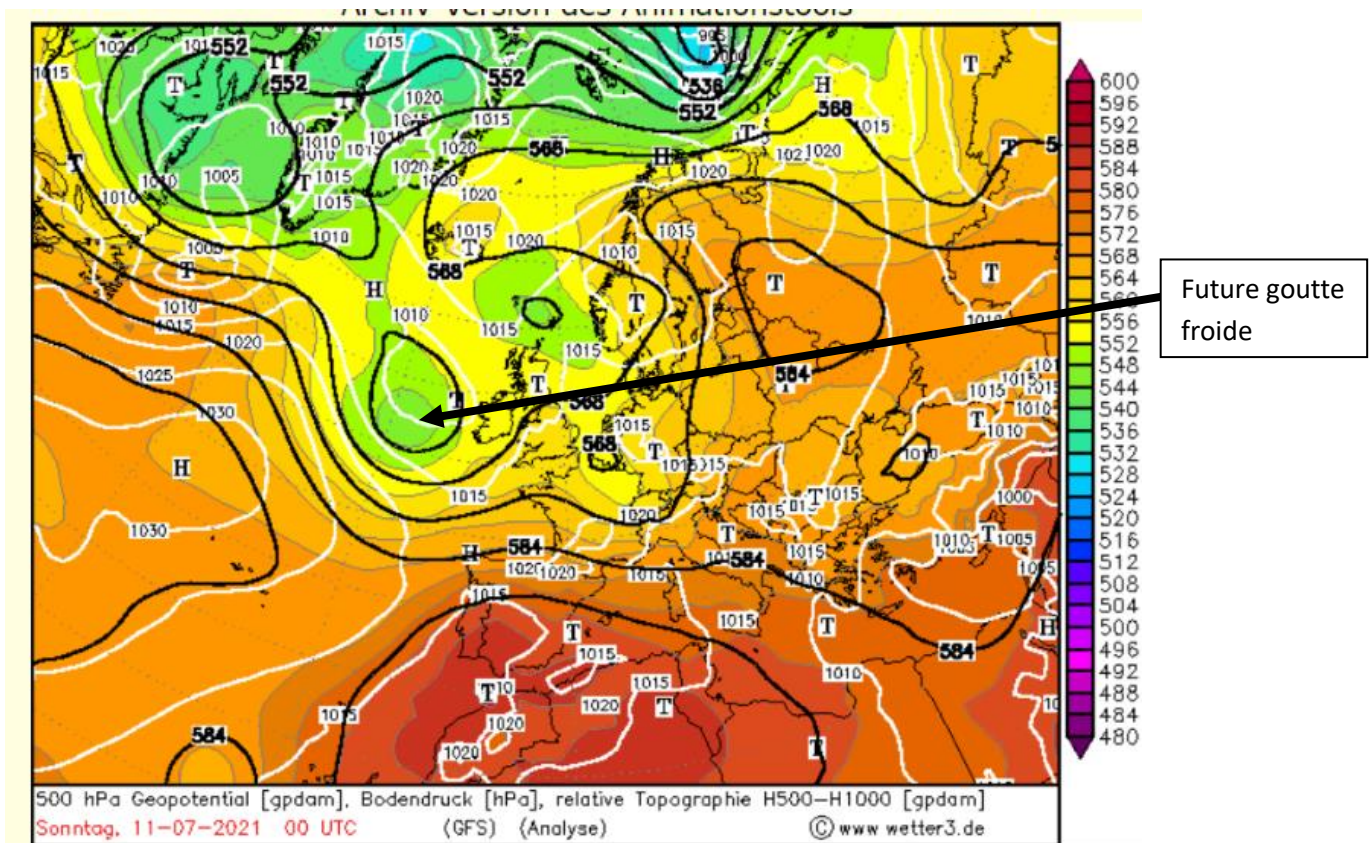


Figure 58 : géopotentielle 500 hPa, le 11 juillet à minuit (UTC) : détachement de la goutte froide. 500 hPa, Bodendruck Re top sur le site Wetter3.de (2022). Echelle inconnue.

³² Altitude à une pression atmosphérique donnée (ici, 500 hPa)

³³ Une isohypse est une ligne d'égalité altitude géopotentielle.

Cette goutte froide est une masse d'air froide qui a pu s'échapper de la zone polaire grâce à l'ondulation du Jet Stream polaire³⁴ (aussi appelées ondes de Rossby), et à descendre vers des latitudes plus basses (Hufty, 2001).

L'onde à l'origine de cette goutte froide est visible sur le géopotential à 300 hPa (figure 59), où les vitesses de vent sont représentées par une palette de couleur. A ce niveau de pression, on se situe au niveau de la tropopause³⁵, c'est-à-dire à une altitude supérieure à 10km. C'est à cet altitude que le jet Stream souffle (Hufty, 2001).

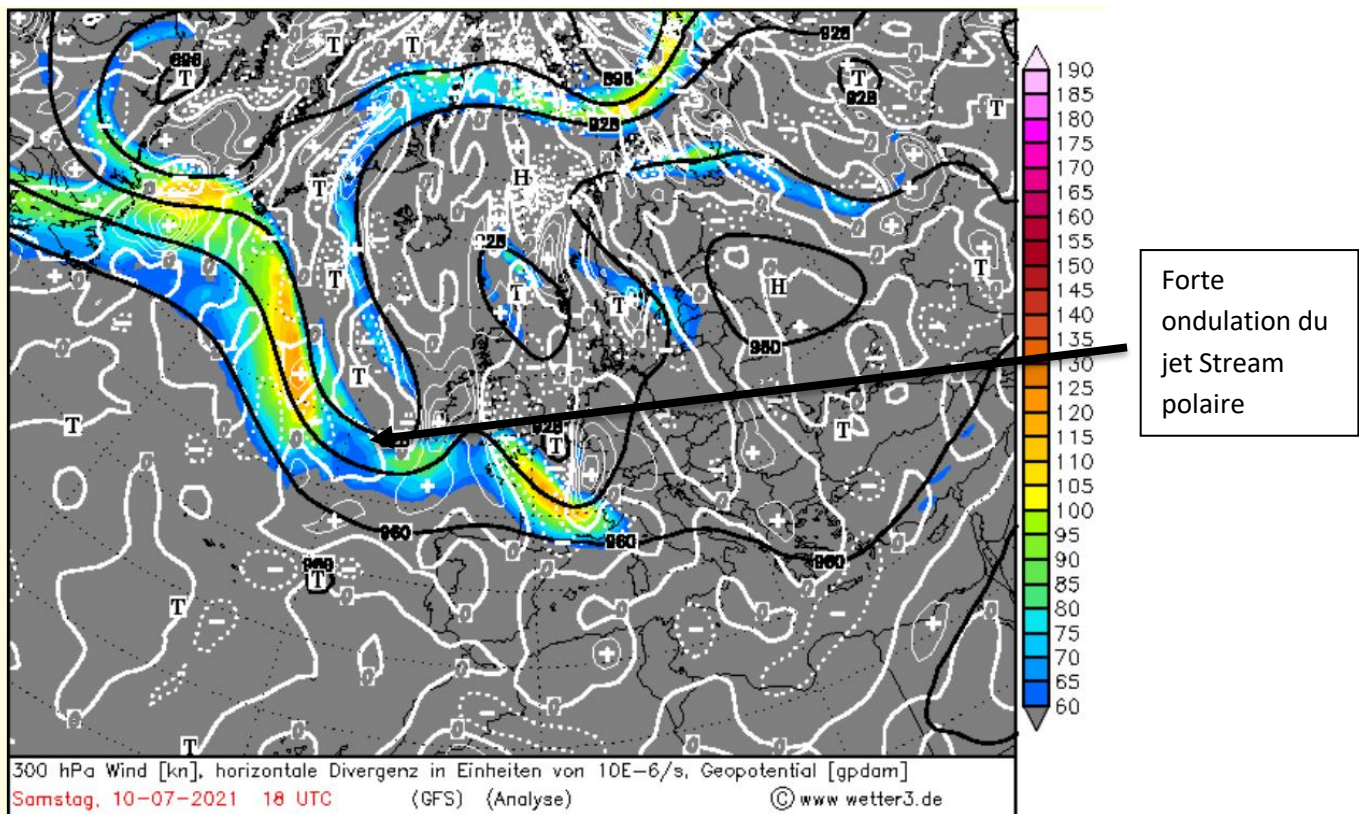


Figure 59 : géopotential 300 hPa, le 10 juillet à 18h00 (UTC) : détachement de la goutte froide. 300 hPa wind, Divergenz sur le site Wetter3.de (2022). Echelle inconnue.

Les gouttes froides sont des zones de très forte instabilité, caractérisées par des mouvements d'ascendance qui favorisent le développement de nuages et de précipitations. De plus, conformément à ce que nous allons voir plus loin, elles sont propices aux situations de blocages atmosphériques (Hufty, 2001).

La goutte froide s'est déplacée et le 13 juillet, elle se situait aux abords de la Belgique, qui subissait alors son influence. Petit à petit, la goutte froide s'est ensuite réchauffée mais est restée une petite dépression locale (figure 60). Tout le long de l'épisode, le centre dépressionnaire était situé légèrement au Sud de la Belgique. Notons que l'effet de ces conditions instables ont pu être amplifiées par le relief de la zone.

³⁴ Rapide courant d'air (plus de 100km/h) qui sépare les masses d'air polaires des masses d'air plus chaudes.

³⁵ Limite entre la troposphère et la stratosphère.

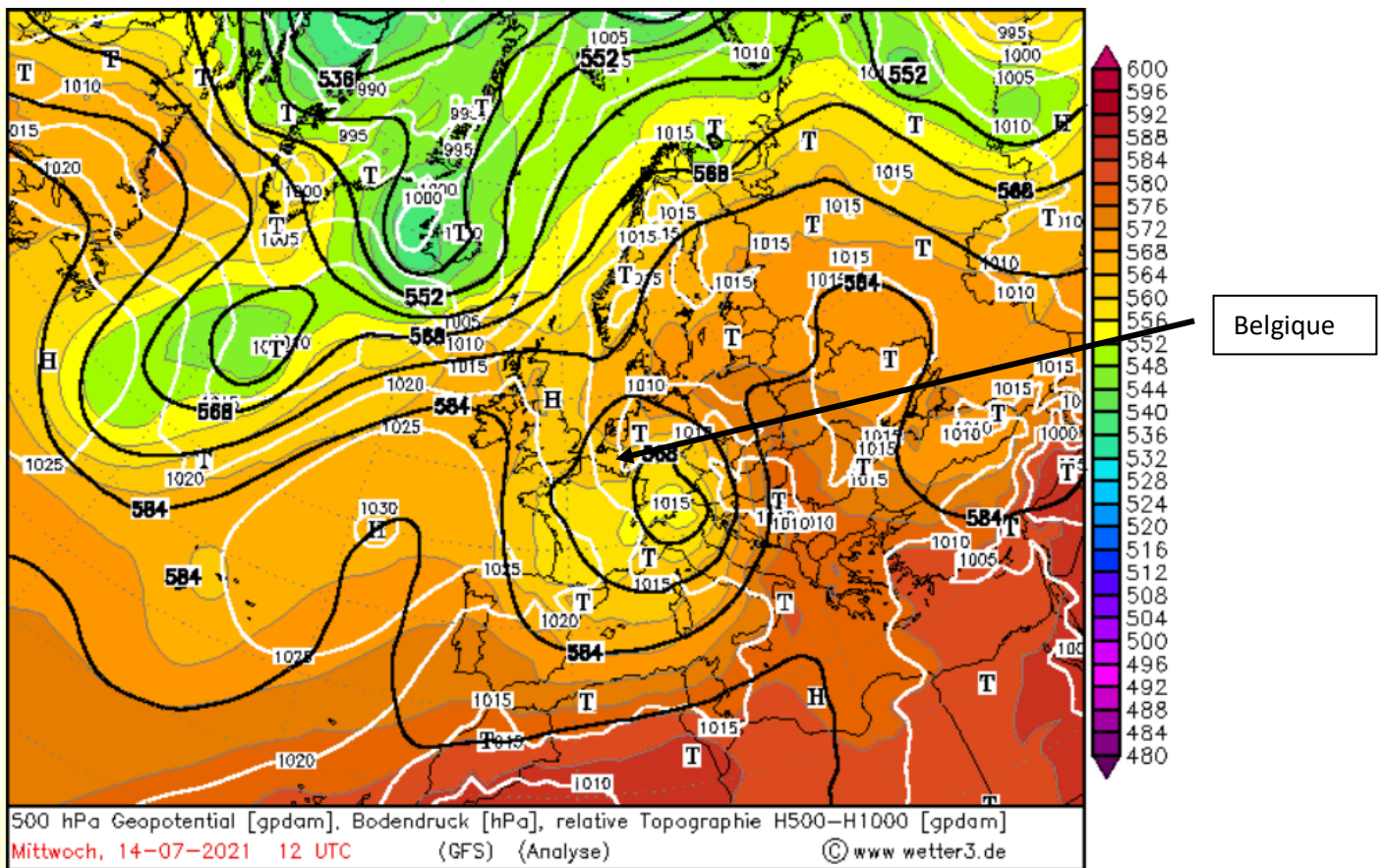


Figure 60 : géopotentiel 500 hPa, le 11 juillet à midi (UTC) : dépression qui influence la Belgique. 500 hPa, Bodendruck Re top sur le site Wetter3.de (2022). Echelle inconnue

J’ai ensuite utilisé le géopotentiel à 850 Hectopascal pour déterminer les différents mouvements de masse d’air, notamment les fronts. Sur ce géopotentiel, on peut visualiser la température du thermomètre mouillé³⁶ à 850 hPa (lignes noires) ainsi que la pression atmosphérique au sol (lignes blanches). Ce géopotentiel équivaut à une altitude approximative de 1500 m, soit légèrement plus haute que la couche limite atmosphérique. Cette dernière correspond à la partie la plus basse de la troposphère, directement influencée par la surface terrestre. Elle se confond même généralement³⁷ avec la « connective mixing layer », c’est-à-dire que tous les gaz y sont mélangés. Cet effet de « mixing » freine la compréhension des mouvements atmosphériques, c’est pourquoi on tente de les détecter à une altitude plus élevée (à 850 hPa). De plus, j’ai utilisé des cartes synoptiques, qui permettent d’aiguiller ainsi que de confirmer les observations sur le géopotentiel 850 (Hufty, 2001).

Dès le matin du 8 juillet (figure 61 et 62), on peut voir le front chaud, suivi du front froid (sous forme d’une cyclogenèse) qui seront responsables des inondations en Belgique. Ils se déplacent sur l’océan Atlantique, en direction de l’Europe.

³⁶ Température de l’air si on l’amène à une pression de 1000 hPa, selon la courbe de la température pseudo-adiabatique.

³⁷ Quelques exceptions comme la nuit lors des conditions anticycloniques, où se forme une couche résiduelle au sein de la couche limite.

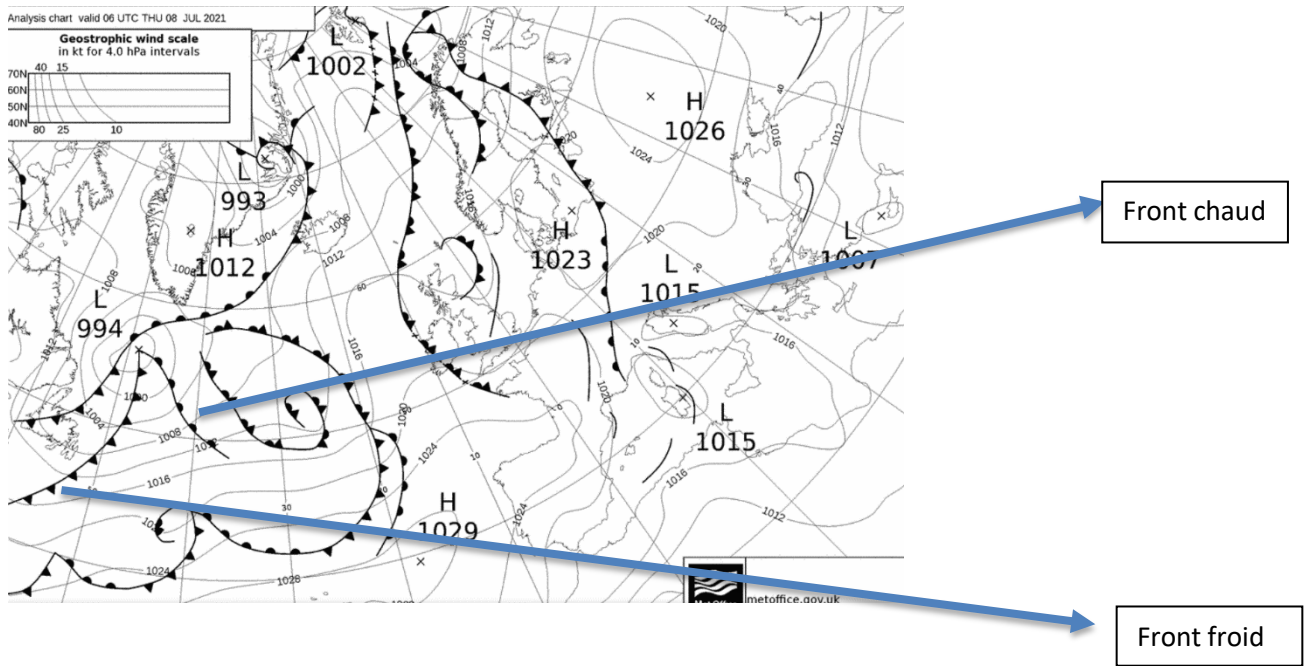


Figure 61 : Carte synoptique, le 8 juillet à 6h00 (UTC). Echelle inconnue (Wetter3, 2022)

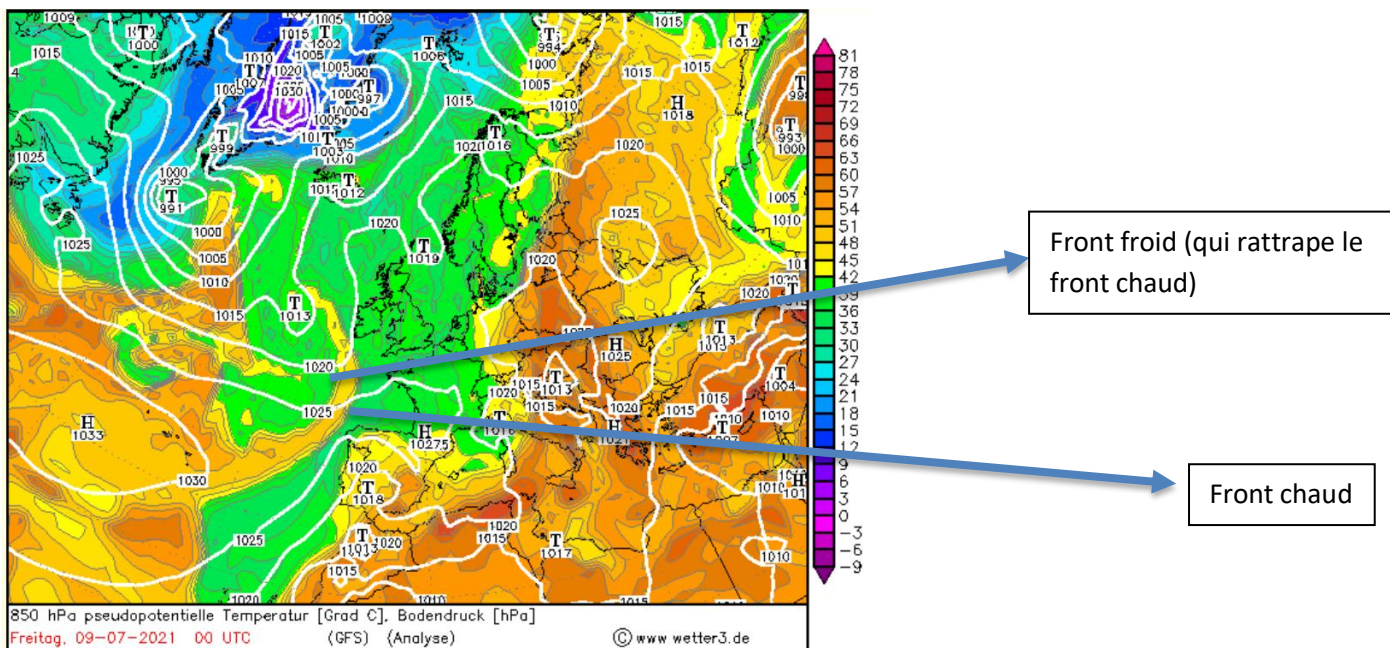


Figure 62 : Géopotentiel 850 hPa, le 9 juillet à minuit (UTC).
850 hPa, Aequiv.pot.Temperatur sur le site Wetter3.de (2022). Echelle inconnue

Le 11 juillet en fin de journée, le front froid (toujours plus rapide), a définitivement rattrapé le front chaud ce qui a produit une occlusion. On peut constater l'évolution grâce aux figures 63 et 64.

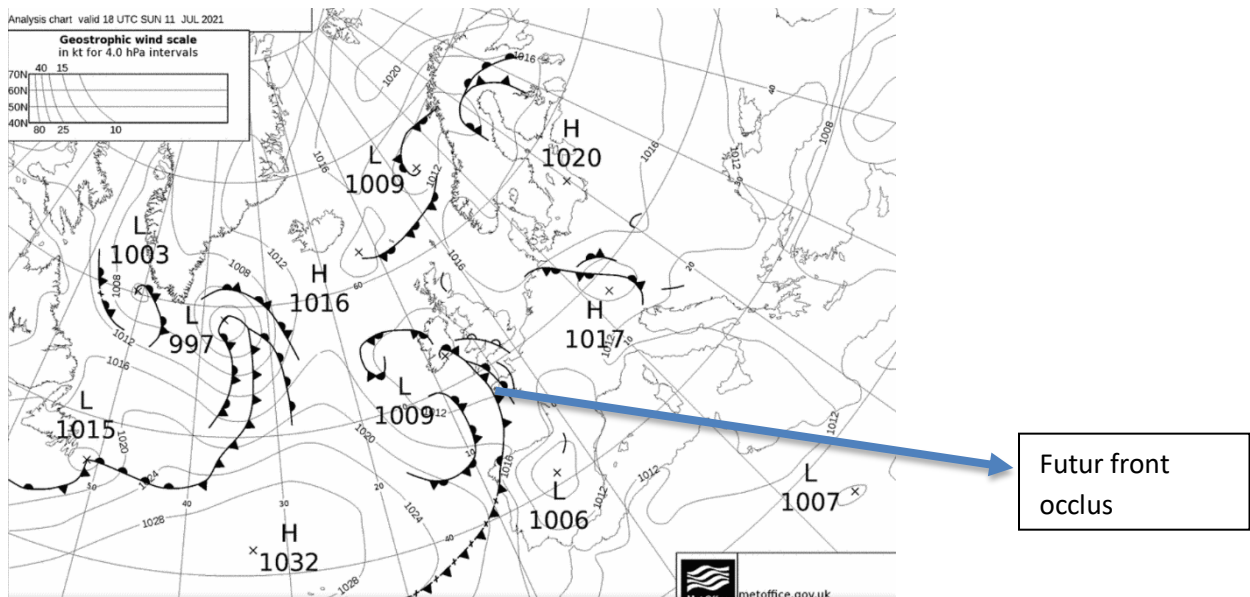


Figure 63 : Carte synoptique, le 11 juillet à 18h00 (UTC). Echelle inconnue (Wetter3, 2022).

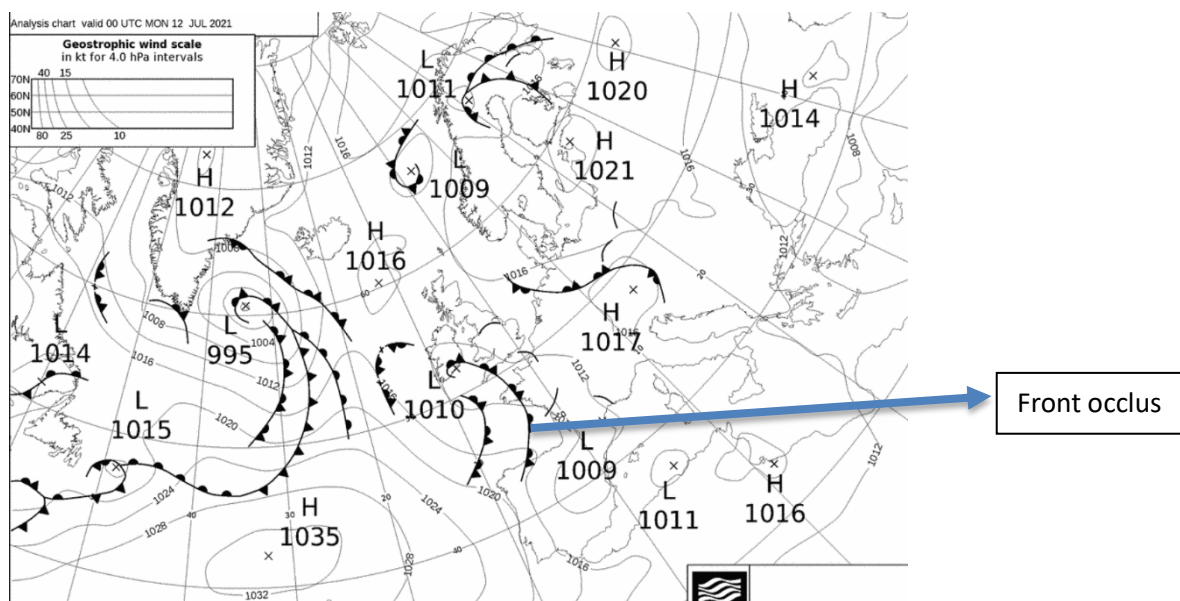


Figure 64 : Carte synoptique, le 12 juillet à minuit (UTC). Echelle inconnue (Wetter3, 2022).

Dès le lundi 12 juillet à minuit (UTC), tous les modèles s'accordent à prédire un événement de précipitations exceptionnelles sur la Belgique. Le 13 juillet, le front occlus est arrivé au-dessus de la Belgique pour y rester (figure 65). Comme les fronts occlus correspondent à la combinaison d'un front froid et d'un front chaud, ils contiennent les caractéristiques des deux types de fronts. Ainsi, ils amènent des nuages cumuliformes (caractéristiques des fronts froids) et stratiformes (caractéristiques des fronts chauds), c'est-à-dire qu'il peut y avoir à la fois de la pluie et des averses.

C'est donc ce qu'il s'est produit durant cet épisode d'inondation. De plus, le front occlus a été parfois accompagné de lignes de convergences, qui sont définis comme étant des petits fronts fréquents en été, qui se produisent lors de la collision entre des vents locaux (Parlement de Wallonie, 2021 ; Hufty, 2001).

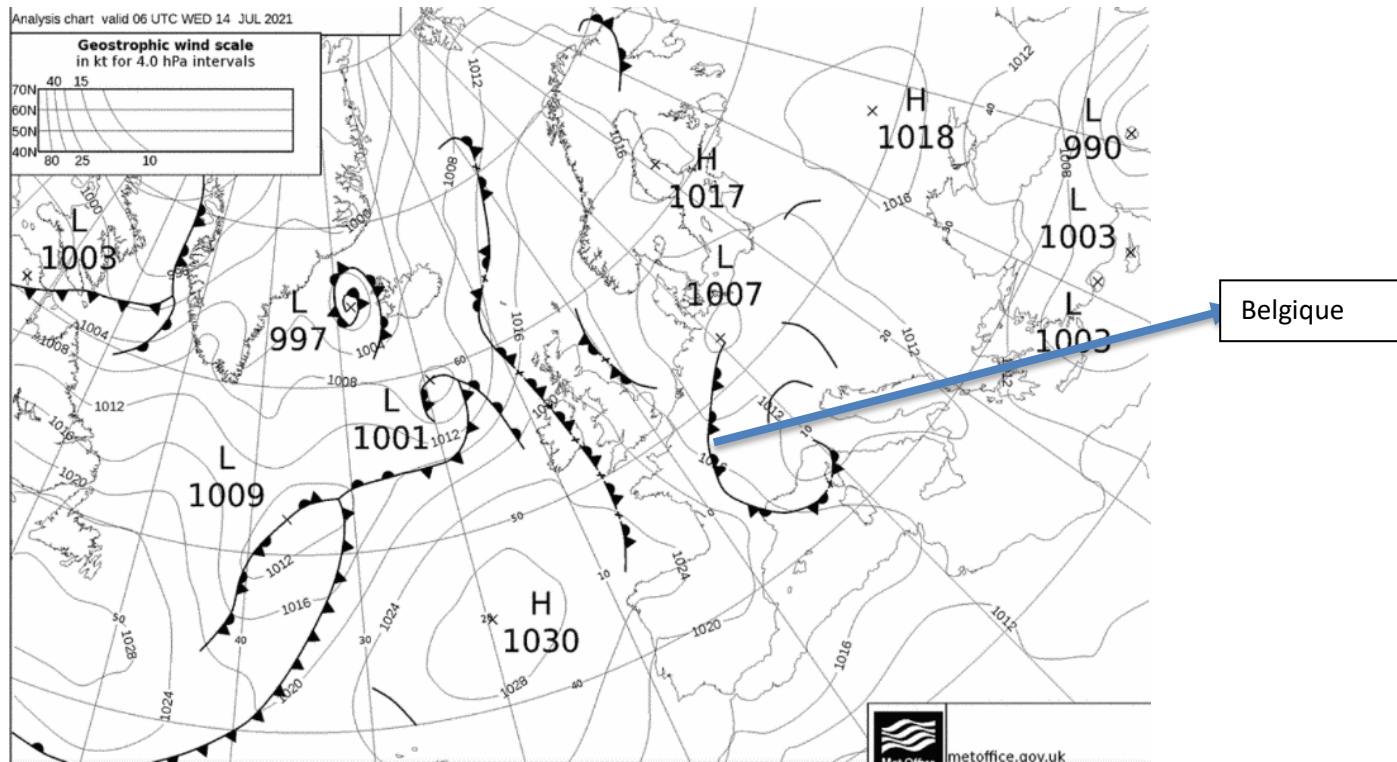


Figure 65 : Carte synoptique, le 14 juillet à 6h00 (UTC) : situation atmosphérique durant les inondations

Le front étant resté sur la même zone pendant plusieurs jours (stationnaire), on peut qualifier cette situation de « blocage atmosphérique », c'est-à-dire que la circulation atmosphérique est ralentie voire interrompue. Comme la dépression provenait d'une goutte froide, le blocage est qualifié de « dépression coupée ». Je pense que c'est un blocage de type « oméga » (Hufty, 2001 ; IRM, 2022).

Le dernier géopotential qui sera analysé est le géopotential à 700 hPa. Il se situe aux alentours de 3000 mètres d'altitude et permet de visualiser l'humidité relative. Ce paramètre climatique se mesure en pourcentage et correspond au rapport entre l'humidité spécifique³⁸ et l'humidité spécifique saturée³⁹. Ainsi, plus l'humidité relative est élevée, plus le risque de précipitations et leurs intensités est élevée (Hufty, 2001).

Du 12 au 14 juillet (figure 66), l'humidité relative a été supérieure à 90% et le 15 juillet, elle était encore très élevée (70-80%). Cela est logique vu les fortes précipitations qui se sont produites ces jours-là.

³⁸ Masse de vapeur d'eau par unité de masse d'air totale.

³⁹ Masse de vapeur d'eau par unité de masse d'air totale, si la vapeur d'eau était en équilibre thermodynamique avec l'eau liquide.

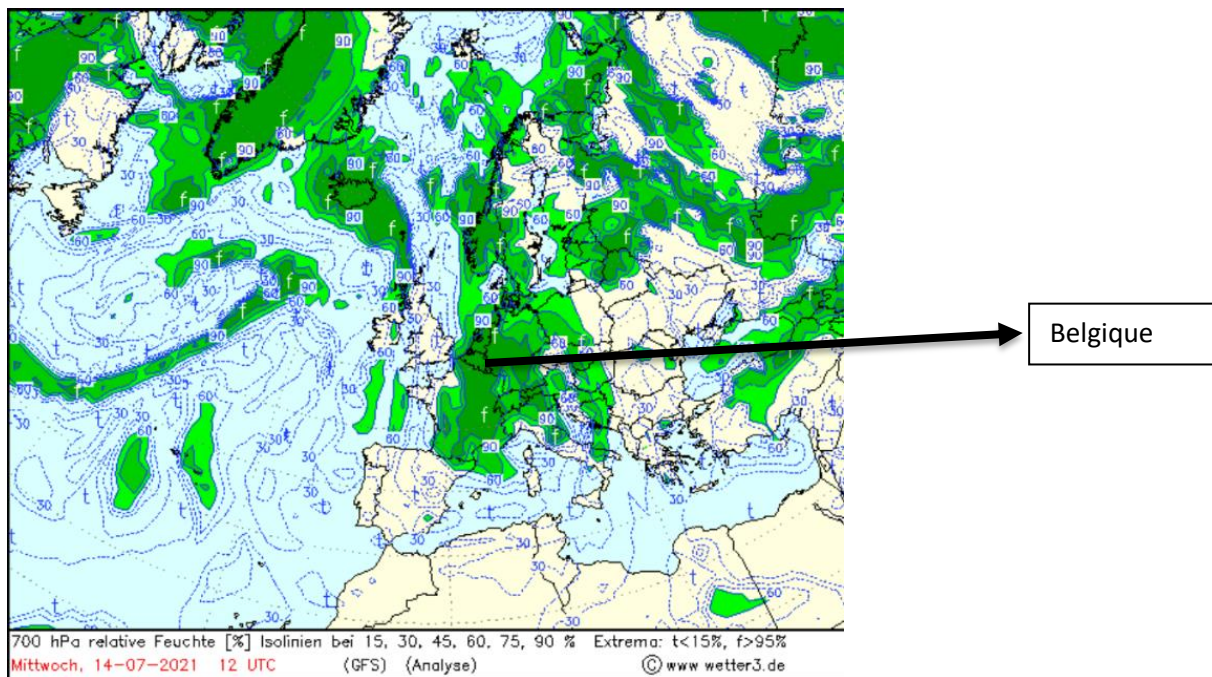


Figure 66 : Géopotential à 700 hPa, le 14 juillet à midi (UTC)
700hPa, relative fleuche sur le site wetter3.de (2022). Échelle inconnue.

4.2.2. Modélisation MAR

D'une manière générale, la quantité totale de précipitation qui est tombée durant les inondations sur la Province de Liège a été correctement modélisée. En effet, si on considère la moyenne des 14 stations, le modèle prévoyait 156,275 mm et les pluviomètres ont récolté 156,15 mm, soit un biais de 0,125mm. Cependant, lorsqu'on considère les variations temporelles et spatiales, on peut voir que le modèle s'écarte de la réalité. Je vais tenter d'analyser ces différences à la lumière des informations obtenues plus tôt. Notons que j'ai également considéré le 16 juillet pour voir comment le modèle avait prévu l'arrêt des précipitations.

Concernant l'évolution temporelle, le 13 juillet 2021 (et dans une moindre mesure le 15 juillet) a été généralement sous-estimé par le modèle MAR alors que le 14 et le 16 juillet ont davantage été surestimés. Cela n'est pas attendu car nous avons dit que les précipitations abondantes génèrent généralement un biais négatif assez fort, d'autant plus que les précipitations les plus fortes se sont produites le 14 juillet (92,28mm en moyenne), ce qui devrait conduire au jour le plus sous-estimé et non à une surestimation.

Sur la figure 67, les points relatifs aux trois jours de l'épisode ont été ajoutés sur la régression linéaire qui a été faite plus tôt dans le travail (page 63 et annexe 46), dans le cadre de l'influence de l'intensité des précipitations sur le biais. Le 13 juillet suit la tendance, puis il a étrangement surestimé le 14 juillet, pour ensuite avoir une sous-estimation peu importante (au vu de quantité de précipitations) le 15 juillet 2021). Enfin, le 16 juillet, le modèle a également surestimé la situation.

Ainsi, c'est surtout le 14 juillet qui s'éloigne de la tendance attendue, mais il a un impact important sur la tendance totale de l'épisode.

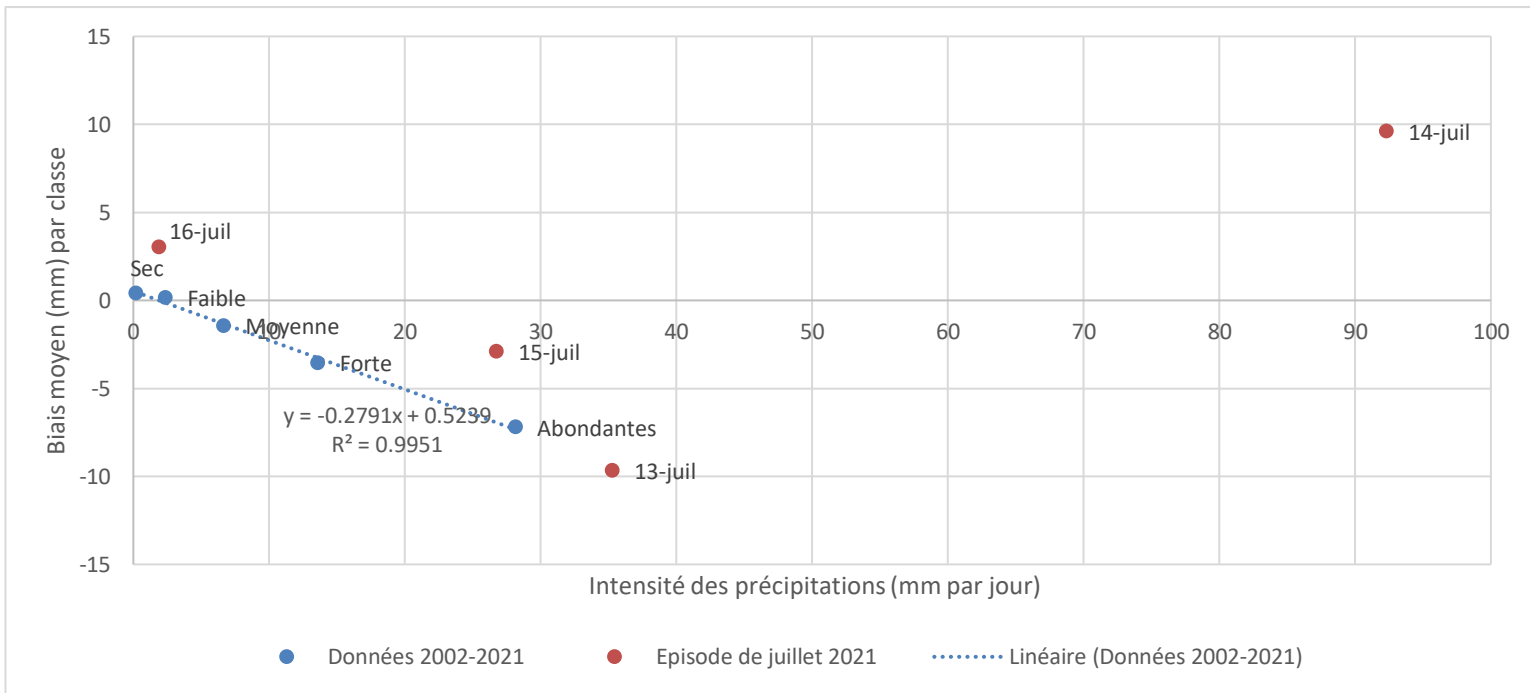


Figure 67 : Relation entre la quantité de précipitation et le biais, accompagnées des valeurs pour le 13-15 juillet 2021

Concernant la RMS, elle vaut 19,02 mm pour les 3 jours, ce qui n'est pas surprenant vu qu'elle était de l'ordre de 15 millimètres pour les précipitations abondantes depuis 2002. De même, j'ai ajouté l'épisode de juillet 2021 à la régression linéaire qui avait été réalisée pour la RMS (page 62 et annexe 47). Le résultat est présenté sur la figure 68. On peut voir que le modèle a globalement mieux prédit les précipitations que ce que la relation linéaire prédisait.

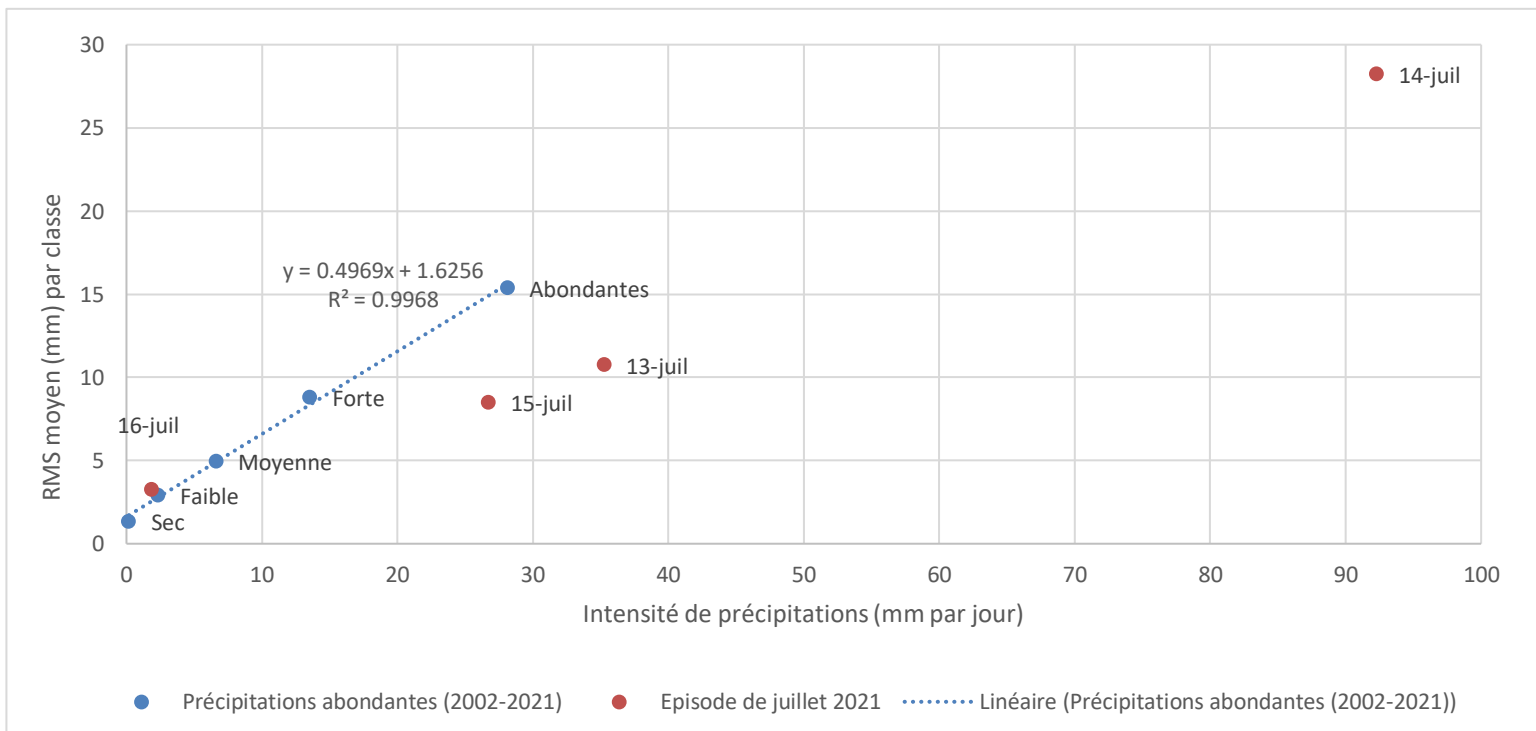


Figure 68 : Relation entre la quantité de précipitation et la RMS, accompagnées des valeurs pour le 13-15 juillet 2021

Concernant la variation spatiale, l'épisode est résumé sur la figure 69. Notons qu'on peut voir que la différence entre les stations se marque davantage sur le 14 juillet, qui, comme on l'a dit plus haut, est le jour qui a reçu le plus de précipitations.

Sur cette figure, j'ai classé les stations en fonction de leur régime pluviométrique, avec les stations qui reçoivent généralement le moins de précipitations à gauche et celles qui en reçoivent le plus à droite.

On peut effectivement voir une relation entre le régime pluviométrique et le biais lors de l'épisode de juillet 2021. En effet, si on considère la classification sur base des cumuls annuels, le groupe 2 (Awans et Lanaye) est celui qui a le biais le plus positif, suivi du groupe 1 (de Gemmenich à Battice). Enfin, les stations groupe 3 ont obtenu des biais négatifs, à l'exception de la station de Robertville.

Notons que deux autres stations sont à mentionner en raison de leurs biais (bien que négatifs) particulièrement importants (par rapport à leur régime pluviométrique) : Jalhay et dans une moindre mesure, Spa.

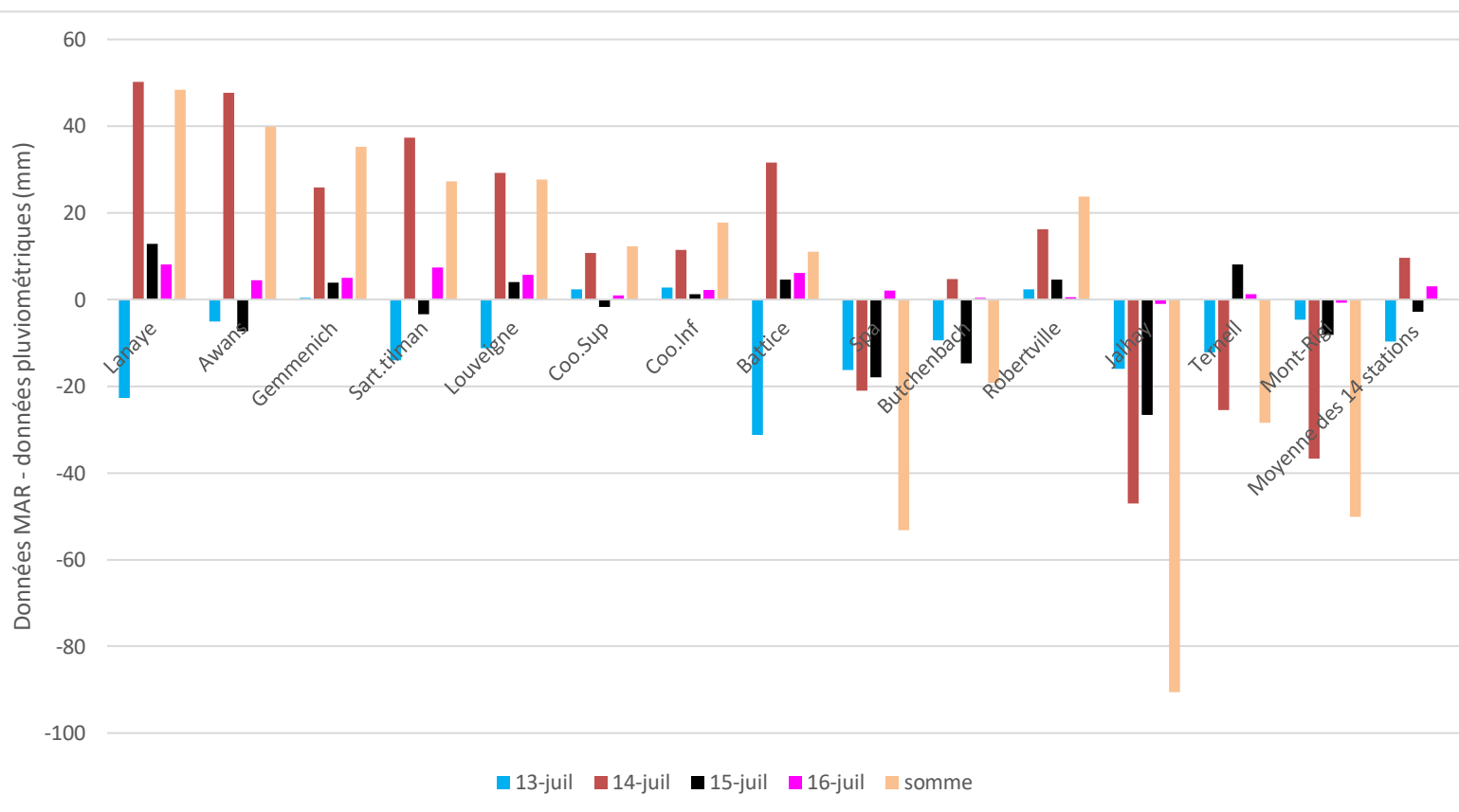


Figure 69 : différence entre les hauteurs de précipitations simulées par MAR et celles récoltées par les pluviomètres

La régression entre la quantité moyenne de précipitations annuelle et le biais cumulé lors de cet épisode est disponible en annexe (annexe 48), on y voit effectivement 3 stations qui s'écartent de la tendance robuste : Robertville, Jalhay et Spa.

Une autre explication de la répartition spatiale pourrait être la quantité reçue lors de l'épisode de juillet 2021. La figure 70 représente les cumuls de précipitations (classés par ordre croissant) qui ont été enregistrées lors des inondations ainsi que ceux qui ont été modélisés par MAR.

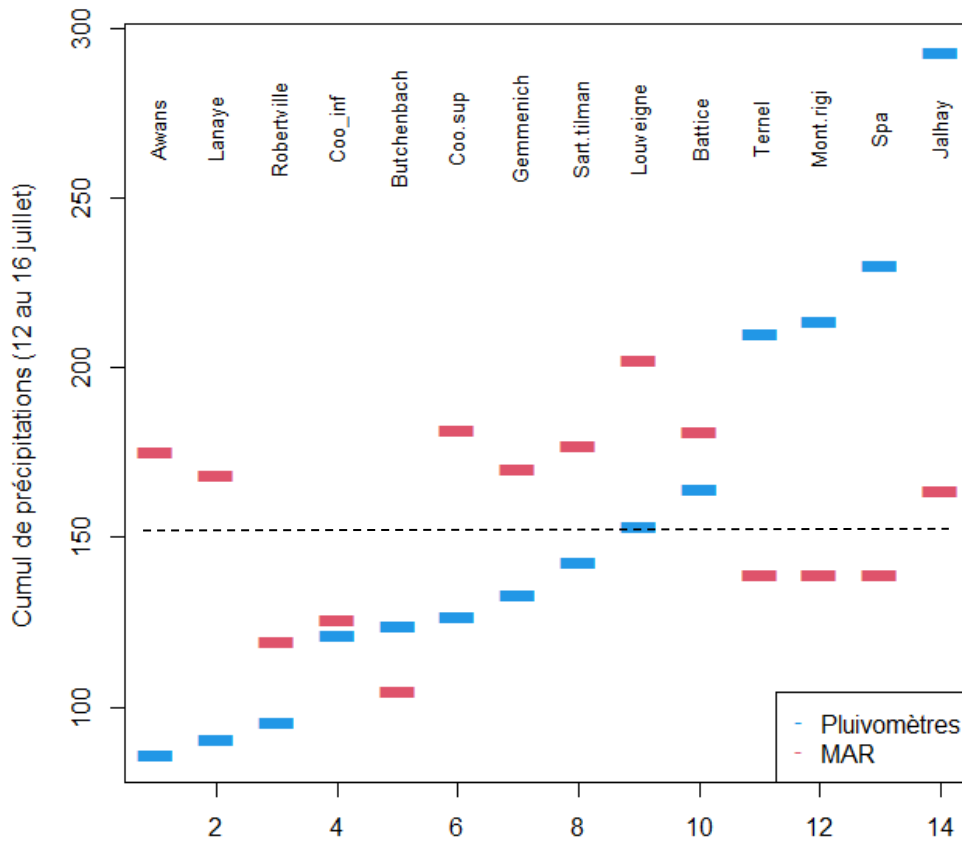


Figure 70 : cumuls de précipitations par station entre le 13 et le 16 juillet 2021 compris. Ligne en pointillée = seuil (aux alentours de 160-200mm)

L'interprétation de cette théorie est similaire à celle reposant sur les régimes pluviométriques : le modèle MAR semble plus constant que les pluviomètres car il surestime davantage ceux qui ont reçu le moins de précipitations et sous-estime ceux qui en ont reçu particulièrement beaucoup. En effet, il existe un seuil (aux alentours de 160-200 mm pour les données pluviométriques) au-dessous duquel toutes les stations sont surestimées par MAR et au-delà duquel toutes les stations sont sous-estimées. La seule exception est Butgenbach, qui est sous-estimée par MAR alors qu'elle se situe sous le seuil.

La régression entre la quantité totale de précipitations tombée lors des inondations de juillet et le biais cumulé lors de l'épisode du 13 au 16 juillet (annexe 49), montre en effet une seule station qui s'écarte de la tendance claire : Butgenbach. Ainsi, la station de Robertville n'apparaît plus comme anormale, étant donné la faible quantité de précipitations qu'elle a reçue et les biais très importants de Jalhay et de Spa s'expliqueraient par la quantité énorme de précipitations reçue (292,9 mm pour Jalhay et 230,2 mm pour Spa).

Enfin, une troisième théorie permettant d'expliquer la répartition spatiale serait de penser qu'on retrouverait le même biais lors des inondations de juillet que celui qui se produit généralement lors des précipitations abondantes. La relation entre les deux biais est présentée à la figure 71. On peut voir que la relation entre les deux variables existe (même si elle est moins nette que pour les deux autres théories) mais que les biais étaient de manière générale nettement plus proche du positif que pour les précipitations abondantes. Jalhay semble une nouvelle fois s'écarter de la tendance.

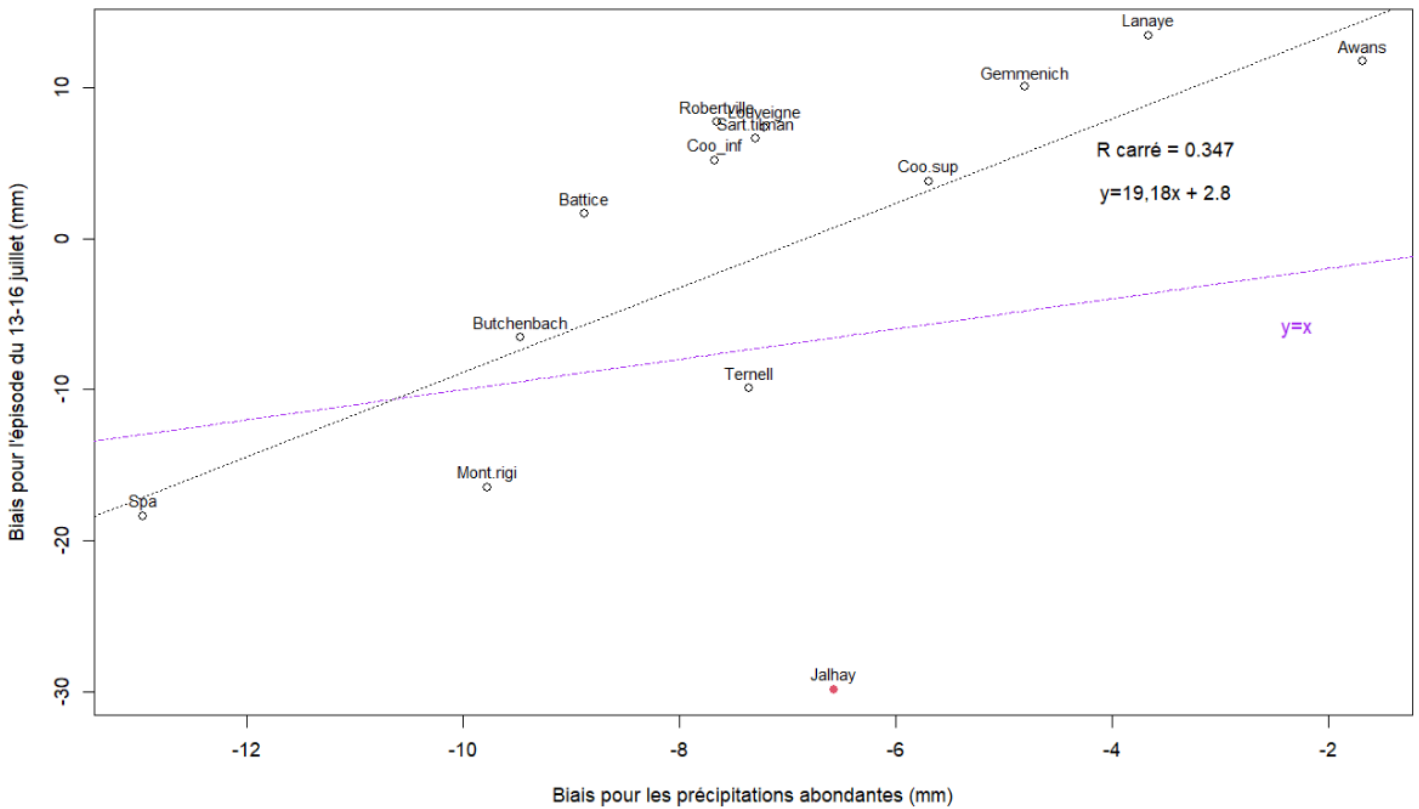


Figure 71 : relation entre le biais des précipitations abondantes (2002-2021) et le biais pour le 13-16 juillet 2021. Point rouge = station qui s'écartere de la relation
Ligne en pointillée noire = droite de régression ; ligne en pointillé mauve = droite d'égalité (si le biais pour l'épisode était le même que pour le biais pour les précipitations abondantes).

Notons qu'il ne semble pas y avoir de lien spatial avec la RMS, sûrement en raison du biais trop peu négatif pour l'ensemble des 14 stations (annexe 50).

5. Conclusion et perspectives

A l'issue de ce travail, une série de résultats peuvent être énoncés. Les plus marquants ont été repris ci-dessous :

- **Résultat 1** : Le modèle MAR simule mieux les précipitations à l'échelle journalières qu'à l'échelle annuelle.
- **Résultat 2** : de 2002 à 2017 on observe un biais important tant à l'échelle journalière qu'à l'échelle annuelle alors que le biais est nettement plus proche de 0 pour chacune des années de la période 2018-2021.
- **Résultat 3** : Jalhay est une station instable, tant pour l'analyse des pluviomètres que pour la simulation.
- **Résultat 4** : La qualité des pluviomètres semble suffisante pour ne pas avoir d'impact sur la qualité des données simulées, à l'exception éventuelle de Jalhay.
- **Résultat 5** : Plus la quantité de précipitations moyennes (et donc le relief) est élevée, moins bien le modèle MAR simule les précipitations.
- **Résultat 6** : Plus la quantité de précipitations moyennes (et donc le relief) est élevée, plus le biais est négatif.
- **Résultat 7** : Plus les précipitations sont intenses, plus le biais est négatif. Les différences topo-climatologiques sont donc masquées (peut être à cause d'un lissage topographique)
- **Résultat 8** : Plus les précipitations sont intenses, plus la RMS est élevée.
- **Résultat 9** : Plus les précipitations sont intenses, plus la capacité de modélisation est variable spatialement.

Lors de l'épisode de précipitations intenses de juillet 2021, la RMS était faible et le biais peu négatif par rapport à ce qui aurait pu être attendu (au vu de la quantité de précipitations). Les analyses ont même montré un biais positif pour le 14 juillet.

En revanche, en ce qui concerne la répartition spatiale, les tendances relatives ont été confirmées. En effet, le biais semblait plus négatif pour les stations qui relèvent des précipitations importantes en moyenne (résultat 6), et pour les stations qui ont enregistré un cumul important lors des trois jours de l'épisode (résultat 7). La différence de biais (et de RMS) entre les stations était très importante, surtout le 14 juillet, où les précipitations ont été les plus intenses (résultat 9). Enfin, Jalhay a montré une quantité très importante de précipitations (instabilité au niveau du pluviomètre, résultat 3), qui a été assez mal modélisée par MAR. Le résultat 8 quant à lui n'a pas pu être confirmé.

Concernant les perspectives, beaucoup de pistes pourraient permettre d'affiner la recherche. Tout d'abord, d'autres facteurs explicatifs pourraient être analysés, afin d'évaluer s'ils ont ou non un impact sur la qualité de la modélisation. Je pense plus particulièrement au taux d'infiltration, au taux d'évaporation, au taux d'urbanisation, à l'écart type des hauteurs de précipitations, à la variabilité intra et inter annuelle, à la saison, à la valeur de la NAO, au rayonnement solaire.

Ensuite, l'interdépendance entre les facteurs abordés peuvent être développés. Par exemple, il serait possible de déterminer l'évolution de l'impact du régime pluviométrique ou de la qualité des pluviomètres en fonction de l'intensité des précipitations.

Pour répondre à la question posée dans le titre et au début de l'introduction, le modèle MAR modélise assez bien les précipitations, mais dans certaines circonstances spatiales et temporelle qui ont été rappelée au début de cette conclusion, sa capacité de modélisation est plus faible. Ainsi, le modèle MAR est promoteur pour la prévision (à court et long termes) mais il serait utile de l'améliorer, notamment en corrigeant certains biais propres à certaines situations. J'espère que ce travail pourra y contribuer.

6. Bibliographie

Alain W. (2022). *Wallonie, conserver la mémoire des inondations du mois de juillet* [photo de titre]. RTC Liège. https://www.rtc.be/article/info/divers/wallonie-conserver-la-memoire-des-inondations-du-mois-de-juillet_1511265_325.html . Consulté le 18 aout 2022.

Arias, P.A., N. Bellouin, E. Coppola, R.G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M.D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P.W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R.P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J.G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W.D. Collins, S.L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F.J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F.J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J.S. Fuglestedt, J.C. Fyfe, N.P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J.M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H.T. Hewitt, P. Hope, A.S. Islam, C. Jones, D.S. Kaufman, R.E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J.-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T.K. Maycock, M. Meinshausen, S.-K. Min, P.M.S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A.C. Ruane, L. Ruiz, J.-B. Sallée, B.H. Samset, S. Sathyendranath, S.I. Seneviratne, A.A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A.-M. Tréguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang & K. Zickfeld (2021). Technical Summary. *In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144. doi:10.1017/9781009157896.002.

Barry, R.G., Chorley, R.J. (1993). *Atmosphere, Weather & Climate*. 6e éd. New York: Routledge, 392 p.

Berckmans, J., De Cruz, L., De Troch, R., Duchêne, F., Hamdi, R., Termonia, P., Van de Vyver, H. & Van Schaebroeck, B. (2020). Modélisation climatique régionale. *In IRM (2020), rapport climatique 2020 : de l'information aux services climatiques*. Uccle : Gellens, 6-33. <https://climat.be/doc/kmi-irm-rapport-2020-complet-fr.pdf> . Consulté le 8 aout 2022.

Bertrand, C., Journée, M. & Tricot C. (2020). L'évolution du climat en Belgique. *In IRM (2020), rapport climatique 2020 : de l'information aux services climatiques*. Uccle : Gellens, 6-33. <https://climat.be/doc/kmi-irm-rapport-2020-complet-fr.pdf> . Consulté le 8 aout 2022.

Epicum M., Nouri M., and Demoulin A. (2018) The Climate of Belgium and Luxembourg. Landscapes and landforms of Belgium and Luxembourg, Demoulin A., Ed., Springer Berlin Heidelberg, Cham, chap. The climat, 35 – 41, doi: 10.1007/978-3-319-58239-9_3.

Géoportail de la Wallonie (2015). *Relief de la Wallonie – Modèle numérique de terrain (MNT) 2013-2014*. Fédération Wallonie-Bruxelles. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/6029e738-f828-438b-b10a-85e67f77af92.html> . Consulté le 20 juillet 2021.

Hufty, A. (2001). *Introduction à la climatologie*. Bruxelles : Edition De Boeck université, 542 p.

IRM (2022). *Atlas climatique : nombre de jours de précipitations (1mm/jour)*. IRM (2022). <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/atlas-climatique/cartes-climatiques/precipitations/quantites-de-precipitations/annuel> . Consulté le 8 aout 2022.

IRM (2022). *Atlas climatique : nombre de jours de précipitations (10mm/jour)*. IRM (2022). <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/atlas-climatique/cartes-climatiques/precipitations/quantites-de-precipitations/annuel> . Consulté le 8 aout 2022.

IRM (2022). *Atlas climatique : précipitations, à propos*. IRM (2022). <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/atlas-climatique/precipitations/a-propos>. Consulté le 10 aout 2022.

IRM (2022). *Atlas climatique : quantité de précipitations annuelles*. IRM (2022). <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/atlas-climatique/cartes-climatiques/precipitations/quantites-de-precipitations/annuel> . Consulté le 13 juillet 2022.

IRM (2022). *Paramètres climatiques : le vent*. IRM (2022). <https://www.meteo.be/fr/unpublish/climat-general-en-belgique/parametres#:~:text=Le%20vent,%C3%A0%20l'int%C3%A9rieur%20du%20pays> . Consulté le 15 juillet 2022.

IRM (2022). *Actualité : ce que l'on sait sur les précipitations exceptionnelles des 14 et 15 juillet 2021*. IRM (2022). <https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/ce-que-lon-sait-sur-les-pluies-exceptionnelles-des-14-et-15-juillet-2021> . Consulté le 3 aout 2022.

Kahraman, A., Kendon, E.J., Chan, S.C. & Fowler, H.J. (2021). Quasi-Stationary Intense Rainstorms Spread Across Europe Under Climate Change. *Geophysical Research Letters*, 13. 11 p. doi : <https://doi.org/10.1029/2020GL092361> .

Kouassi, A., Assamoi, P., Bigot, S., Diawara, A., Schayes, G., Yoroba, F., & Kouassi, B (2015). Etude du climat Ouest-africain à l'aide du modèle atmosphérique régional MAR. *Climatologie*, 7, 39 – 45. Doi : <https://doi.org/10.4267/climatologie.445> .

Kreienkamp F., Philip S.Y., Tradowsky J.S., Kew S.F., Lorenz, P., Arrighi, J., Belleflamme, A., Bettmann, T., Caluwaerts, S., Chan, S.C., Ciavarella, A., De Cruz, L., de Vries, H., Demuth, N., Ferrone, A., Fischer, E.M., Fowler, H.J., Goergen, K., Heinrich, D., Henrichs, Y., Lenderink, G., Kaspar, F., Nilson, E., Otto, F.E.L., Ragone, F., Seneviratne, S.I., Singh, S.I., Skålevåg, A., Termonia, P., Thalheimer, L., van Aalst, M., Van den Bergh, J., Van de Vyver, H., Vannitsem, S., Jan van Oldenborgh, G., Van Schaeybroeck, B., Vautard, R., Vonk, R. & Wanders, N. (2021). Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. *World weather attribution*. 51 p. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf> . Consulté le 9 aout 2022.

Openstreet map (2022). [Zone Liège]. <https://www.openstreetmap.org/#map=8/50.510/4.475>. Consulté le 5 juillet 2022.

Parlement de Wallonie [ParWal TV]. (2021, 16 septembre). *Réunion de commission du 16/09/2021 à 10:00* [Vidéo en ligne]. [Intervention de X. Fettweis]. Disponible à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=sNN1w1AkAhs&t=5551s> . Consulté le 13 mars 2022.

Petit, F. (1993). *Hydrographie et géomorphologie fluviale : première partie*. Liège : département de géographie physique de l'université de Liège, 136p.

SPW (2022). Direction générale opérationnelle de la Mobilité et des Voies hydrauliques : annuaires et statistiques [données des 14 pluviographes]. Service Public de Wallonie (SPW). <http://voieshydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr/hydro/Archive/annuaires/index.html> . Consulté le 13 mars 2022.

Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research*. 106 (D7). 7183 – 7192. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2000JD900719> .

Topographic-map (2022). *Cartes topographiques : Belgique*. <https://fr-be.topographic-map.com/maps/d4/Belgique/> consulté le 11 juillet 2022.

Valles, C. (2021). *D'où viennent les 5 nouveaux scénarios du Giec ?*. I4CE, Institute for climate economics. [D'où viennent les cinq nouveaux scénarios du GIEC ? - I4CE](https://www.i4ce.be/fr/actualites/d-où-viennent-les-cinq-nouveaux-scénarios-du-giec-?) . Consulté le 8 aout 2022.

Wetter3 (2022). *Standardkarteen (GFS) : tool 1*. [Archives du 8 au 16 juillet 2021]. <https://www.wetter3.de/> . Consulté le 16 aout 2022.

Willems P. (2013a) Multidecadal oscillatory behaviour of rainfall extremes in Europe. *Climate Change*, 120, 931 – 944, doi: 10.1007/s10584-013-0837-x.

Willems P. (2013b) Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology*, 496, 166 – 177, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.05.037.

Wyard, C. (2018). *Climate change in Belgium: recent and future evolution of global radiation and hydroclimatic conditions favouring floods using the regional climate model MAR*. Thèse de doctorat en sciences géographiques, Liège, Université de Liège, 214 p. <https://hdl.handle.net/2268/229180> . Consulté le 14 aout 2022.

Zuur, A.F., Ieno, E.N. & Smith, G.M. (2007). *Analysing Ecological data: statistic for biology and health*. New York: Springer, 686 p.

7. Annexes

Scénario	Narratif	Défi pour l'atténuation	Défi pour l'adaptation
SSP1 Développement durable	Fortes coopération internationale, priorité donnée au développement durable, amélioration des conditions de vie et préférences des consommateurs pour des biens et services respectueux de l'environnement, peu intensifs en ressources et en énergie.	Faible	Faible
SSP2 Poursuite des tendances	Les tendances sociales, économiques et technologiques actuelles se poursuivent, le développement et la croissance progressent de manière inégale selon les pays et les régions. Les institutions nationales et internationales œuvrent à la réalisation des objectifs de développement durable qui progresse lentement. L'environnement se dégrade malgré un développement moins intensif en ressources et en énergie.	Moyen	Moyen
SSP3 Rivalités régionales	Résurgence des nationalismes, développement économique lent, persistance des inégalités et des conflits régionaux. Les pays sont guidés par des préoccupations en matière de sécurité et de compétitivité. Ils se concentrent sur les problèmes nationaux voire régionaux et sur les enjeux de sécurité alimentaire et énergétique. Faible priorité internationale pour la protection de l'environnement, qui se dégrade fortement dans certaines régions.	Elevé	Elevé
SSP4 Inégalités	Développement marqué par de fortes inégalités entre et à l'intérieur des pays. Dégradation de la cohésion sociale et multiplication des conflits. Fossé croissant entre une élite connectée et mondialisée, responsable de la majorité des émissions de GES, et un ensemble fragmenté de populations à faible revenu, peu éduqué et vulnérable au changement climatique. Le secteur énergétique se diversifie entre sources d'énergie fortement carbonées et décarbonées. Les politiques environnementales se concentrent sur les enjeux locaux.	Faible	Elevé
SSP5 Développement conventionnel	Développement adossé à l'exploitation forte des énergies fossiles et marqué par des investissements élevés dans la santé, l'éducation et les nouvelles technologies. Adoption de modes de vie intensifs en ressources et en énergie à travers le monde. La croissance économique et le progrès technologique sont élevés. Les problèmes de pollution locale sont bien gérés et l'adaptation est facilitée notamment grâce au recul de la pauvreté.	Elevé	Faible

Sources : Riahi et al. (2017), O'Neill et al. (2015), Bauer et al. (2017)

Annexe 1 : descriptions des scénarii du sixième rapport du Giec (Vallet, 2021).

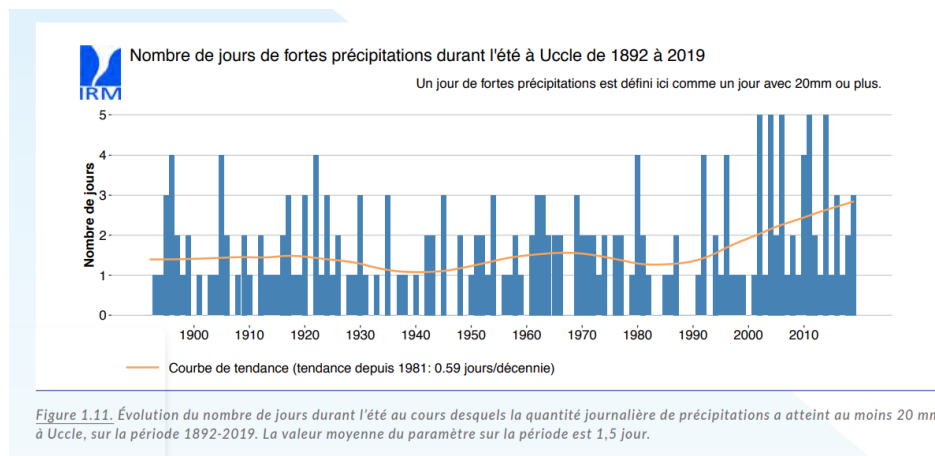


Figure 1.11. Évolution du nombre de jours durant l'été au cours desquels la quantité journalière de précipitations a atteint au moins 20 mm à Uccle, sur la période 1892-2019. La valeur moyenne du paramètre sur la période est 1,5 jour.

Annexe 2 : Nombre de jour avec des précipitations abondantes par année à Uccle et évolution (Bertrand et al, 2020).

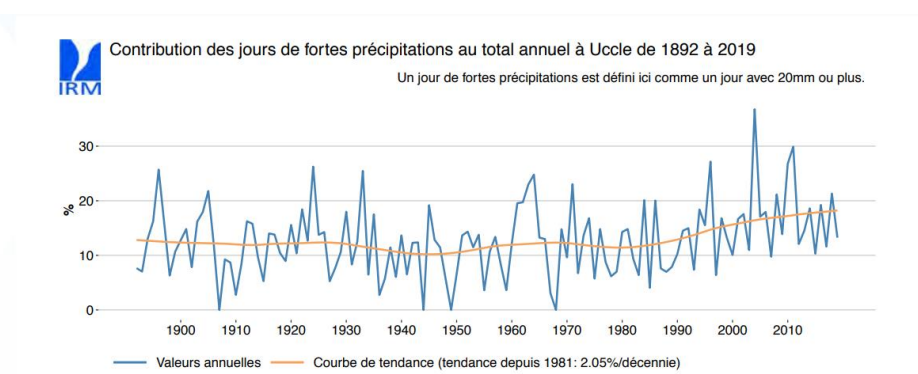


Figure 1.12. Évolution du pourcentage annuel du total des cumuls journaliers au moins égaux à 20 mm par rapport au total annuel des précipitations à Uccle, sur la période 1892-2019. La valeur moyenne du paramètre sur la période est 12,8%.

Annexe 3 : Part par de précipitations abondantes par rapport au cumul total annuel (Bertrand et al, 2020).

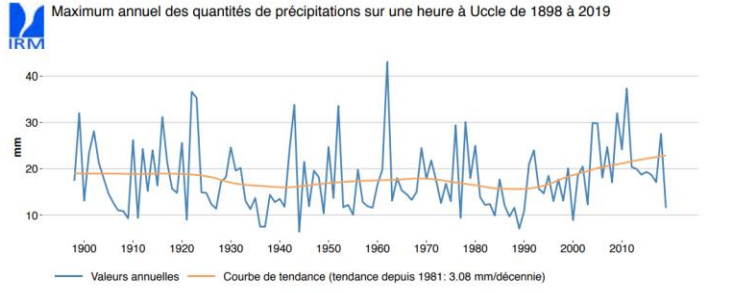
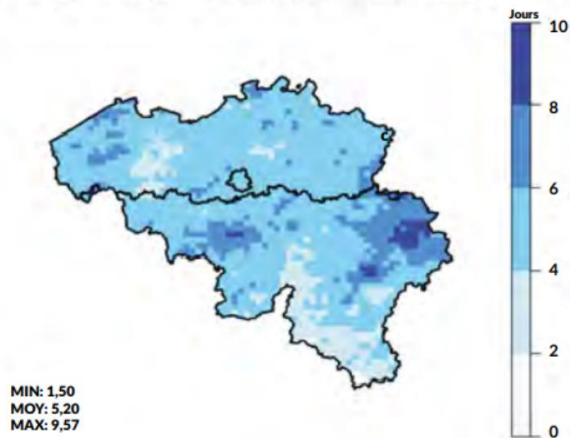


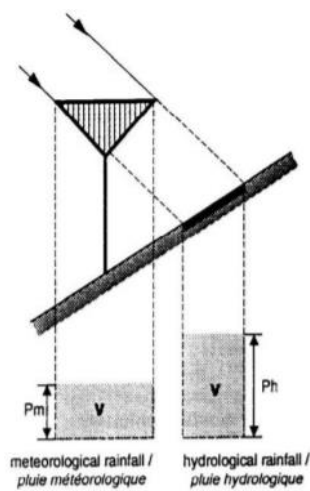
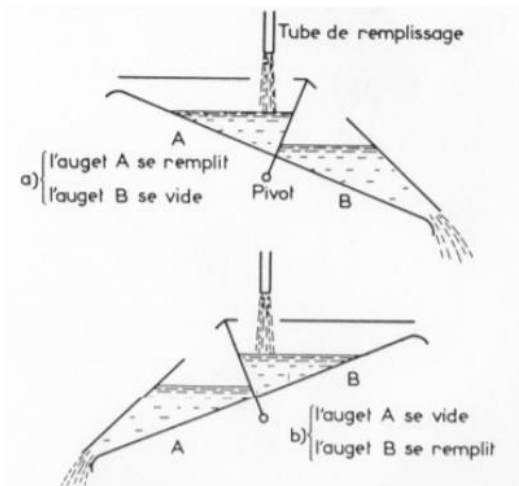
Figure 1.13. Évolution du maximum annuel de la quantité de précipitations tombée en une heure (en mm) à Uccle, sur la période 1898-2019. La valeur moyenne du paramètre sur la période est 18,0 mm.

Annexe 4 : Maximum annuel de précipitation horaire à Uccle (Bertrand et al, 2020).

Différence moyenne du nombre de jours par an avec min. 10 mm
Annuel, RCP 8.5 (2071-2100) par rapport à la simulation historique (1976-2005)

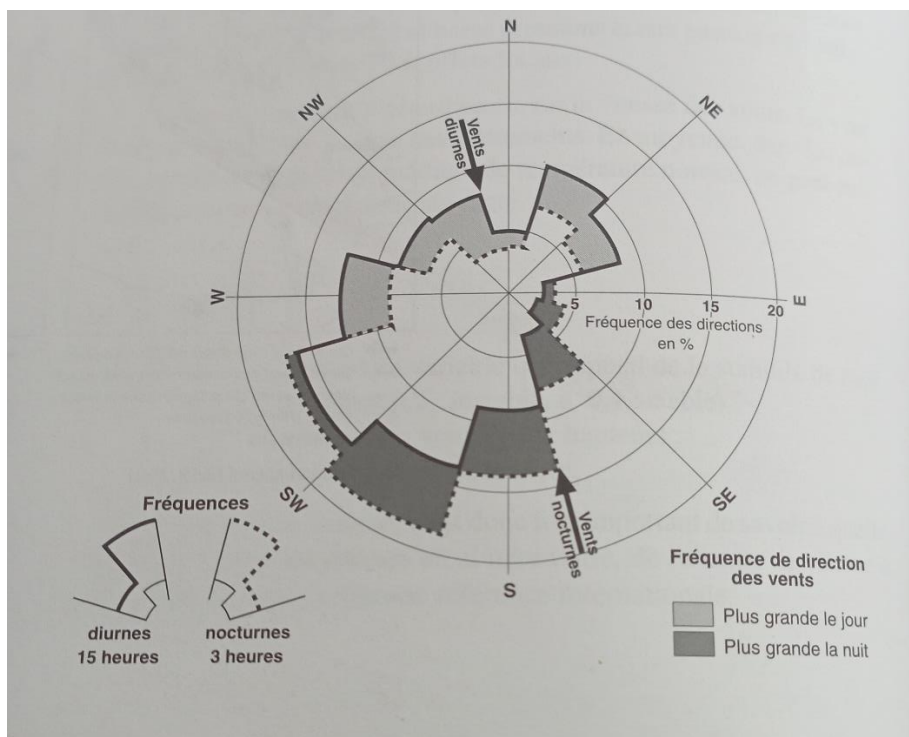


Annexe 5 : Augmentation du nombre moyen de jour de précipitation (>10 mm par jour) par an pour le scénario RCP-8.5, à l'horizon 2085 (Berckamns et al., 2020).

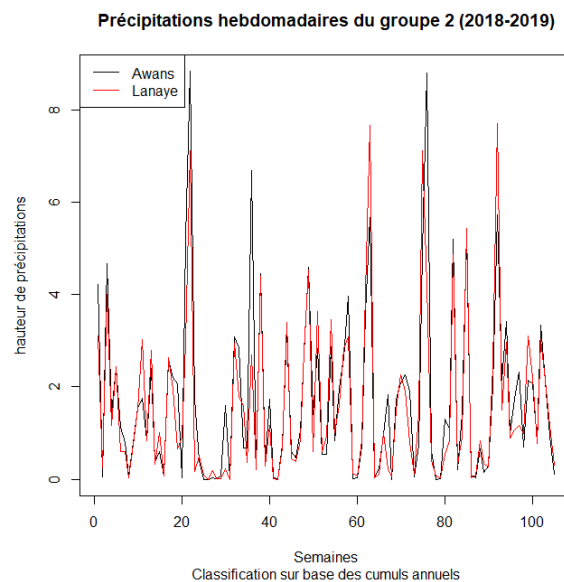
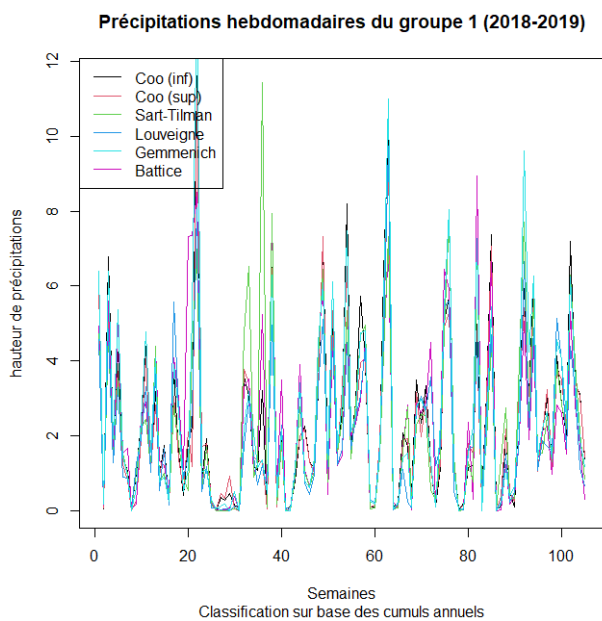


Annexe 6 (à gauche) : Schéma d'un pluviomètre à augets basculeurs (Petit, 1993)

Annexe 7 (à droite): Effet de l'inclinaison du terrain sur la hauteur de précipitations enregistrée par le pluviomètre (Petit, 1993).

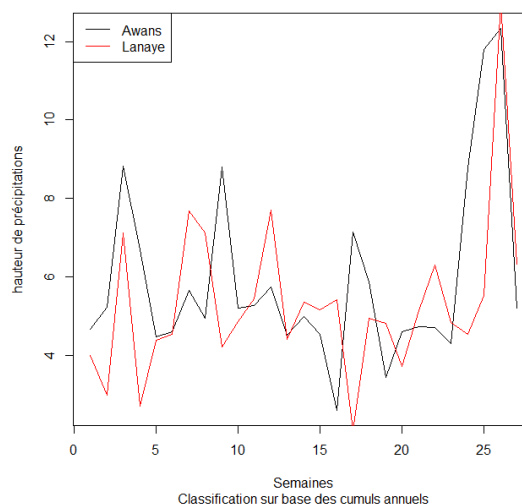
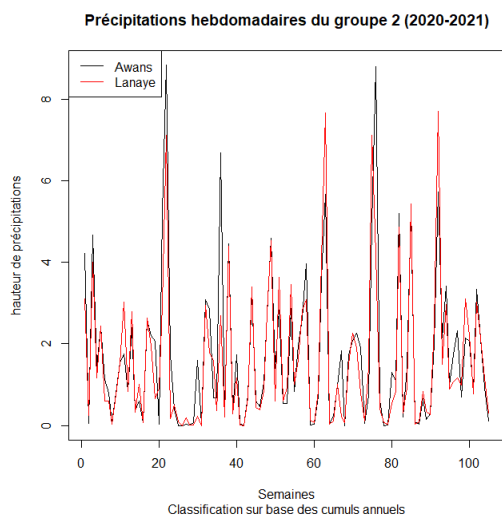


Annexe 8 : Fréquence de la direction des vents à Liège 1955-1966 (Hufty, 2001).



Annexe 9 (à gauche) : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyenne hebdomadaire) au niveau des stations du groupe 1 (classification des cumuls annuels), du premier janvier 2018 au 5 janvier 2020.

Annexe 10 (à droite) : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyenne hebdomadaire) au niveau des stations du groupe 2 (classification des cumuls annuels), du premier janvier 2018 au 5 janvier 2020.



Annexe 11 (à gauche) : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyenne hebdomadaire) au niveau des stations du groupe 2 (classification des cumuls annuels), du 6 janvier 2020 au 21 novembre 2021.

Annexe 12 (à droite) : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations dont les moyennes hebdomadaires ont été considérées comme « moyennes et fortes » au niveau des stations du groupe 1 (classification des cumuls annuels), entre 2018 et 2021

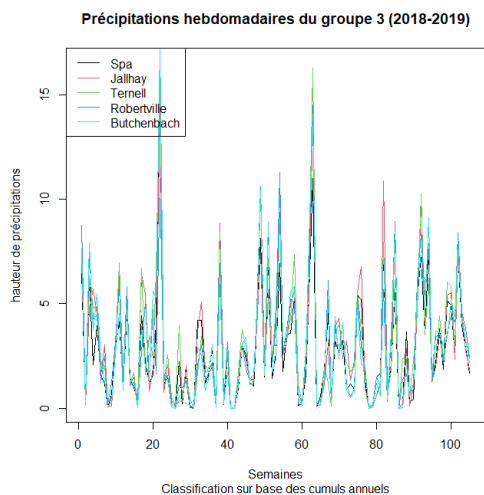
		Awans et Lanaye
Corrélation	Pour l'ensemble des données	0.863
	Pour les précipitations extrêmes (>4mm)	0.594
Biais (Awans-Lanaye)	Pour l'ensemble des données	0.152
	Pour les précipitations extrêmes (>4mm)	0.64
Erreur quadratique moyenne	Pour l'ensemble des données	1.447
	Pour les précipitations extrêmes (>4mm)	3.415

Annexe 13 : Indicateurs statistiques calculés entre la moyenne des précipitations pour le groupe 1 et celles de la station considérée

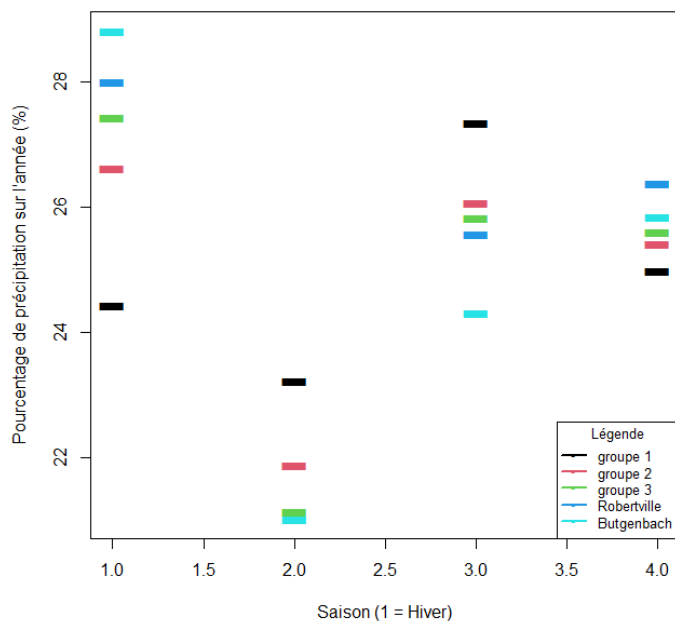
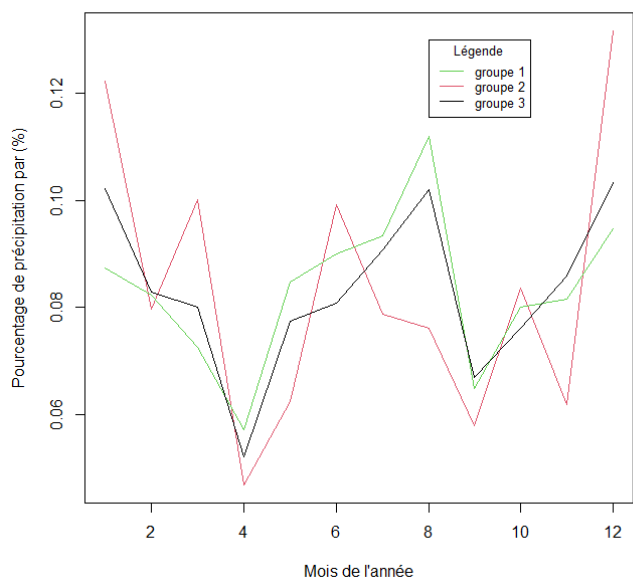
Période d'étude : 1^{er} janvier 2018 – 20 novembre 2021

Taille de l'échantillon total : 1419 observations

Taille de l'échantillon pour les précipitations extrêmes : 193

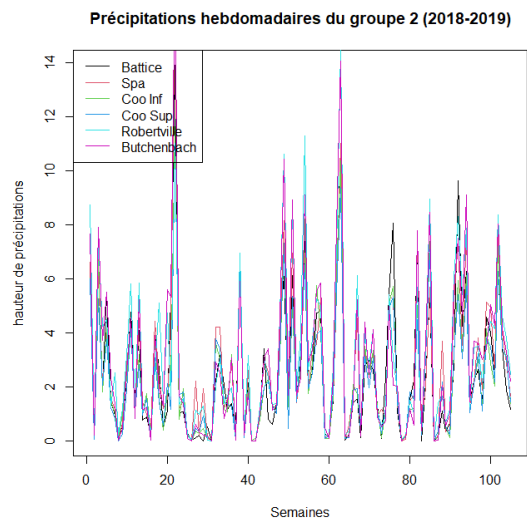
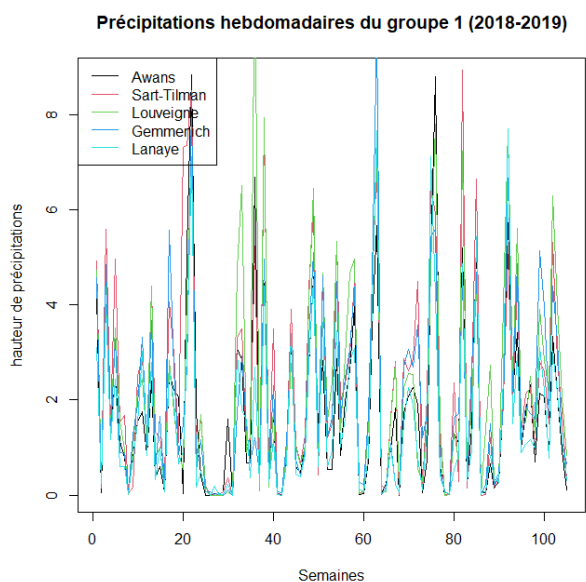


Annexe 14 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyennes hebdomadaires) au niveau des stations du groupe 3 (classification des cumuls annuels), du 1^{er} janvier 2018 au 5 janvier 2020.



Annexe 15 (à gauche) : répartition des précipitations en fonction des mois (période élargie). 1 = janvier, 12 = décembre

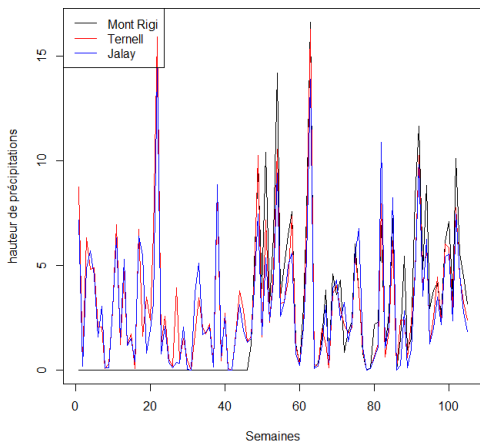
Annexe 16 (à droite) : répartition des précipitations en fonction des saisons (période élargie). 1 = Hiver, 2 = Printemps, 3 = Eté, 4 = Automne



Annexe 17 (à gauche) : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyennes hebdomadaires) au niveau des stations du groupe 1 (classification des intervalles de 14 jours), du 1 janvier 2018 au 5 janvier 2020.

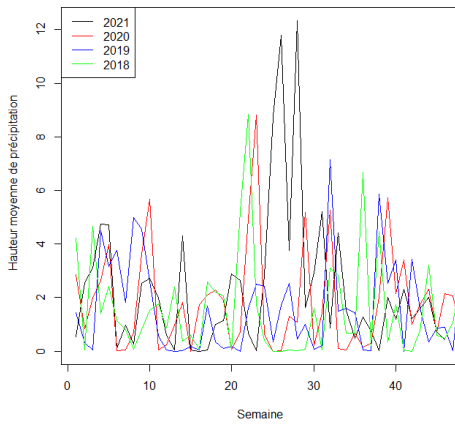
Annexe 18 (à droite) : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyennes hebdomadaires) au niveau des stations du groupe 2 (classification des intervalles de 14 jours), du 1^{er} janvier 2018 au 5 janvier 2020.

Précipitations hebdomadaires du groupe 3 (2018-2019)

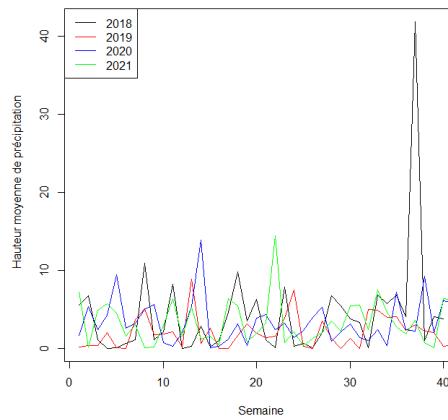


Annexe 19 : Evolution temporelle des hauteurs de précipitations (moyennes hebdomadaires) au niveau des station du groupe 3 (classification des intervalles de 14 jours), du 1^{er} janvier 2018 au 5 janvier 2020.

Précipitations hebdomadaires enregistrées à Awans



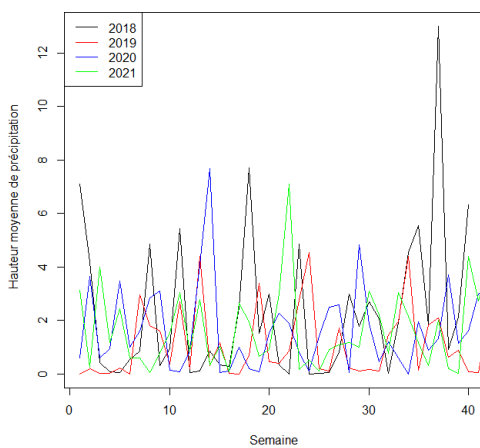
Précipitations hebdomadaires enregistrées à Jalay



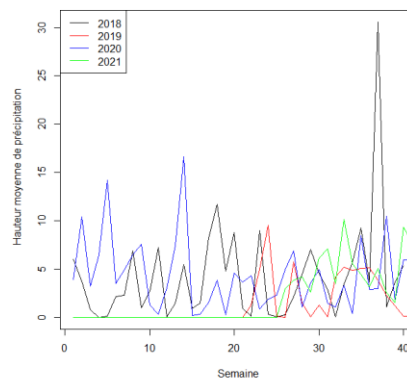
Annexe 20 : Comparaison par année pour Awans.

Annexe 21 : Comparaison par année pour Jalhay.

Précipitations hebdomadaires enregistrées à Lanaye

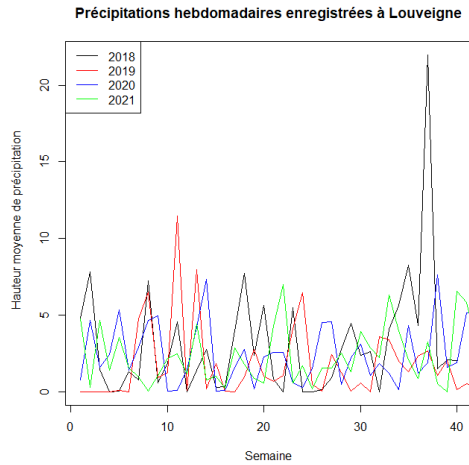


Précipitations hebdomadaires enregistrées au Mont Rigi

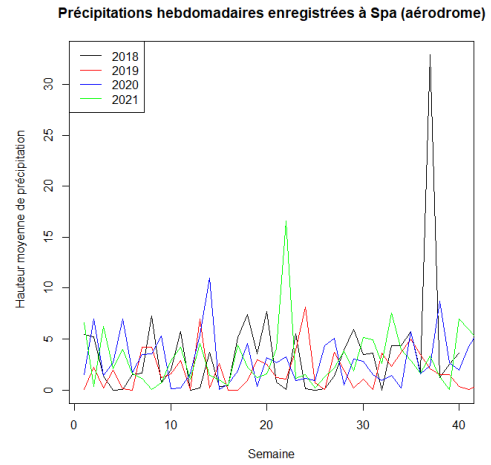


Annexe 22 : Comparaison par année pour Lanaye.

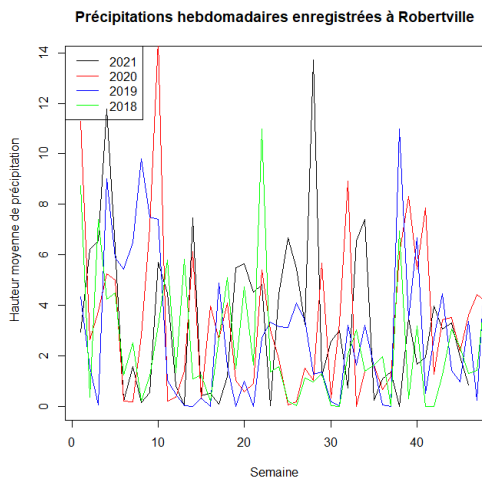
Annexe 23 : Comparaison par année pour le Mont -Rigi.



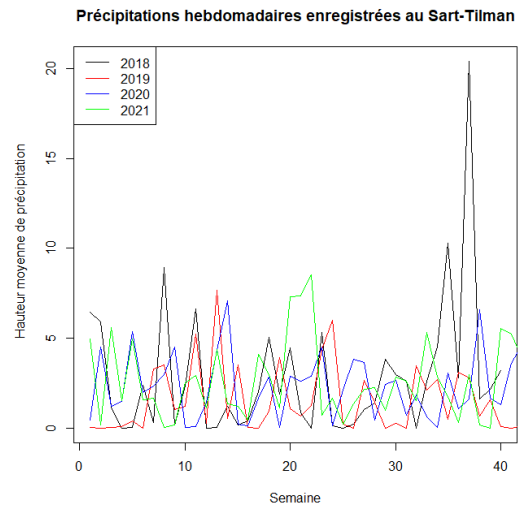
Annexe 24 : Comparaison par année pour Louveigné.



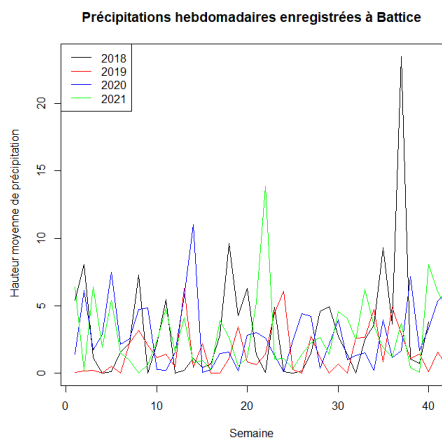
Annexe 25 : Comparaison par année pour Spa.



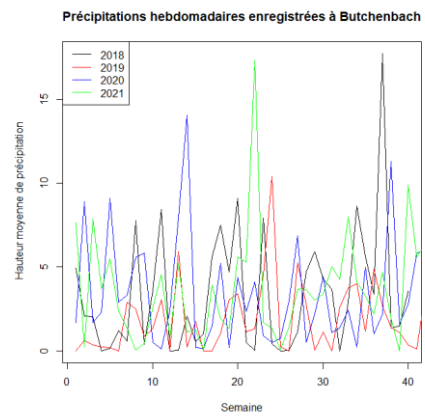
Annexe 26 : Comparaison par année pour Robertville.



Annexe 27 : Comparaison par année pour le Sart-Tilman.

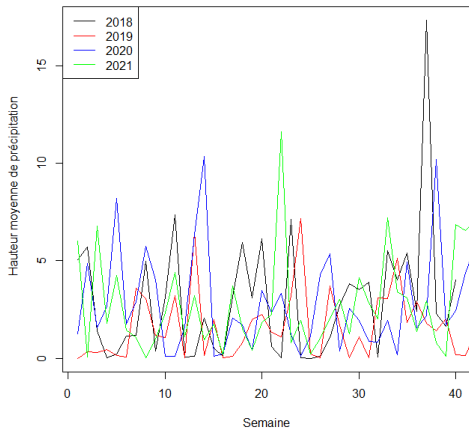


Annexe 28 : Comparaison par année pour Battice.

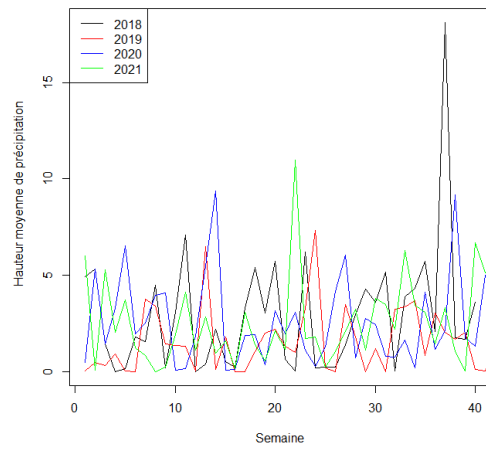


Annexe 29 : Comparaison par année pour Butgenbach.

Précipitations hebdomadaires enregistrées à Cpo (inférieur)

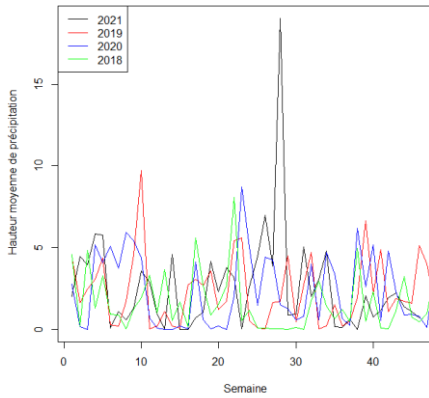


Précipitations hebdomadaires enregistrées à Coo (supérieur)

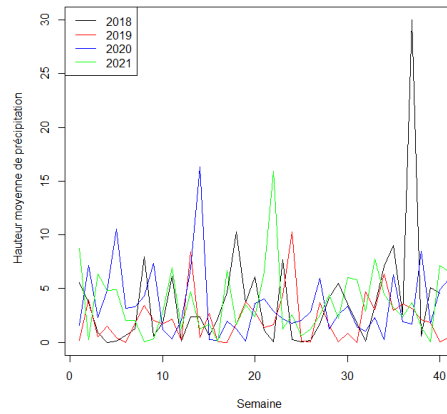


Annexe 30 : Comparaison par année pour Coo inférieur. Annexe 31 : Comparaison par année pour Coo supérieur.

Précipitations hebdomadaires enregistrées à Gemmenich



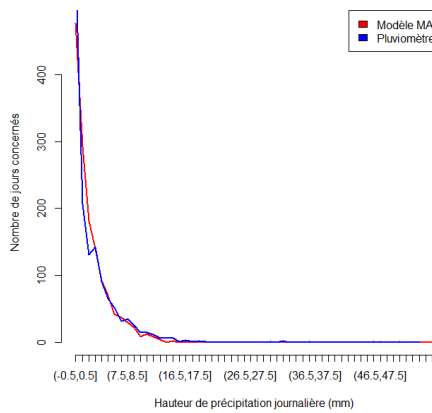
Précipitations hebdomadaires enregistrées à Ternell



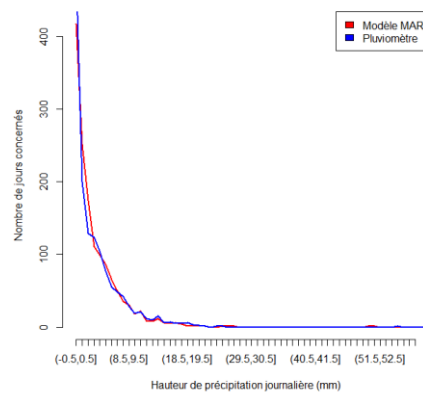
Annexe 32 : Comparaison par année pour Gemmenich.

Annexe 33 : Comparaison par année pour Ternell.

Histogramme pour la station de Battice

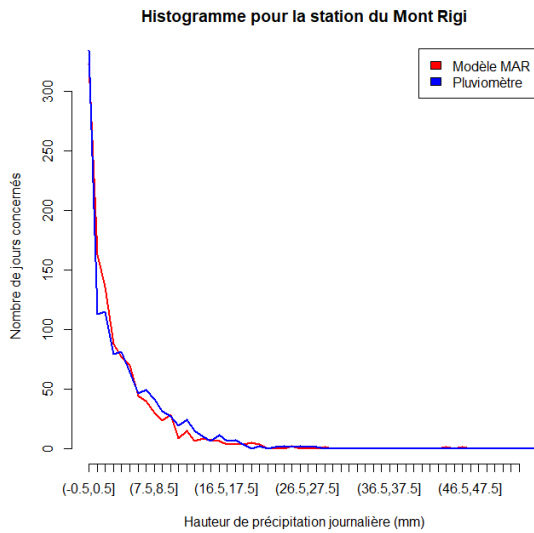


Histogramme pour la station de Ternell

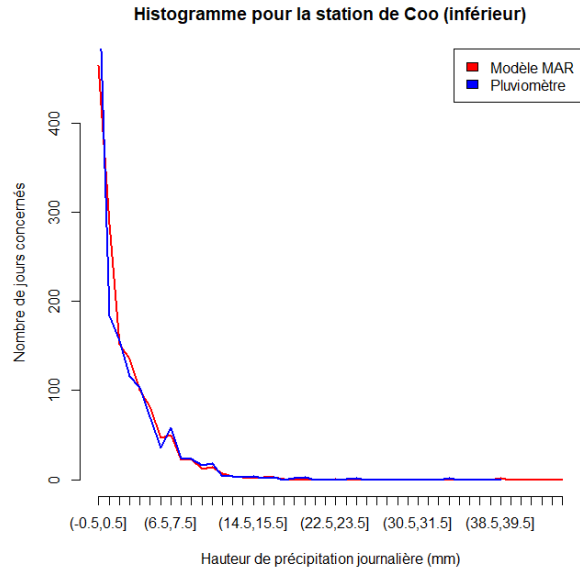


Annexe 34 (à gauche) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Battice.

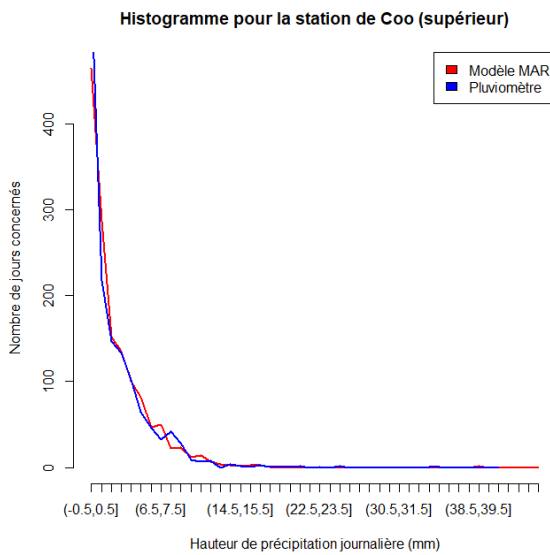
Annexe 35 (à droite) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Ternell.



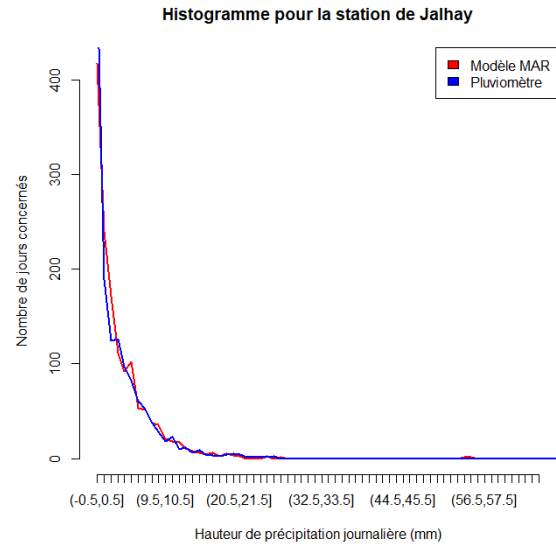
Annexe 36 (à gauche) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour le Mont Rigi



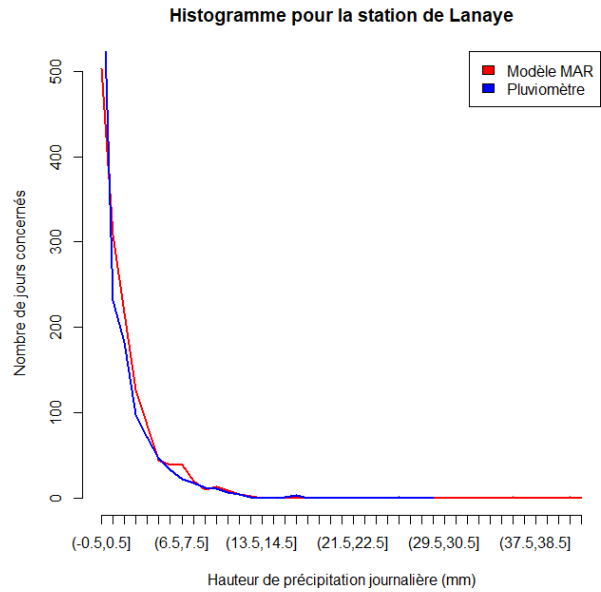
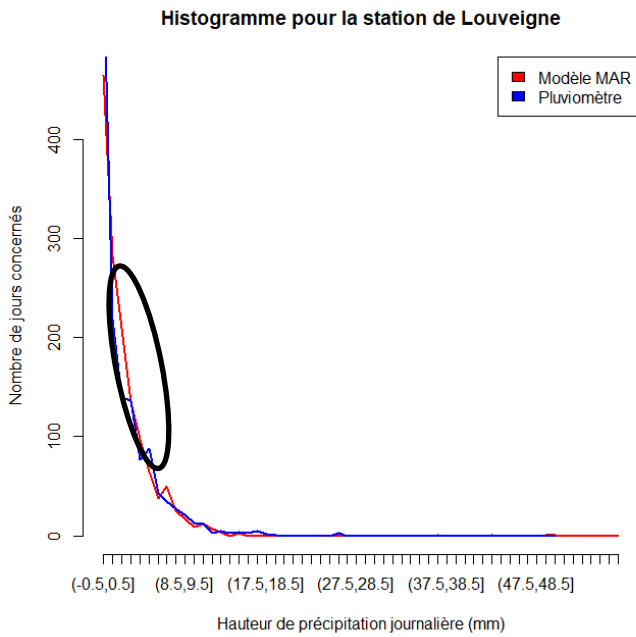
Annexe 37 (à droite) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Coo (inférieur).



Annexe 38 (à gauche) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Coo (Supérieur)

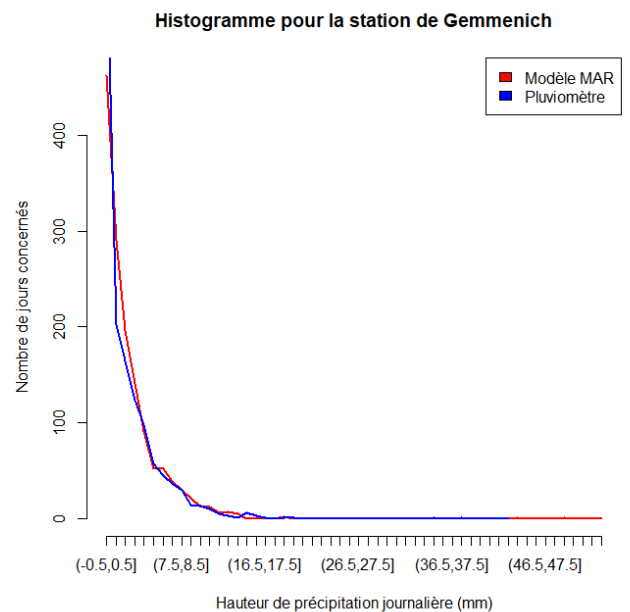
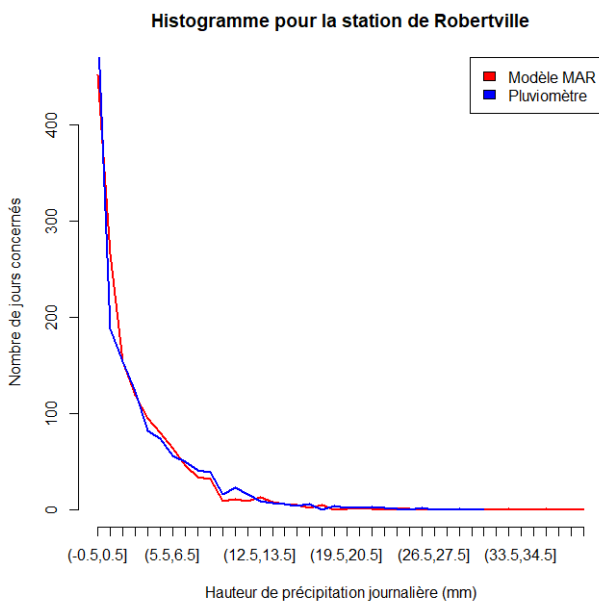


Annexe 39 (à droite) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Jalhay.



Annexe 40 (à gauche) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Louveigne.

Annexe 41 (à droite) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Lanaye.



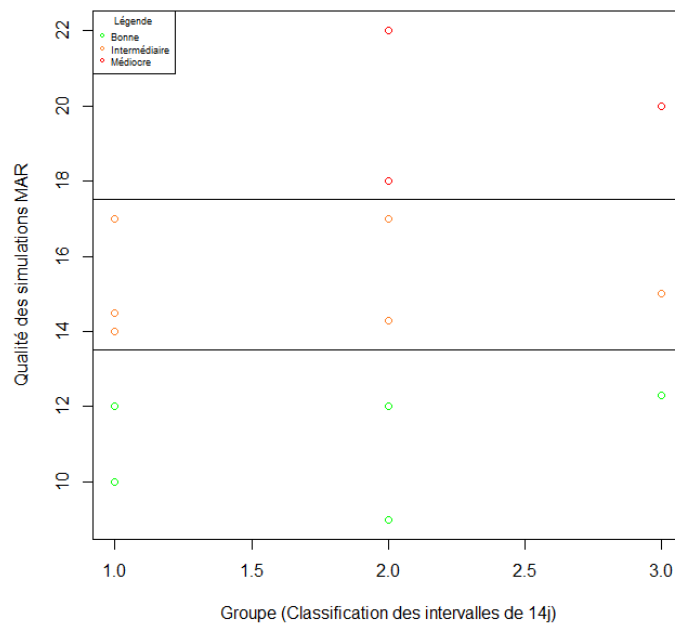
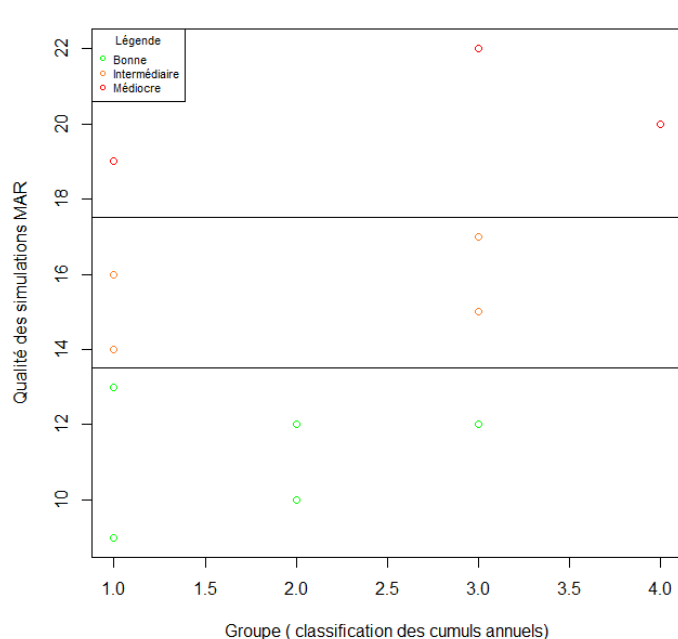
Annexe 41 (à gauche) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Robertville.

Annexe 42 (à droite) : nombre de jours par intervalles de hauteurs de précipitations pour Gemmenich.

	2002-2005	2006-2009	2010-2013	2014-2017	2018-2021
Gemmenich	9.661	-53.223	-63.899	-56.503	61.86
Awans	NA	NA	44.768	27.94	52.02
Battice	-247.731	-213.255	-210.993	-208.795	-105.518
Lanaye	-14.13	-85.079	-44.037	-38.191	114.157
Ternell	15.159	-96.254	-176.127	-242.905	-48.574
Mont Rigi	NA	NA	NA	NA	NA
Spa	NA	NA	NA	NA	-46.517
Jalhay	31.798	75.833	-26.35	-130.971	5.342
Louveigne	-165.58	-123.037	-113.03	-76.211	-37.537
Coo inf	-189.036	-165.023	-248.234	-112.832	2.525
Coo sup	-75.136	-38.923	-67.009	-42.907	44.515
Robertville	-269.958	-195.545	-154.149	-222.493	-80.421
Butchenbach	-272.947	-344.675	-232.387	-261.211	-144.688
Sart-Tilman	-45.465	-191.992	-72.146	-144.433	-53.746
Moyenne des 14 stations	-111.215	-130.107	-113.633	-124.867	-30.312

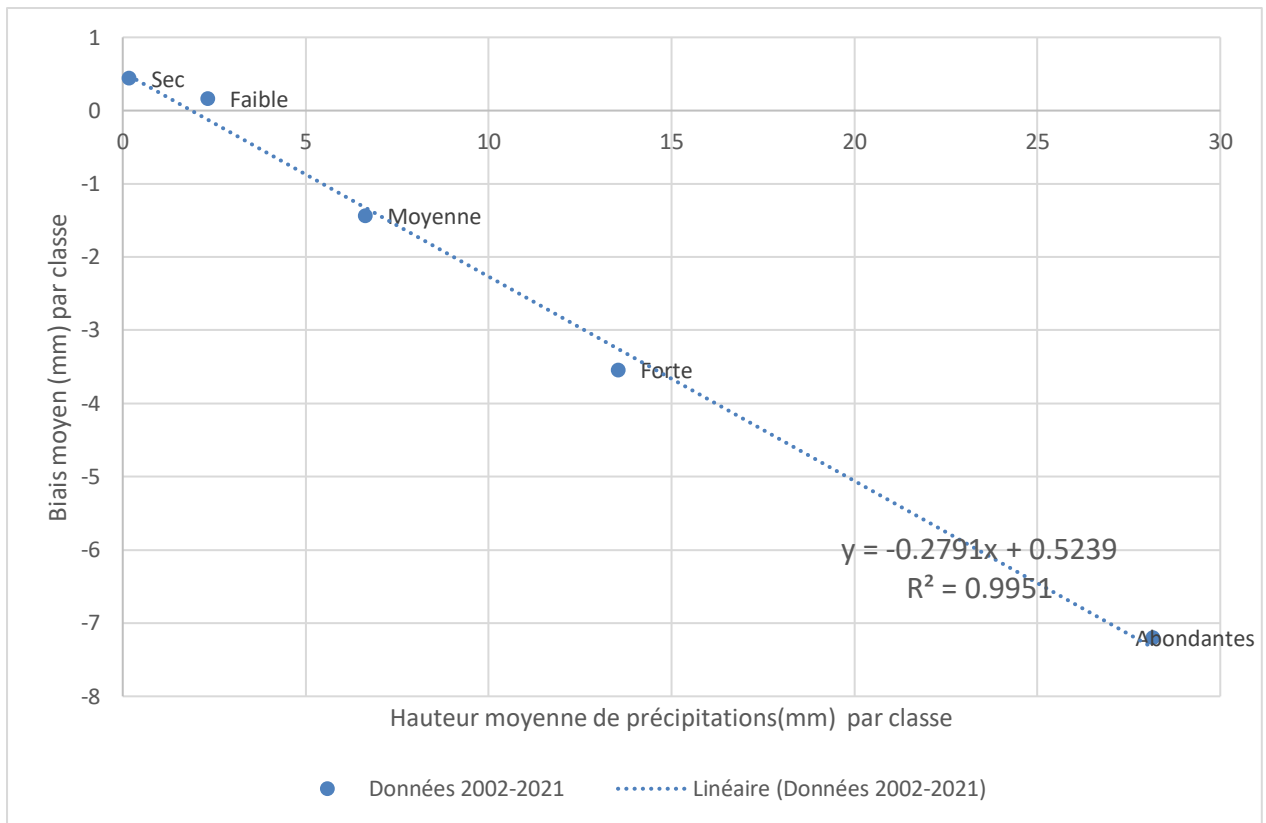
Annexe 43 : Evolution biais (MAR-pluviomètres) en millimètres pour les cumuls annuels.

Toute période incomplète est non considérée dans la moyenne des 14 stations pour ne pas donner plus de « poids » à certaines années au sein d'une période.

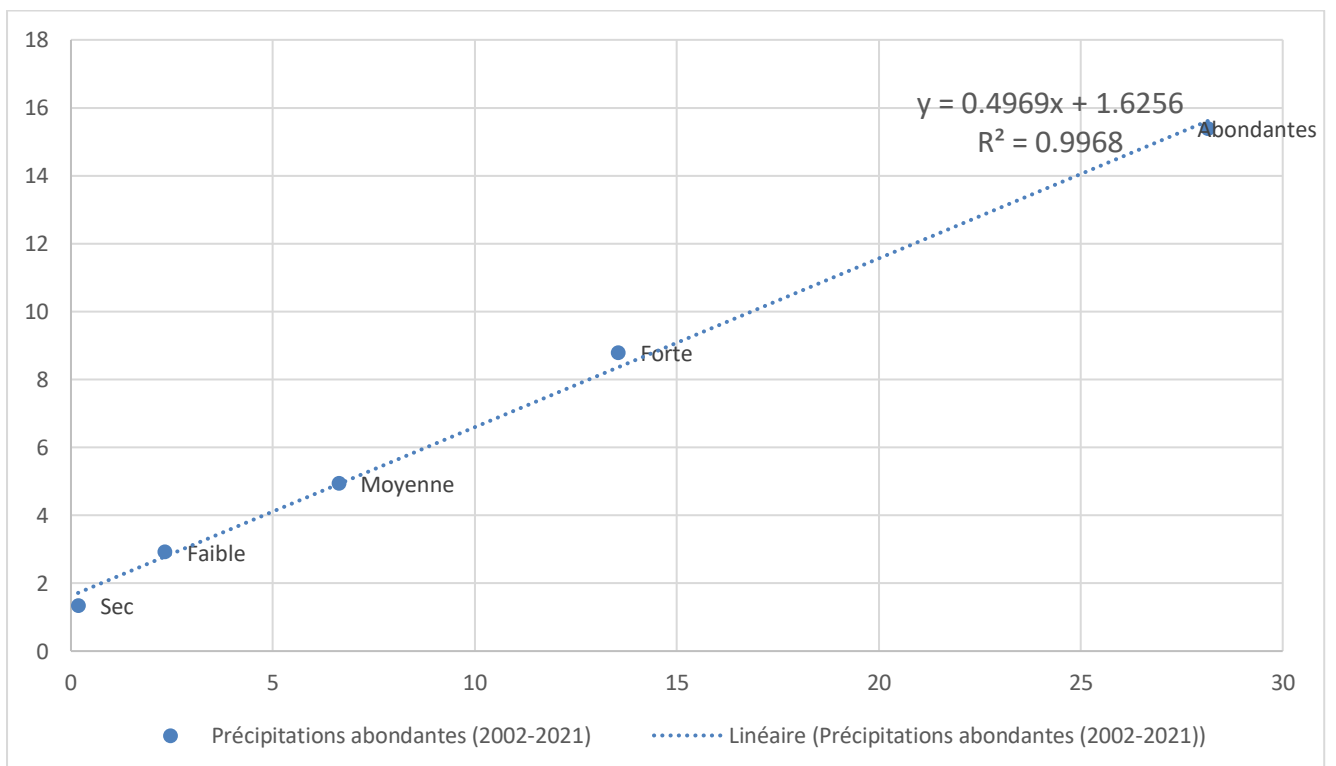


Annexe 44 (à gauche) : Qualité par station (et en fonction du groupe de la classification des cumuls annuels)
Période d'étude et nombre d'observations : voir tableaux précédents

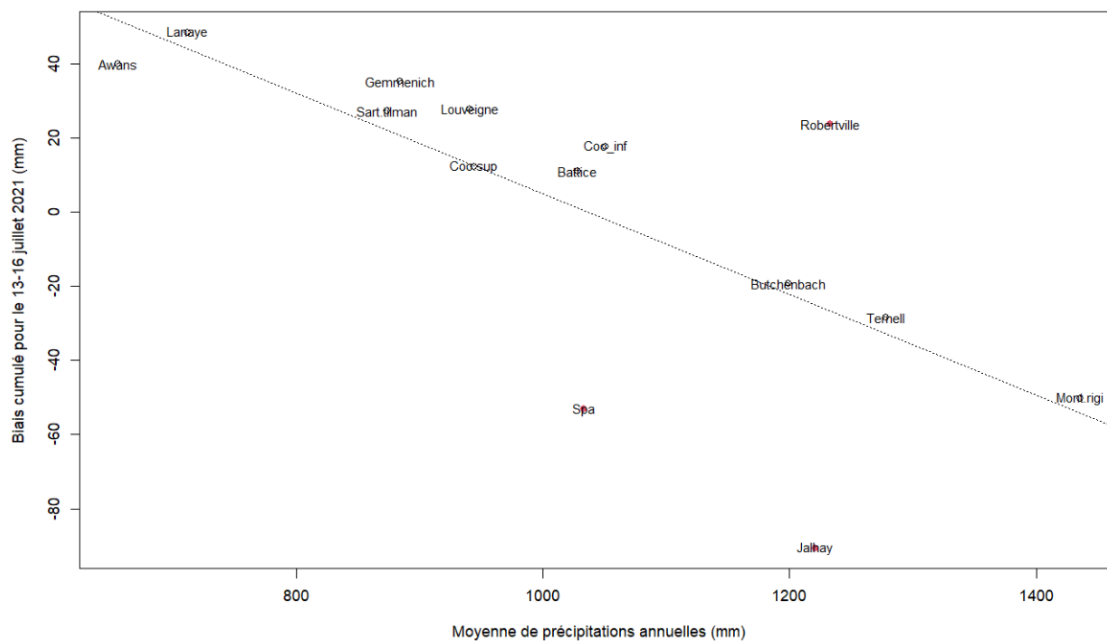
Annexe 45 (à droite) : Qualité par station (et en fonction du groupe de la classification des intervalles de 14 jours)
Période d'étude et nombre d'observations : voir tableaux précédents



Annexe 46 : Relation entre l'intensité de précipitations (par classes) et le biais

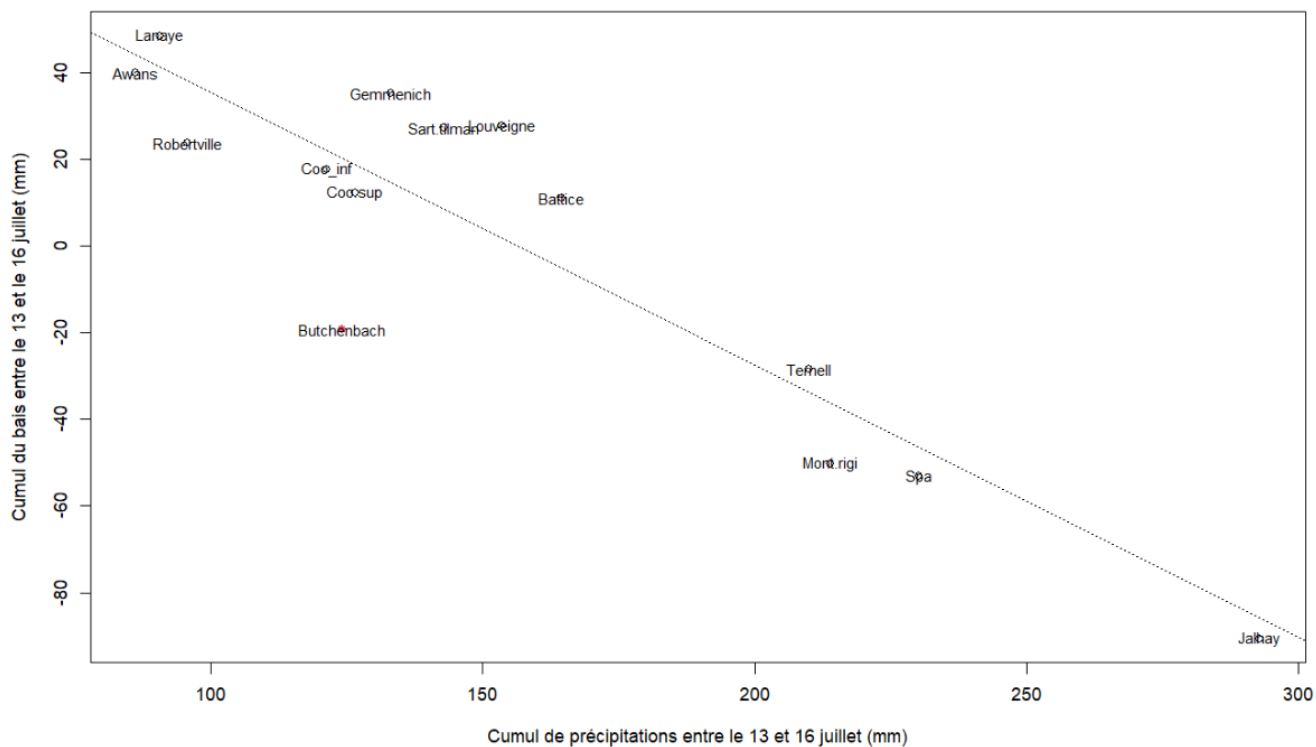


Annexe 47 : Relation entre l'intensité de précipitations (par classes) et la RMS



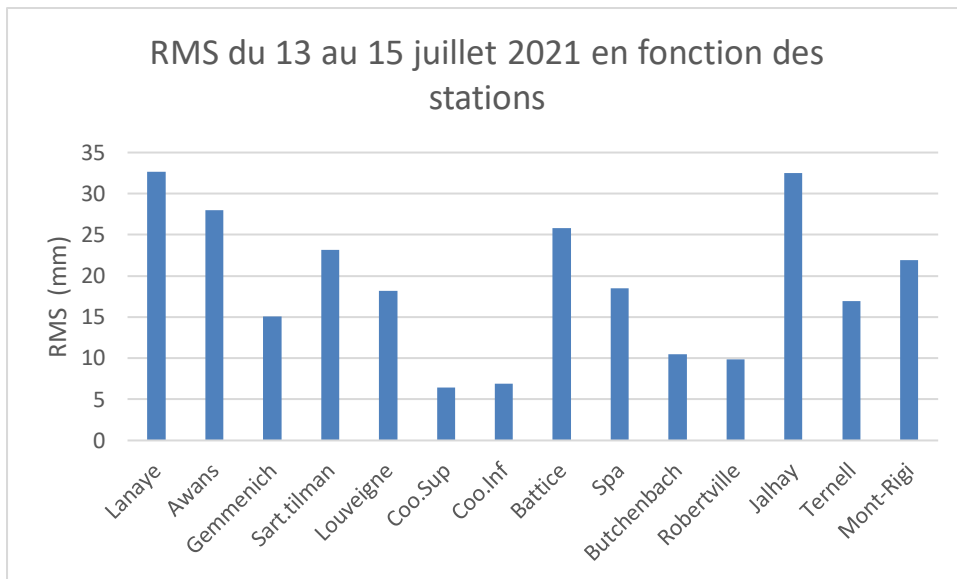
Annexe 48 : Relation entre le régime pluviométrique (moyenne de précipitations annuelles) et le biais lors des inondations de juillet 2021.

Ligne en pointillé = droite de régression ; points rouges = stations qui s'éloignent de la tendance



Annexe 49 : Relation entre la quantité de précipitations et le biais lors des inondations de juillet 2021.

Ligne en pointillé = droite de régression ; point rouge = station qui s'éloigne de la tendance



Annexe 49 RMS par station lors des inondations de juillet 2021.