



Faculté des sciences
Département de géographie

JUILLET 2021 VU PAR LE MODÈLE MAR

Mémoire présenté par : **Théo DENIS**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques,
orientation global change
à finalité approfondie climatologie**

Année académique

2022-2023

Membres du jury :

Pr. Xavier FETTWEIS (Promoteur)

Pr. Sébastien DOUTRELOUP

Pr. Geoffrey HOUBRECHTS

Remerciements

Alors que j'écris ces lignes, voilà pratiquement deux ans que j'ai rejoint le monde de la géographie. Je me revois terminer mon bachelier de physique en plein questionnement sur mon avenir. Me destinant initialement à étudier l'astrophysique, mais ignorant où cela allait me conduire, j'ai finalement choisi d'étudier la climatologie, rendant en quelque sorte un hommage à l'enfant passionné de météo que j'étais.

Ce changement d'univers fut à mon grand étonnement d'une simplicité déconcertante. Malgré des lacunes évidentes en géographie, les différents professeurs m'ont permis de m'adapter sans aucune difficulté. Je tiens à tous les remercier pour leurs nombreux enseignements.

Après toute une série de cours aussi divers que variés, vient un temps pour la rédaction du mémoire. Il s'agit d'un long chemin parsemé de périodes de doute, de remises en question, mais au combien enrichissant. C'est une expérience de vie intense, mais riche en apprentissage, dont on ressort grandi. Pour m'avoir aidé à surmonter les différents obstacles rencontrés mais également pour sa disponibilité et ses nombreux conseils, je tiens à particulièrement remercier mon promoteur, Xavier Fettweis. Je ne peux oublier de remercier les autres membres du Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie pour leurs précieuses aides.

Comment ne pas remercier ma famille pour leur soutien indéfectible depuis le début de mes études ! Ma réussite est aussi la leur et je ne leur serai jamais assez reconnaissant.

Enfin, mon entrée dans la galaxie de la géographie n'aurait jamais été aussi aisée sans mes nombreux nouveaux amis géographes avec qui j'ai partagé tant de bons moments !

Abstract (Français)

Les inondations de juillet 2021 sont indiscutablement l'un des événements climatiques les plus dramatiques de ces dernières décennies. De nombreuses vallées, majoritairement ardennaises, ont été affectées. Les précipitations responsables de ces inondations sont la conséquence d'une situation atmosphérique exceptionnelle combinée à une succession de facteurs aggravants concentrés dans une région restreinte.

Parmi ces différents facteurs, un soulèvement orographique par le Massif ardennais de la masse d'air humide venant du nord-est a retenu notre attention. Aucune quantification de ce phénomène n'avait été effectuée précédemment. Dès lors, à l'aide du modèle atmosphérique régional (MAR), ce mémoire détaille une série de tests de sensibilité au Massif ardennais des intenses précipitations mesurées en juillet 2021. Parallèlement, des tests de sensibilité à la résolution spatiale du MAR ont aussi été réalisés.

L'analyse de projections réalisées avec le MAR et des modèles de circulation générale a permis d'analyser le futur des extrêmes pluviométriques dans la vallée de la Vesdre et de la Dyle. Il ressort que des événements comparables à ceux de juillet 2021 sont susceptibles de se reproduire dans un contexte de réchauffement climatique modéré. Notre étude illustre aussi l'intérêt d'utiliser des modèles climatiques régionaux dans l'analyse d'intenses précipitations dans des vallées présentant de fortes disparités topographiques.

Abstract (Anglais)

The floods of July 2021 are indisputably one of the most dramatic climatic events of recent decades. Many valleys, mainly in the Ardennes, were affected. The rainfall that caused the flooding was the result of an exceptional atmospheric situation combined with a series of aggravating factors concentrated in a small area.

Among these various factors, an orographic uplift by the Ardennes massif of the humid air mass coming from the north-east caught our attention. This phenomenon had not previously been quantified. Consequently, using the regional atmospheric model (MAR), this report details a series of sensitivity tests to the Massif ardennais for the intense precipitation measured in July 2021. At the same time, sensitivity tests were also carried out on the spatial resolution of the MAR.

The analysis of projections made using the MAR and general circulation models has made it possible to analyse the future of extreme rainfall events in the Vesdre and Dyle valleys. The results show that events comparable to those of July 2021 are likely to recur in a context of moderate climate warming. Our study also illustrates the value of using regional climate models to analyse intense rainfall in valleys with significant topographical disparities.

Table des matières

Acknowledgments	i
1 Introduction	1
1.1 Contexte de l'étude et motivations	1
1.2 Contenu du mémoire	3
2 État de l'art	5
2.1 Description des conditions climatiques ayant conduit aux inondations de juillet 2021	5
2.2 Reconstruction des cumuls pluviométriques	7
3 Méthodologie	9
3.1 Le Modèle MAR	9
3.1.1 Description Générale du MAR	9
3.1.2 Description du schéma convectif et du schéma de la microphysique des nuages	10
3.2 Description des GCM et des réanalyses utilisés	12
3.3 Description de la zone d'étude	13
3.3.1 Motivations	13
3.3.2 Description de la vallée de la Vesdre	13
3.3.3 Description de la vallée de la Dyle	14
3.3.4 Création des masques	15
3.4 Tests de sensibilité	18
3.4.1 Impact de la résolution du MAR sur la prédiction d'intenses précipitations	18
3.4.2 Impact du Massif ardennais	18
3.5 Projections dans la vallée de la Dyle et de la Vesdre	19
3.6 Résumé des tests de sensibilité	22

4	Présentation des résultats et discussions	23
4.1	Tests de sensibilité à la résolution	23
4.1.1	Analyse de la simulation de référence	23
4.1.2	Analyse de l'impact de la résolution sur la vallée de la Vesdre et la Dyle	24
4.2	Tests de sensibilité à la topographie	36
4.2.1	Résultats des tests de sensibilité réalisés avec MAR v13	36
4.2.2	Résultats des tests de sensibilité réalisés avec MAR v12	39
4.2.3	Lien entre tests de sensibilité à la résolution et à la topographie . . .	49
4.2.4	Conclusion	49
4.3	Projections climatiques	51
4.3.1	Vallée de la Vesdre	51
4.3.2	Vallée de la Dyle	65
5	Conclusion	70
	Références	71

Table des figures

1	Cumul des précipitations du 13 juillet 2021 08 :00 au 16 juillet 2021 08 :00 Figure tirée de IRM (2021a).	3
2	Isohypses à 500 hPa (contours rouges continus, en gpdm), pression au niveau de la mer (contours jaunes discontinus, en hPa) et total d’eau précipitable (teinte rougeâtre, en kg/m^2) le 14 juillet 2021 12 :00UTC. Les données sont fournies par ERA5. Figure tirée de MOHR et al. (2023).	7
3	Distribution spatiale du cumul pluviométrique du 13 juillet (06h) au 16 juillet (06h) 2021. La figure de droite a été obtenue à partir d’une interpolation des données fournies par des pluviomètres et la figure de gauche par l’utilisation de données radar. Figure tirée de JOURNÉE et al. (2023).	8
4	Localisation du bassin versant de la Dyle (limité jusqu’à Louvain). Figure tirée de NOTEBAERT et al. (2011).	14
5	Bassin de la Meuse avec agrandissement sur les bassins versants de la Vesdre, de l’Amblève et de l’Ourthe. Figure tirée de DEWALS et al. (2021).	15
6	Le polygone noir représente la délimitation du bassin versant de la Vesdre réalisée sur une grille du MAR avec une résolution spatiale de 5 km. En fond de carte est illustrée la topographie (en m) avec une résolution d’1 km. La fine ligne noire représente la frontière avec l’Allemagne.	17
7	Le polygone rouge délimite le bassin versant de la Vesdre et le bleu la partie de celui de la Dyle étudiée dans ce mémoire. Les deux délimitations ont été réalisées à 5 km de résolution. La topographie du MAR à 5 km est montrée en fond de carte. Certains lieux couramment cités ou pouvant servir de point de repère sont également repris sur la carte (W = Wavre, Lv = Louvain, Bx = Bruxelles).	17
8	Cumuls des précipitations (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en faisant varier la résolution de MAR v12. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.	31

9	Cumuls des précipitations convectives (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en faisant varier la résolution de MAR v12. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.	32
10	Topographie de la Belgique des différentes simulations. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.	33
11	Cumuls des précipitations (mm/3jours) du 28 au 30 juin 2021 sur la Belgique. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.	34
12	Cumuls des précipitations convectives (mm/3jours) du 28 au 30 juin 2021 sur la Belgique. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.	35
13	Cumuls des précipitations (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en abaissant progressivement l'altitude maximale (indiquée sous les cartes) des points de grille de MAR v13 à 5km. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.	43
14	Cumuls des précipitations (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en abaissant progressivement l'altitude maximale (indiquée sous les cartes) des points de grille de MAR v12 à 7.5km. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.	44
15	Cumuls des précipitations convectives (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en abaissant progressivement l'altitude maximale (indiquée sous les cartes) des points de grille de MAR v12 à 7.5km. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.	45
16	Topographie (m) de la Belgique des différentes simulations. Le seuil topographique fixé pour chacune d'entre elles est indiqué sous les cartes.	46
17	Moyenne de la vitesse du vent (vitesse en m/s) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en abaissant progressivement l'altitude maximale (indiquée sous les cartes) des points de grille de MAR v13 à 5km. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.	47

18	Différence du cumul des précipitations (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 entre MAR13-600m et MAR13-0m (a) et entre MAR12-600m et MAR12-0m (b). Le bleu indique une plus grande quantité de précipitations générées par MAR12/13-600m et le rouge par MAR12/13-0m. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.	48
19	Différence entre MAR13-600m et MAR13-0m de la moyenne de la vitesse du vent (vitesse en m/s) du 13 au 15 juillet 2021. La figure (a) utilise la même échelle que la figure 17 et la figure (b) une autre échelle pour amplifier les différences.	48
20	Cumuls de précipitations (mm/3jours) et moyennes de la vitesse du vent (vitesse en m/s) pour différents événements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par MAR13-5km. Ces événements présentent tous une circulation cyclonique semblable à celle observée en juillet 2021. Pour chacun d'entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d'apparition.	55
21	Cumuls de précipitations (mm/3jours) pour différents événements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par le MAR13-5km. Ces événements présentent tous une circulation cyclonique évidente semblable à celle observée en juillet 2021. Pour chacun d'entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d'apparition. Les cumuls moyennés sur la vallée de la Vesdre sont affichés entre parenthèses.	56
22	Cumuls de précipitations (mm/3jours) pour différents événements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par MAR13-5km. Un flux atmosphérique automnal ou hivernal avec une importante vitesse dirigée majoritairement vers l'est est commun à tous ces événements. Pour chacun d'entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d'apparition.	57

23	Cumuls de précipitations (mm/3jours) pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par MAR13-5km. Un flux atmosphérique automnal ou hivernal avec une importante vélocité dirigée majoritairement vers l'est est commun à tous ces évènements. Pour chacun d'entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d'apparition. Les cumuls moyennés sur la vallée de la Vesdre sont affichés entre parenthèses.	57
24	Différences des cumuls de précipitations (mm/3jours) entre MAR13-5km et MAR12-7.5km pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par le MAR13-5km. La couleur bleue/rouge représente une plus grande quantité de précipitations générées par MAR13-5km/MAR12-7.5km. Une influence topographique y est visible. Pour chacun d'entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d'apparition.	64
25	Différence des cumuls de précipitations (mm/3jours) entre MAR13-5km et MAR12-7.5km pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par le MAR13-5km. La couleur bleue/rouge représente une plus grande quantité de précipitations générées par MAR13-5km/MAR12-7.5km. Une influence topographique y est moins évidente. Pour chacun d'entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d'apparition.	64
26	Cumuls des précipitations (mm/3jours) et moyenne de la vélocité du vent (vitesse en m/s) pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 100 mm/3jours) simulés par les différents GCM indiqués sous les cartes.	69
27	Cumuls des précipitations (mm/3jours) prédits par MAR13-5km forcé par les GCM indiqués sous les cartes. Au contraire des GCM, MAR ne simule pas d'intenses précipitations.	69

Liste des tableaux

1	Résumé des tests de sensibilité. Les acronymes ne font pas référence au forçage du MAR par ERA5, celui-ci étant sous-entendu.	22
2	Résultats des tests de sensibilité à la résolution réalisés avec MAR v12. Les cumuls présentés sont des moyennes spatiales sur les différentes vallées des précipitations simulées par le MAR du 13 au 15 juillet 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d'accroissement des différents cumuls par rapport à MAR12-5km.	29
3	Cumuls moyennés spatialement des précipitations simulées par le MAR le 15 juillet 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d'accroissement des différents cumuls par rapport à MAR12-5km.	29
4	Cumuls moyennés spatialement des précipitations convectives simulées par le schéma convectif du MAR du 13 juillet au 15 juillet 2021. L'accent est mis sur l'impact de la résolution. Les deux dernières colonnes expriment le pourcentage de précipitations convectives incluses dans l'ensemble des précipitations. . . .	30
5	Cumuls moyennés spatialement des précipitations simulées par le MAR du 28 juin au 30 juin 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d'accroissement des différents cumuls par rapport à MAR12-5km.	30
6	Cumuls moyennés spatialement des précipitations convectives simulées par le schéma convectif du MAR du 28 juin au 30 juin 2021. Les deux dernières colonnes expriment le pourcentage de précipitations convectives incluses dans l'ensemble des précipitations.	30
7	Résultats des tests de sensibilité au Massif ardennais réalisés avec MAR v12. Les cumuls présentés sont des moyennes spatiales sur les différentes vallées des précipitations simulées par le MAR du 13 au 15 juillet 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d'accroissement des différents cumuls par rapport à MAR12-600m.	42
8	Résultats des tests de sensibilité au Massif ardennais réalisés avec MAR v13. Les cumuls présentés sont des moyennes spatiales sur les différentes vallées des précipitations simulées par le MAR du 13 au 15 juillet 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d'accroissement des différents cumuls par rapport à MAR13-600m.	42

9	Cumuls moyennés spatialement des précipitations convectives simulées par le schéma convectif du MAR v12 du 13 juillet au 15 juillet 2021. L’accent est mis sur l’impact du Massif ardennais. Les deux dernières colonnes expriment le pourcentage de précipitations convectives incluses dans l’ensemble des précipitations.	42
10	Tableau récapitulatif des projections réalisées avec MAR13-5km dans la vallée de la Vesdre.	52
11	Moyennes des déviations par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par NOR-ESM2 et MAR13-5km forcé par ce dernier. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre NOR-ESM2 et MAR13-5km.	60
12	Moyennes des déviations par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MPI-ESM1-2-HR et MAR13-5km forcé par ce dernier. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MPI-ESM1-2-HR et MAR13-5km.	60
13	Moyennes des déviations par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MIROC6 et MAR13-5km forcé par ce dernier. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MIROC6 et MAR13-5km.	60
14	Tableau récapitulatif des projections réalisées avec MAR12-7.5km dans la vallée de la Vesdre.	62
15	Moyennes des déviations par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MAR12-7.5km et MAR13-5km forcés par NOR-ESM2. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MAR12-7.5km et MAR13-5km.	63
16	Moyennes des déviations par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MAR12-7.5km et MAR13-5km forcés par MPI-ESM1-2-HR. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MAR12-7.5km et MAR13-5km.	63

17	Moyennes des déviations par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MAR12-7.5km et MAR13-5km forcés par MIROC6. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MAR12-7.5km et MAR13-5km.	63
18	Tableau récapitulatif des projections réalisées avec MAR13-5km dans la vallée de la Dyle.	66
19	Tableau récapitulatif des projections des différents GCM dans la vallée de la Dyle.	68

Liste des abbréviations

MAR : Modèle Atmosphérique Régional

MAR v12 : MAR version 3.12

MAR v13 : MAR version 3.13

RCM : Regional Climate Model

GCM : General circulation Model

IRM : Institut Royal Météorologique de Belgique

SPW : Service Public de Wallonie

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

IPCC : Intergovernmental Panel On Climate Change

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude et motivations

Les inondations de juillet 2021 sont indiscutablement un des événements climatiques les plus marquants de l'histoire de la Belgique et à fortiori de ce début de siècle. Du 13 au 15 juillet 2021, et en particulier le 14 et le 15 juillet, d'importantes quantités de précipitations sont tombées sur la Belgique, établissant à de nombreuses reprises de nouveaux records (KREIENKAMP et al., 2021). La province de Liège a été la plus touchée, des pluviomètres du SPW (*Service Public de Wallonie*) et de l'IRM (*Institut Royal Météorologique*) enregistrant sur les 3 jours de l'évènement des cumuls largement supérieurs à 200 mm/3jours.

Par exemple, 271,5 mm de précipitations ont été relevés à Jalhay¹ et 192,4 mm au Mont Rigi² (IRM, 2021b).

La province du Luxembourg, et dans une moindre mesure celle du Brabant wallon n'ont pas été épargnées comme le montre la figure 1. D'un point de vue hydrologique, la vallée de la Vesdre, comprenant les villes de Pepinster et de Verviers, a été la plus impactée par les précipitations. Dans la même région, les bassins versants de l'Ourthe et de l'Ambève ont également vu leurs records pluviométriques être dépassés (DEWALS et al., 2021). Nous pouvons en outre citer la Dyle, rivière s'écoulant dans les deux provinces brabançonnaises, qui a également débordé, inondant entre autres le parc d'attraction Walibi.

Malheureusement, en ne considérant que le bilan humain belge, ces inondations ont pris la vie de 39 personnes et 100 000 sinistrés ont été recensés (« Inondations de juillet 2021 : Bilan et perspectives », 2022).³ Le bilan matériel fut également désastreux, tant en nombre d'habitations détruites que d'infrastructures réduites à néant ou endommagées. L'objectif ici n'est pas d'établir une liste exhaustive de l'ensemble des dégâts, mais de permettre au lecteur de se rendre compte de l'ampleur des dégâts résultant des événements de juillet 2021. Le gouvernement wallon dénombre ainsi plus de 45 000 logements et 11 000 voitures détruits ou endommagés. En outre, des dizaines de milliers de foyers se sont retrouvés sans

1. Commune située au sud-est de Liège et sud-ouest d'Eupen ayant une partie de son territoire inclus dans le Parc naturel Hautes Fagnes-Eifel. La Baraque Michel, troisième plus haut point de Belgique, se situe dans cette entité.

2. Le Mont Rigi (680 m d'altitude) se trouve dans la commune de Waismes, incluse intégralement dans le Parc naturel Hautes Fagnes-Eifel et frontalière avec l'Allemagne.

3. En Allemagne, le bilan humain est d'un peu moins de 200 morts.

eau ou électricité juste après le pic de l'évènement. Du point de vue des infrastructures, 10 kilomètres de voies ferroviaires ont dû être remplacés ainsi que 50 kilomètres de caténaires (KOKS et al., 2022). Les autorités wallonnes font également état de centaines d'ouvrages d'art détruits ainsi que 559 ponts (« Inondations de juillet 2021 : Bilan et perspectives », 2022). Au final, cette catastrophe climatique aura coûté 2,8 milliards d'euros à la Région wallonne. Enfin, 11 mois après les inondations, les entreprises d'assurance avaient versé 1,7 milliards d'euros d'indemnités (ASSURALIA, 2022).

Une catastrophe d'une telle ampleur nécessite une étude approfondie impliquant entre autres différents domaines de recherche comme la climatologie, l'hydrographie et la géomorphologie. Plus particulièrement, différentes questions méritent d'être posées. Quelle était la probabilité qu'un tel évènement arrive ? Y a-t-il un lien avec le réchauffement climatique ? Doit-on s'attendre à revivre ce genre d'évènement dans les prochaines décennies ? Comment limiter les dégâts dans le futur si un tel évènement survient une nouvelle fois ? Ces questions concernent aussi bien les scientifiques, les milieux politiques ainsi que la population dans son ensemble. En outre, d'autres questions susceptibles d'intéresser spécifiquement les spécialistes de la modélisation climatique restent ouvertes et peu explorées jusque maintenant. Parmi celles-ci, nous pouvons en citer quelques unes comme :

- Quel est l'impact du Massif ardennais sur les précipitations ayant conduit aux inondations ? Un soulèvement orographique d'une masse d'air humide aurait-il été la principale source d'intenses pluies ?
- Quelle influence a la résolution d'un RCM (*Regional Climate Model*) sur la reconstruction de cet évènement ?
- D'autres vallées, ardennaises ou non, peuvent-elles expérimenter de si intenses précipitations avant la fin du siècle ? Les projections faites par les RCM et les GCM (*Global Circulation Model*) s'accordent-elles dans ce contexte ?

Ces questions constituent le point de départ de notre recherche. Dans ce présent mémoire, nous analyserons le lien unissant la résolution spatiale des modèles et leur capacité à prédire des évènements aussi extrêmes. En outre, nous essayerons de quantifier l'impact du Massif ardennais sur la création d'extrêmes précipitations. Enfin, en analysant les projections faites par un modèle régional et des GCM, nous déterminerons si ces derniers prédisent d'autres évènements d'ampleur similaire dans la vallée de la Vesdre et celle de la Dyle.

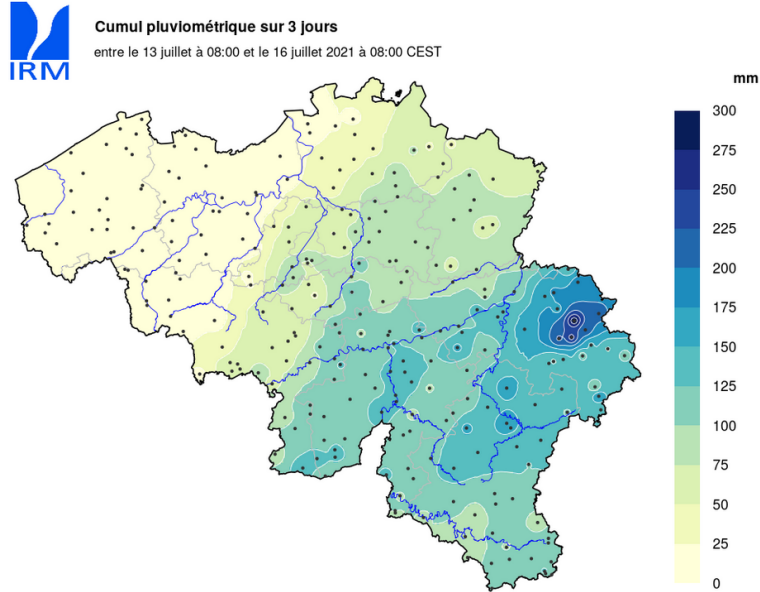


FIGURE 1 – Cumul des précipitations du 13 juillet 2021 08 :00 au 16 juillet 2021 08 :00
Figure tirée de IRM (2021a).

1.2 Contenu du mémoire

Le prochain chapitre consiste en une brève revue de la littérature portant sur les événements de juillet 2021. Nous pourrons ainsi comprendre les différents phénomènes ayant conduit à une telle catastrophe, en mettant en évidence les facteurs ayant aggravé la situation. Ce chapitre est essentiel pour nous permettre de déterminer si une situation similaire est susceptible de se reproduire dans les prochaines décennies.

Le troisième chapitre explique la méthodologie employée dans ce mémoire pour répondre aux questions de recherche. Nous y détaillerons davantage les objectifs cités précédemment. Les modèles climatiques utilisés seront également décrits ainsi que les différentes simulations réalisées avec un modèle climatique régional. Finalement, la méthode utilisée pour analyser les événements extrêmement pluvieux prédits par les différentes projections sera également explicitée.

Le quatrième chapitre est le plus conséquent car nous y décrirons tous les résultats obtenus. Ce chapitre sera divisé en quatre sous-sections. La première, plus technique, sera susceptible d'intéresser les experts de la modélisation climatique car elle traitera du lien entre la réso-

lution spatiale d'un RCM et la reconstruction des évènements de juillet 2021. La deuxième analysera si un soulèvement orographique d'une masse d'air humide par le Massif ardennais a été un important facteur aggravant. La troisième et quatrième sous-sections s'intéresseront respectivement aux projections dans la vallée de Vesdre et de la Dyle. A l'aide de 3 modèles de circulation générale et d'un modèle régional, nous déterminerons si d'autres évènements d'intensité similaire sont susceptibles de se reproduire avant la fin du siècle en fonction des différents scénarios de réchauffement climatique possibles. De nombreuses cartes et tableaux y seront présentés pour permettre une rapide compréhension des résultats.

Pour terminer, le dernier chapitre contient la conclusion générale de ce mémoire.

2 État de l’art

2.1 Description des conditions climatiques ayant conduit aux inondations de juillet 2021

Les intenses précipitations de juillet 2021, et plus particulièrement les inondations en résultant, sont l’une des catastrophes climatiques les plus coûteuses des 50 dernières années, avec un coût s’élevant à 32 milliards pour l’Union européenne (MOHR et al., 2023). Ces dernières résultent d’une succession d’événements météorologiques ainsi que de plusieurs facteurs aggravants.

Pour commencer, le mois de juin précédant ces événements avait été particulièrement humide dans le bassin de la Meuse. En conséquence, avant même l’arrivée d’intenses pluies, le sol était déjà proche de la saturation dans certaines régions, limitant dès lors la capacité d’absorption du sol (KREIENKAMP et al., 2021).

Le 12 juillet, un creux barométrique d’haute altitude s’étendait de l’ouest de la Manche jusqu’aux îles Baléares. Celui-ci voit son mouvement vers l’est être bloqué par un anticyclone pratiquement stationnaire présent depuis trois semaines au nord-est de l’Europe. Ce creux, entraînant une divergence de l’air en altitude sur son côté est, a favorisé la création d’une circulation cyclonique en surface. Conséquemment, la pression a commencé à diminuer, créant le système dépressionnaire nommé “Bernd” (MOHR et al., 2023).

Bernd constituait ce que les météorologues appellent une goutte froide. Il s’agit d’une dépression isolée du reste de la circulation atmosphérique présentant un air froid en altitude. Dans son lent mouvement, le centre de la dépression s’est déplacé au travers des Alpes du sud de la Suisse vers le sud de l’Allemagne, avant de progressivement se déplacer vers l’ouest. La figure 2 illustre bien ce phénomène, où nous observons distinctement une situation dépressionnaire en altitude.

Quant à la provenance de l’eau contenue dans l’air ayant servi de réservoir aux intenses précipitations, deux origines sont avancées par la littérature. KREIENKAMP et al. (2021) affirme que l’air en surface au-dessus de la Méditerranée et du nord de l’Europe était chaud,

augmentant ainsi sa capacité à contenir de l'eau. En revanche, MOHR et al. (2023) priorise une origine venant de la mer du Nord et la mer Baltique. Une anomalie de la température de surface de l'eau pouvant monter jusqu'à 8°C a été relevée pendant cette période. Il s'agit d'une conséquence des conditions météorologiques ensoleillées créées par l'anticyclone situé au nord-est de l'Europe. Néanmoins, les deux études s'accordent à dire que la première source d'humidité serait une évaporation accrue d'eau de mer. Cette humidité est arrivée dans nos régions par un mouvement de rotation autour de la dépression.

Outre cette situation atmosphérique exceptionnelle, différents facteurs aggravants ont conduit à la création de précipitations extrêmes. Le premier facteur aggravant est lié au système frontal de Bernd. Une occlusion quasi stationnaire est restée pendant trois jours au-dessus du bassin de la Vesdre, entraînant des précipitations incessantes (FETTWEIS & DOUTRELOUP, 2022). Le deuxième facteur aggravant est l'air froid situé en altitude dans le système Bernd. Une goutte froide génère des mouvements convectifs ascendants de la masse d'air, conduisant à la saturation de celle-ci (FETTWEIS & DOUTRELOUP, 2022). Le troisième facteur est le Massif ardennais qui a eu un effet de barrière, entraînant un soulèvement orographique de la masse d'air humide provenant du nord-est. (FETTWEIS et DOUTRELOUP (2022), MOHR et al. (2023), KREIENKAMP et al. (2021)). En s'élevant, cet air s'est refroidi, et donc condensé. Le quatrième facteur est l'instabilité partielle de la dépression, conduisant à la présence de précipitations convectives (courtes et intenses) au sein des précipitations majoritairement stratiformes (MOHR et al. (2023), FETTWEIS et DOUTRELOUP (2022)).

Ces facteurs ont induit des cumuls supérieurs à 200 mm sur 2 jours dans certaines régions du bassin de la Vesdre. DEWALS et al. (2021) estime d'ailleurs une période de retour largement supérieure à 200 ans pour le volume de précipitations mesuré à Jalhay. En outre, 197 communes wallonnes ont reçu des quantités extrêmes de précipitations.

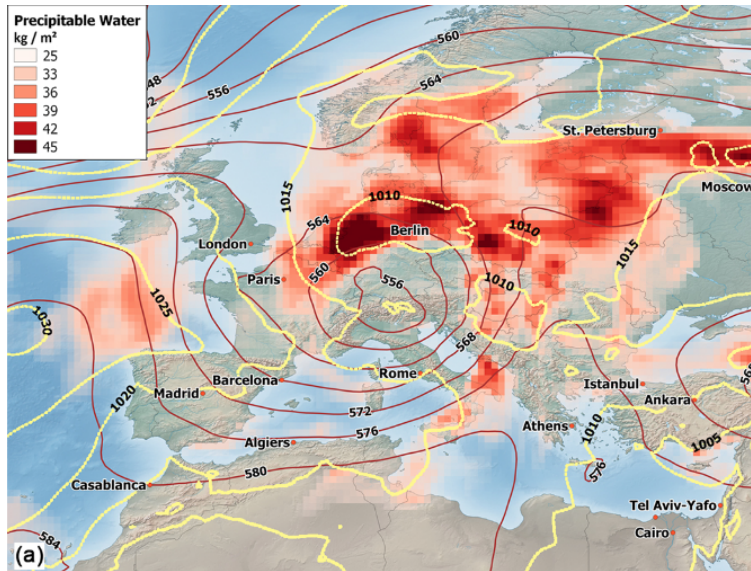
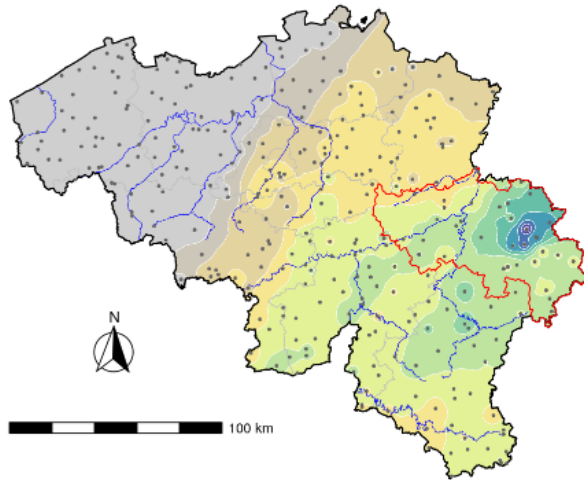


FIGURE 2 – Isohypses à 500 hPa (contours rouges continus, en gpdm), pression au niveau de la mer (contours jaunes discontinus, en hPa) et total d’eau précipitable (teinte rougeâtre, en kg/m^2) le 14 juillet 2021 12 :00UTC. Les données sont fournies par ERA5. Figure tirée de MOHR et al. (2023).

2.2 Reconstruction des cumuls pluviométriques

JOURNÉE et al. (2023) ont reconstruit la distribution spatiale du cumul des précipitations du 13 juillet au 16 juillet 2021. À cette fin, cette étude a employé deux méthodes. La première consiste à réaliser une interpolation sur la Belgique des données fournies par des pluviomètres répartis sur le territoire. La seconde utilise des données provenant de radars météorologiques. La figure 3 montre les résultats obtenus par ces deux méthodes. Bien que similaires, celles-ci présentent de légères différences. Pour la vallée de la Vesdre, la première méthode nous donne, en moyenne, un cumul de 189 mm/3jours contre 178,4 mm/3jours obtenus grâce à la seconde méthode.

a. IDW interpolation of rain gauges observations



b. radar product (RADFLOOD21)

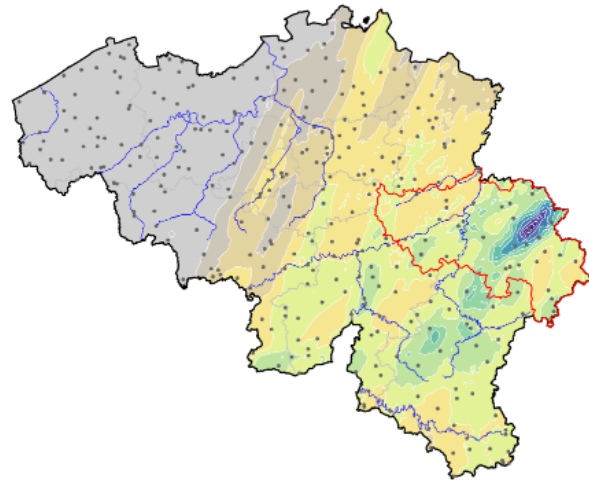


FIGURE 3 – Distribution spatiale du cumul pluviométrique du 13 juillet (06h) au 16 juillet (06h) 2021. La figure de droite a été obtenue à partir d’une interpolation des données fournies par des pluviomètres et la figure de gauche par l’utilisation de données radar. Figure tirée de JOURNÉE et al. (2023).

3 Méthodologie

3.1 Le Modèle MAR

3.1.1 Description Générale du MAR

Le MAR est initialement un RCM destiné à l’analyse des régions polaires, développé dans un premier temps pour représenter le vent catabatique au-dessus de la baie de Terra Nova en 1994 (GALLEE & SCHAYES, 1994). Le modèle a ensuite été utilisé pour l’étude de la calotte glaciaire du Groenland (GALLÉE et al., 1995), avant d’être adapté pour les régions tempérées (BRASSEUR (2001); BRASSEUR et al. (2002)) puis pour les régions tropicales (BRASSEUR et al. (1998); GALLÉE (2004)).

Il s’agit d’un modèle hydrostatique qui résout les équations primitives comme décrit dans GALLEE et SCHAYES (1994). La convection est paramétrisée en utilisant un schéma convectif décrit dans BECHTOLD et al. (2001). La partie atmosphérique du MAR est complètement décrite dans GALLEE et SCHAYES (1994) et GALLÉE et al. (1995). En outre, le MAR est couplé avec un modèle de transfert unidimensionnel végétation-atmosphère SISVAT (Soil Ice Snow Vegetation Atmosphere Transfer) décrit dans RIDDER et GALLÉE (1998). La partie neige-glace de SISVAT est le modèle neigeux CROCUS du CEN (Centre d’Études de la neige) décrit dans BRUN et al. (1992).

Comme décrit dans KITTEL (2021), le modèle MAR est constitué de deux composantes majeures :

- Un noyau dynamique qui résout les équations primitives (conservation de la masse, de l’impulsion et de l’énergie) ainsi que d’autres équations relatives à l’atmosphère. C’est la partie du modèle qui résout les mouvements horizontaux et ceux à grande échelle.
- Un noyau heuristique pour tous les autres processus non représentés dans le cœur dynamique. Dans ce dernier sont comprises les paramétrisations et les équations physiques relatives à la turbulence, à la convection, aux échanges de chaleur par radiation, aux changements de phase de l’eau, etc.

MAR, comme tout modèle régional, ne simule les processus atmosphériques que sur une certaine région restreinte du globe terrestre comme la Belgique ou le Groenland. Cela impose que le modèle doit être forcé à ses frontières par un GCM ou par des réanalyses. Ces conditions limites imposées aux extrémités de la grille utilisée par le modèle permettent de considérer des processus météorologiques d'échelles continentales ou planétaires. Également, la variabilité climatique provoquée par différents forçages naturels comme anthropiques peut être prise en compte. Durant une simulation, ces conditions limites aux frontières du domaine (la température, le vent, l'humidité et la pression à tous les niveaux de pression du MAR) sont fournies toutes les six heures. Une interpolation linéaire est effectuée à chaque forçage du modèle pour éviter une transition temporelle abrupte entre le précédent forçage et le suivant (KITTEL, 2021).

Au cours du temps, différentes versions de ce modèle ont été développées. Dans ce mémoire, ce sont les versions 3.12 et 3.13⁴ du MAR qui ont été utilisées. Celles-ci ont été développées par le Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège.

3.1.2 Description du schéma convectif et du schéma de la microphysique des nuages

La représentation du cycle hydrologique inclut un schéma de la microphysique des nuages qui résout l'équation de conservation de l'humidité spécifique, des concentrations des gouttelettes et cristaux de glace contenus dans les nuages, des gouttes de pluie et des particules de neige. En particulier, les processus microphysiques des nuages sont essentiellement fondés sur KESSLER (1969) et ceux de la glace sur LIN et al. (1983). Ce schéma est entièrement responsable de la création des précipitations stratiformes.

Le MAR utilise l'approximation hydrostatique : seuls le poids et la poussée d'Archimède interviennent dans le bilan de forces vertical. Les autres forces verticales sont considérées comme négligeables. Seuls des petits mouvements verticaux en lien avec les variations topographiques sont permis, bien que ceux-ci restent négligeables par rapport aux mouvements horizontaux. Ainsi, la convection qui est un mouvement principalement vertical de la masse d'air résultant d'un profil de température atmosphérique instable n'est pas explicitement

4. Dans la suite de ce mémoire, nous utiliserons les notations "v12" et "v13" pour parler de ces deux versions.

représentée.

La convection dans le MAR est établie à partir d'une version modifiée⁵ du schéma convectif développé par BECHTOLD et al. (2001). Il s'agit d'un schéma de flux de masse dont l'objectif est de calculer les interactions entre des ensembles de cumulus et leur environnement à grande échelle, lui-même divisé en parties couvertes de cumulus et en parties dégagées. L'objectif d'un tel schéma est d'augmenter la stabilité d'une masse d'air instable pour atteindre un état d'équilibre. Cet équilibrage conduit à une production de précipitations, appelées précipitations convectives (DOUTRELOUP et al., 2019). Pour rentrer un peu plus dans les détails, le schéma convectif du MAR va déterminer si l'atmosphère est instable dans certaines conditions. Si tel est le cas, le schéma convectif va tenter de rétablir l'équilibre en représentant implicitement des mouvements verticaux et en induisant des concentrations d'hydrométéores ainsi que des changements de température. De tels ajustements peuvent être responsables de la création de précipitations solides et liquides. On considère que l'équilibre est atteint quand 90 % de l'énergie potentielle convective initialement présente a été transformée (KITTEL, 2021).

Dans ce schéma convectif, les précipitations convectives sont supposées toucher le sol instantanément, l'interaction avec leur environnement n'y est pas considérée. Ces dernières sont la conséquence de processus différents de ceux modélisés dans le schéma de la microphysique des nuages. (KITTEL, 2021).

Il est à noter que le schéma convectif n'intervient pas dans lorsque des simulations sont effectuées avec une résolution égale ou plus fine à 5 km. Dans ce cas, le MAR va générer ses propres précipitations convectives de manière explicite. En d'autres termes, le schéma de la microphysique des nuages génère aussi bien les précipitations stratiformes que convectives. Dès lors, on peut considérer que le MAR se comporte comme un CPM (Convective-Permitting model). En revanche, le schéma convectif sera bien actif pour des résolutions moins fines, ce dernier ayant été conçu pour des résolutions de l'ordre de 10 km.

5. Différents ajustements et optimisations de paramètres ont été réalisés en comparaison avec la version originale (DOUTRELOUP et al., 2019).

3.2 Description des GCM et des réanalyses utilisés

Comme expliqué dans la section précédente, le MAR doit être forcé à ses frontières latérales par des GCM ou des réanalyses. Nous donnons ici une rapide description de ceux utilisés dans ce mémoire.

Les différents GCM du CMIP6⁶ utilisés :

- MIROC6 : GCM spectral T85, ayant une résolution spatiale de $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ (≈ 100 km x 150 km à hauteur de la Belgique) (TATEBE et al., 2019) ;
- MPI-ESM1-2-HR : GCM spectral T127, ayant une résolution spatiale de $0.93^\circ \times 0.93^\circ$ (≈ 66 km x 103 km à hauteur de la Belgique) (GUTJAHR et al., 2019) ;
- NOR-ESM2-MM : GCM à grille régulière, ayant une résolution spatiale de $1.25^\circ \times 0.94^\circ$ (≈ 88 km x 104 km à hauteur de la Belgique) (SELAND et al., 2020) .

Parmi les différents GCM du CMIP6, ceux-ci sont les plus représentatifs pour réaliser des projections sur l’Europe (FETTWEIS & DOUTRELOUP, 2022). Bien qu’ils aient des résolutions différentes, celles-ci restent dans tous les cas très grossières. En moyenne, la Belgique est représentée par approximativement cinq points de grille. La topographie est également moins bien estimée, celle-ci étant moyennée sur de grandes surfaces. L’altitude maximale du Massif ardennais ne dépasse ainsi jamais les 250 mètres. Nous verrons plus tard l’importance de ce lissage orographique dans la prédiction d’évènements extrêmes dans les vallées ardennaises.

Pour les 22 simulations réalisées dans le cadre de différents tests de sensibilité au Massif ardennais et à la résolution, le MAR a été forcé par les réanalyses ERA5. Celles-ci constituent la cinquième génération des réanalyses produites par l’ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) remplaçant la précédente génération, les réanalyses ERA-Interim. Au contraire de ces dernières, ERA5 fournit des données horaires jusqu’en 1940 pour un grand nombre de variables physiques relatives à l’atmosphère ou aux océans. Les données des réanalyses ERA5 sont discrétisées sur une grille régulière en longitude/latitude, avec une résolution de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ et 37 niveaux verticaux (HERSBACH et al., 2020). Le choix des ERA5 repose sur une étude de WYARD et al. (2017) qui avait démontré que l’utilisation des ERA-Interim pour forcer le MAR produisait la meilleure concordance entre les

6. Coupled Model Intercomparison Project “sixième phase” ou sixième projet d’inter-comparaison de modèles couplés en français. Ce projet regroupe une trentaine de GCM ayant servi dans l’élaboration du dernier rapport du GIEC (IPCC, 2021).

observations météorologiques au sol et les résultats des simulations produites par le MAR. (DOUTRELOUP et al., 2019).

3.3 Description de la zone d'étude

3.3.1 Motivations

Comme évoqué dans l'introduction, nous allons nous intéresser à deux vallées : celle de la Vesdre et celle de la Dyle. Le choix de ces vallées repose sur des critères différents. Pour la Vesdre, le choix est naturel par l'intensité des précipitations relevées pendant les événements de juillet 2021 et de l'importance des dégâts provoqués par les inondations. En outre, son inclusion au sein du Massif ardennais ainsi que sa proximité avec les points culminants de la Belgique en font une aire d'étude idéale. Nous pourrions ainsi déterminer si le Massif ardennais a été déterminant dans la création d'intenses précipitations. Quant à la vallée de la Dyle, la littérature portant sur les extrêmes pluvieux dans cette région est pratiquement inexistante, au contraire de la Vesdre qui a déjà été analysée par certaines études. Cependant, des inondations y ont également été recensées succédant avec un jour de retard celles dans les vallées ardennaises. En conséquence, il est tout aussi important d'analyser si de tels aléas climatiques peuvent s'y reproduire avant la fin du siècle en fonction des différents scénarios de réchauffement climatique global. En outre, son éloignement des Ardennes suppose une absence d'amplification des précipitations par soulèvement orographique. Également, il est intéressant de se demander si les extrêmes pluvieux dans ces deux vallées sont corrélés.

3.3.2 Description de la vallée de la Vesdre

La Vesdre est une rivière s'écoulant dans la province de Liège, traversant entre autres les villes d'Eupen, de Pepinster et de Verviers. Celle-ci a une longueur de 72,5 km et son bassin versant a une superficie de 700 km^2 . Elle est un affluent de l'Ourthe, qui elle-même en est un de la Meuse. La figure 5 montre l'emplacement de la vallée de la Vesdre ainsi que les vallées voisines, celles de l'Ourthe et de l'Amblève, qui ont été également affectées par les intenses précipitations de juillet 2021.

3.3.3 Description de la vallée de la Dyle

La Dyle est une rivière traversant principalement les deux provinces brabançonnnes. Parmi les villes situées sur son parcours, on peut notamment citer Wavre, Louvain ou encore Malines. Elle mesure 86 km et l'aire de son bassin versant est de 1 289 km^2 . Elle se jette dans le Rupel, affluent de l'Escaut. Contrairement à la plupart des vallées touchées par les inondations de juillet 2021, il s'agit d'une vallée qui n'est pas incluse dans le bassin de la Meuse. La figure 4 montre le bassin versant de la Dyle jusqu'à Louvain. Celui-ci s'étend au delà de cette ville flamande mais, pour des raisons que nous expliquerons ultérieurement, nous nous cantonnerons à la partie représentée sur la figure 4.

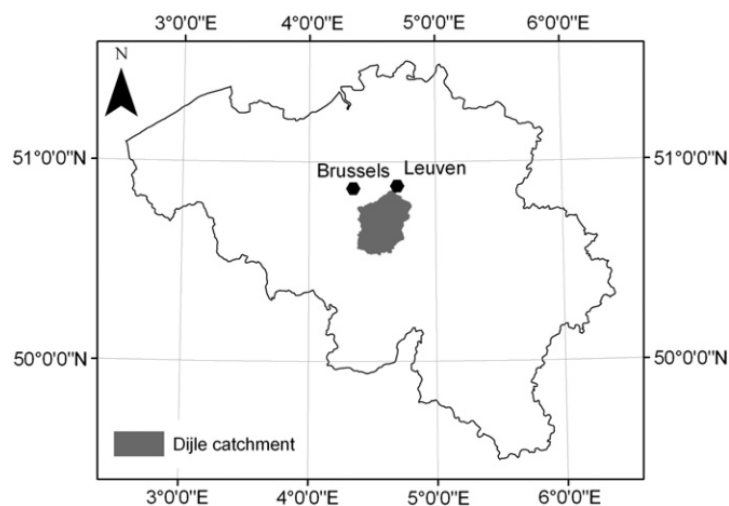


FIGURE 4 – Localisation du bassin versant de la Dyle (limité jusqu'à Louvain). Figure tirée de NOTEBAERT et al. (2011).

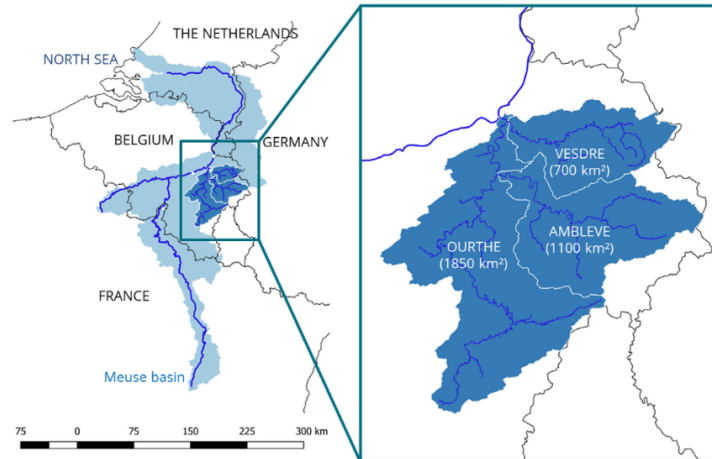


FIGURE 5 – Bassin de la Meuse avec agrandissement sur les bassins versants de la Vesdre, de l’Amblève et de l’Ourthe. Figure tirée de DEWALS et al. (2021).

3.3.4 Création des masques

Tous les modèles utilisés présentent leurs résultats sous forme d’une grille régulière, avec des résolutions variant en fonction des modèles. En revanche, dans le cadre de ce mémoire, seuls certains pixels de ces grilles nous intéressent. Plus précisément, seuls ceux recouvrant la vallée de la Dyle ou de la Vesdre sont pertinents dans notre étude. Pour isoler ces points de grille, des masques ont été créés. Un masque est une variable spatiale constante définie sur l’ensemble de la grille d’un modèle qui ne peut prendre que deux valeurs : 0 ou 1. Les points de grille dont la valeur de cette variable vaut 1 sont ceux qui recouvrent, entièrement ou partiellement, une vallée. Chaque vallée peut ainsi être isolée facilement de l’ensemble de la grille. Il devient alors aisé de réaliser des statistiques ou de détecter des événements extrêmes sur ces différentes aires.

Pour les GCM, leur résolution rend la création de tels masque triviale. Dans la plupart des cas rencontrés, un seul pixel se superpose à chaque vallée étudiée. Au contraire, si une vallée se trouve à l’intersection de plusieurs pixels, celui recouvrant la majorité du bassin versant est sélectionné. Il est à noter que de telles résolutions impliquent une large supériorité de l’aire des pixels sur celles des vallées étudiées. Les premières varient d’environ 6 800 km² à 15 000 km², et les dernières de 700 à 1 300 km². Cela donne un premier aperçu du principal défaut des GCM. Ceux-ci ne permettent pas d’étudier précisément des phénomènes climatiques à une échelle similaire à nos régions d’intérêt. Ce point sera abordé en détail dans la partie

analysant les résultats de ce mémoire.

En revanche, l'exercice se révèle être d'une complexité supérieure pour la grille du MAR. Dans la plupart des cas, nous avons travaillé avec une résolution de 5 km ou de 7,5 km, soit des pixels avec une aire de 25 km² ou de 56,25 km². Pour la Vesdre, cela signifie que nous devons isoler environ 28 ou 12 pixels. La méthode employée pour définir les masques consiste à utiliser une carte de la topographie de la Belgique avec une résolution d'1 km et de venir y afficher le contour de l'ensemble des pixels ayant une "valeur de masque" égale à 1. Comme montré sur la figure 6, l'objectif est de superposer ce contour aux crêtes délimitant les bassins versants. Évidemment, la résolution du MAR nous empêche de parfaitement isoler les différentes vallées. Parfois, une petite partie d'une vallée voisine sera incluse à l'intérieur du contour, et sera donc considérée dans les calculs ultérieurs. À l'inverse, certains morceaux des aires d'intérêt en seront exclus. Néanmoins, on peut considérer qu'en bonne approximation, cette méthode permet de délimiter les vallées.

Cependant, cette méthode ne marche pas pour tous les bassins versants. Un problème plus important survient si l'on tente de réaliser le même procédé dans des régions constituées de plaines dans lesquelles une absence de relief se fait remarquer. La résolution de la carte topographique utilisée dans ce mémoire est trop faible pour y repérer les crêtes. Cette problématique a été rencontrée en délimitant la vallée de la Dyle où en aval de Louvain, il n'était plus possible de séparer un bassin d'un autre avec une précision suffisante. Pour pallier ce souci, nous avons décidé de ne pas prolonger notre étude au-delà de Louvain. En conséquence, notre analyse des précipitations extrêmes concerne uniquement la partie wallonne et une fraction de la Flandrienne. La figure 7 montre le contour des deux régions étudiées.

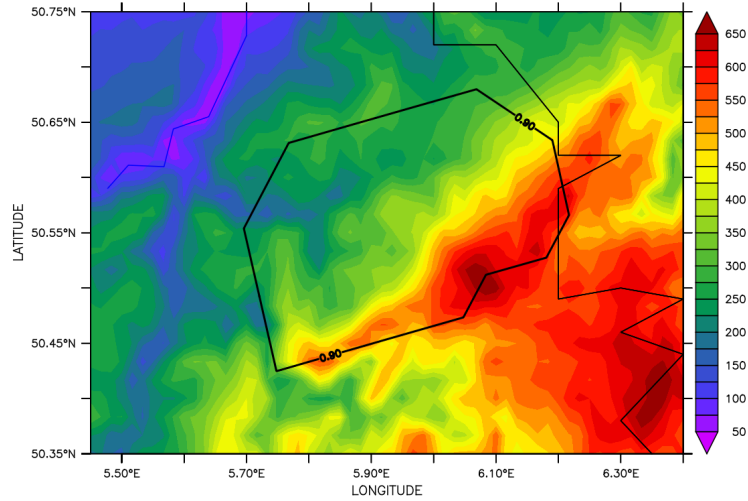


FIGURE 6 – Le polygone noir représente la délimitation du bassin versant de la Vesdre réalisée sur une grille du MAR avec une résolution spatiale de 5 km. En fond de carte est illustrée la topographie (en m) avec une résolution d’1 km. La fine ligne noire représente la frontière avec l’Allemagne.

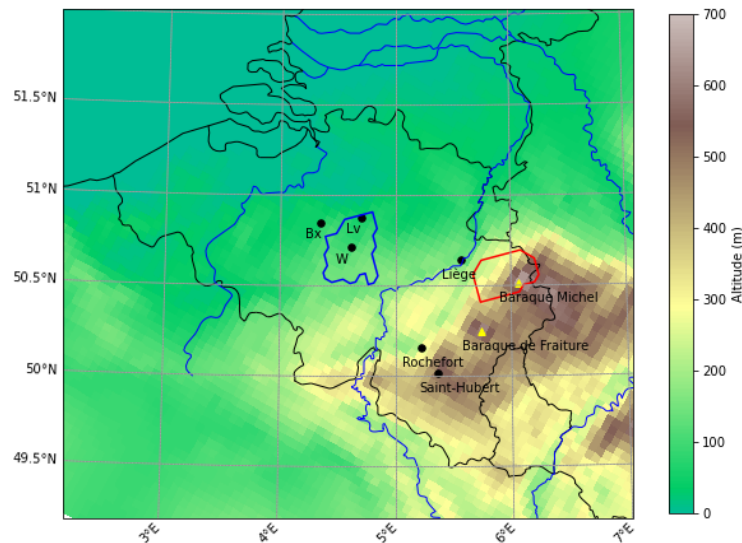


FIGURE 7 – Le polygone rouge délimite le bassin versant de la Vesdre et le bleu la partie de celui de la Dyle étudiée dans ce mémoire. Les deux délimitations ont été réalisées à 5 km de résolution. La topographie du MAR à 5 km est montrée en fond de carte. Certains lieux couramment cités ou pouvant servir de point de repère sont également repris sur la carte (W = Wavre, Lv = Louvain, Bx = Bruxelles).

3.4 Tests de sensibilité

À l'aide du modèle MAR, nous avons réalisé différentes simulations dans l'objectif de pouvoir répondre aux questions de recherche de ce mémoire. En d'autres termes, ces simulations vont nous permettre de déterminer la sensibilité du MAR face à la variation de certains paramètres comme la résolution de la grille utilisée ou l'altitude maximale du relief ardennais. Dans cette section, nous allons détailler l'ensemble des simulations faites et expliciter la raison de leur réalisation.

3.4.1 Impact de la résolution du MAR sur la prédiction d'intenses précipitations

En réalisant un domaine régional pour y réaliser des simulations, un utilisateur du MAR peut choisir la résolution à laquelle il souhaite l'intégration sur son domaine. Dans le cas d'un événement extrêmement pluvieux, il est utile de se demander si des différences significatives peuvent être observées entre différents domaines, centrés sur le même point, intégrés sur la même période temporelle, mais de résolution différente. À cette fin, huit simulations ont été réalisées avec le MAR v12 forcé par ERA5 sur une période s'étalant de mai à fin juillet 2021. La résolution a été progressivement dégradée, passant de 5 km à 50 km. Systématiquement, les moyennes spatiales sur les vallées étudiées de la somme des précipitations du 13 au 15 juillet 2021 compris ont été calculées. En outre, des cartes représentant la somme des précipitations sur cette même période ont été créées.

Pour analyser les précipitations, deux variables générées par le MAR ont été extraites, l'une correspondant aux précipitations liquides, l'autre aux précipitations solides. Tout au long de ce mémoire, la somme de celles-ci a été réalisée et nous parlerons de précipitations au sens général. Comme expliqué précédemment, le schéma convectif va intervenir dans toutes les simulations à l'exception de celle avec une résolution de 5 km. Le MAR fournit une variable représentant uniquement les précipitations générées par le schéma convectif. Celle-ci sera également analysée pour déterminer la sensibilité du schéma convectif à la résolution.

3.4.2 Impact du Massif ardennais

Pour déterminer si les Ardennes ont eu l'effet d'une barrière sur la masse d'air humide venant du nord-est de la Belgique, différentes simulations ont été réalisées avec le MAR.

Dans un premier temps, nous avons utilisé MAR v13 forcé par ERA5 et nous avons attribué une résolution de 5 km à tous les domaines réalisés. La période simulée et les moyennes calculées sont les mêmes que celles décrites précédemment. Les domaines d'intégration, bien que semblant être identiques au premier abord, diffèrent par leur topographie. Progressivement, nous avons diminué l'altitude maximale que peut avoir un pixel en établissant différents seuils. Pour entrer dans les détails, une simulation de référence avec une topographie inchangée a été effectuée. Ensuite, nous avons fixé l'altitude maximale à 500 mètres puis nous l'avons réduite par pas de 100 mètres. En conséquence, la Belgique se retrouve totalement dépourvue de relief dans la dernière simulation, où l'ensemble des pixels de la grille ont une altitude de 0 mètre. Nous ajouterons que lorsqu'un seuil a été fixé, celui-ci concerne l'ensemble des points de grille, aussi bien ceux en Belgique que ceux dans les pays limitrophes.

Dans un second temps, nous avons effectué exactement le même travail, mais avec une résolution de 7,5 km et avec la version 3.12 du MAR. Dans ces simulations, le schéma convectif sera actif et nous analyserons si les résultats rejoignent ceux obtenus avec MAR v13 à 5 km de résolution.

La modification de la topographie n'a pas été effectuée en changeant le code du MAR, mais en adaptant très légèrement celui de NESTOR (Nesting Organization for the preparation of meteorological and surface fields). NESTOR s'occupe d'initialiser les grilles utilisées par le MAR et du forçage aux frontières du domaine. Par conséquent, générer la topographie d'une grille est l'une de ses fonctions. Une condition supplémentaire a été ajoutée dans le code pour diminuer l'altitude des points de grille au seuil fixé si celle-ci en était supérieure.

Contrairement aux tests de sensibilité liés à la résolution, les variables relatives au vent ont également été extraites et plus particulièrement celles donnant les composantes du vent en fonction des niveaux de pression. L'intérêt réside dans la détermination d'un éventuel impact de la disparition progressive du Massif ardennais sur la circulation atmosphérique.

3.5 Projections dans la vallée de la Dyle et de la Vesdre

Le dernier objectif de ce mémoire est de déterminer si des événements pluvieux d'ampleur comparable à celle de juillet 2021 sont susceptibles de se produire avant la fin du siècle.

Néanmoins, nous sommes dans un contexte de réchauffement climatique et la capacité de l'humanité à mitiger le réchauffement climatique reste incertaine. Or, son intensité sera déterminante sur l'impact des processus climatologiques comme le cycle de l'eau. Évidemment, un réchauffement global de 2 °C aura différentes conséquences que si nous atteignons les 4 °C à fin du siècle. Pour prendre ce facteur en considération, les scénarios SSP (*Shared Socio-economic Pathways*) tels que définis par le GIEC (*Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*) ont été utilisés. Ceux-ci prédisent l'évolution de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère en fonction des différents choix économiques et sociaux que l'humanité réalisera dans les prochaines décennies. Ces scénarios permettent de forcer les différents GCM du CMIP6 sur une période s'étalant de 2015 à 2100. L'évolution du climat projetée par ces différents modèles dépendra donc de l'évolution de la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les scénarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5⁷ correspondent approximativement à un réchauffement planétaire pour la fin du siècle de 1,8 °C, 2,7 °C, 3,6 °C et 4,4 °C.

Pour réaliser cet objectif, les projections réalisées par les GCM décrits précédemment et par le MAR forcé par ces derniers⁸ ont été utilisées. Pour chacune d'entre elles, la méthodologie suivante a été appliquée pour chaque vallée :

- Calcul de la moyenne spatiale des précipitations cumulées sur 3 jours et de l'écart type correspondant sur la période de référence allant de 1980 à 2014.
- Recherche de l'ensemble des événements pluvieux dont la moyenne spatiale de la somme des précipitations sur 3 jours est supérieure à 100 mm. En outre, ceux pour lesquels cette valeur excède 150 mm sur 3 jours constituent une catégorie à part entière.
- Utilisation de la moyenne et de l'écart type calculé au premier point pour déterminer la déviation de ces événements par rapport à la moyenne de la période de référence.
- Pour chaque événement extrême, réalisation de cartes du cumul des précipitations sur

7. Les deux premiers scénarios modélisent la trajectoire suivie par la concentration de gaz à effet si l'humanité respecte les accords de Paris (COP21) ou les accords de Glasgow (COP26) respectivement. Le scénario SSP3-7.0 est un scénario intermédiaire où les émissions de gaz à effet de serre continuent d'être importantes tout au long du siècle. Enfin, le scénario SSP5-8.5 représente un monde dans lequel aucun changement économique et social a été effectué.

8. Dans la suite de ce mémoire, nous utiliserons la notation suivante pour exprimer les couples MAR-GCM : MAR-NOR signifie MAR forcé par NOR-ESM2, qu'importe le scénario SSP. MAR-NOR245 signifie MAR forcé par NOR-ESM2, lui-même forcé par le scénario SSP2-4.5. La même notation est utilisée pour les autres GCM et scénarios.

les 3 jours à l'échelle de la Belgique avec le MAR. Utilisation des données des GCM pour représenter la moyenne de la vitesse du vent à 700 hPa⁹ et le même cumul à l'échelle européenne.¹⁰

- Comparaison systématique entre le MAR et les GCM pour tous les événements. Pour tous ceux simulés par le MAR, nous regarderons si le GCM correspondant prédit également d'intenses précipitations au même moment et vice-versa.

Pour la vallée de la Vesdre, une étape supplémentaire a été réalisée. Concrètement, la démarche décrite ci-dessus a été doublement réalisée. Nous avons utilisé le MAR v12 avec une résolution de 7,5 km et le MAR v13 avec une résolution de 5 km et nous les avons comparés de la même manière dont nous l'avons fait avec le MAR et les GCM. Nous pourrions analyser si des différences significatives apparaissent entre les deux versions utilisées, dont une où le schéma convectif a été actif, et l'autre où l'ensemble des précipitations sera calculé explicitement comme expliqué dans la section 3.1.2.

Les avantages de cette méthode sont multiples. Outre nous permettre de prédire si la population belge doit s'attendre à rencontrer des précipitations semblables à celles mesurées en juillet 2021, nous pourrions déterminer quelles sont les circulations atmosphériques favorables à leur production. En d'autres termes, nous analyserons si de futures situations de blocage semblables à celle observée en juillet 2021 domineront la création de ces phénomènes ou si, à l'inverse, une circulation synoptique totalement différente est également capable d'apporter ces précipitations dévastatrices. Un autre avantage réside dans la comparaison entre le MAR et les GCM qui nous permettra de déterminer si les RCM disposent d'un avantage sur les modèles à faible résolution spatiale dans la prédiction d'extrêmes précipitations.

9. 700 hPa fait implicitement référence au niveau de pression.

10. Bien qu'implicitement formulé ici, le GCM utilisé pour réaliser les cartes à l'échelle de l'Europe est évidemment le même que celui utilisé pour forcer le MAR. À titre d'exemple, si MAR-MPI détecte un événement extrêmement pluvieux le 26 juillet 2067 au cas où nous suivrions le scénario SSP3-7.0, nous utiliserons alors les données de MPI-ESM1-2-HR forcé par ce même scénario pour réaliser les cartes à l'échelle de l'Europe de l'Ouest.

3.6 Résumé des tests de sensibilité

Acronyme	Version utilisée	Seuil pour la topographie	Résolution
Sensibilité à la résolution			
MAR12-5km	12	/	5 km
MAR12-7.5km	12	/	7.5 km
MAR12-10 km	12	/	10 km
MAR12-15km	12	/	15 km
MAR12-20km	12	/	20 km
MAR12-30km	12	/	30 km
MAR12-40km	12	/	40 km
MAR12-50km	12	/	50 km
Sensibilité au Massif ardennais			
MAR13-600m	13	/	5 km
MAR13-500m	13	500 m	5 km
MAR13-400m	13	400 m	5 km
MAR13-300m	13	300 m	5 km
MAR13-200m	13	200 m	5 km
MAR13-100m	13	100 m	5 km
MAR13-0m	13	0 m	5 km
MAR12-600m	12	/	7.5 km
MAR12-500m	12	500 m	7.5 km
MAR12-400m	12	400 m	7.5 km
MAR12-300m	12	300 m	7.5 km
MAR12-200m	12	200 m	7.5 km
MAR12-100m	12	100 m	7.5 km
MAR12-0m	12	0 m	7.5 km

TABLE 1 – Résumé des tests de sensibilité. Les acronymes ne font pas référence au forçage du MAR par ERA5, celui-ci étant sous-entendu.

4 Présentation des résultats et discussions

4.1 Tests de sensibilité à la résolution

Cette section vise à expliciter les résultats obtenus par les simulations effectuées avec différentes résolutions telles qu’elles ont été décrites dans la section précédente. Pour faciliter l’intercomparaison de celles-ci, nous avons systématiquement interpolé linéairement l’ensemble des résultats sur la grille dotée d’une résolution de 5 km. Ce choix permet d’utiliser les masques définis avec une résolution de 5 km pour toutes les intégrations faites par le MAR. Ainsi, on évite de redéfinir un nouveau masque pour toutes les résolutions utilisées. De la sorte, on s’assure d’emblée l’absence de différences dans le calcul des variables moyennées spatialement sur les vallées. Il est en effet impossible que deux masques avec différentes résolutions recouvrent exactement la même aire. En outre, cela facilite grandement la visualisation à l’aide de cartes où le même domaine sera représenté dans tous les cas rencontrés.

4.1.1 Analyse de la simulation de référence

Le tableau 2 montre la moyenne spatiale sur les vallées du cumul des précipitations du 13 juillet et 15 juillet 2021 inclus¹¹. Ce tableau est à analyser en parallèle avec la figure 8 montrant le cumul des précipitations sur la même période à l’échelle de la Belgique. Plusieurs enseignements peuvent être tirés de ces données.

Tout d’abord, aucune des simulations ne semble parfaitement reproduire les événements de juillet 2021. Des différences significatives avec les relevés pluviométriques peuvent être constatés. Pour commencer, les précipitations cumulées ne dépassent jamais les 200 mm. Cela est largement en deçà des 271,5 mm/3jours observés à Jalhay. En outre, le maximum de précipitations simulé par MAR12-5km se trouve au sud-ouest de la vallée de la Vesdre, au milieu de la Province du Luxembourg. MAR12-5km y prédit localement un cumul grim pant au-delà de 185 mm/3jours. Or, rien d’aussi extrême n’a été observé dans cette région. Pour la version 3.12 du MAR, un biais a effectivement été constaté dans la région de Saint-Hubert par d’autres utilisateurs de ce modèle. Ce dernier est provoqué par une mauvaise vitesse de chute des précipitations qui tombent plus en aval du flux atmosphérique qu’elles ne le

11. Par la suite, lorsque nous parlerons d’un cumul sur 3 jours, nous ferons souvent implicitement référence à la période s’étalant du 13 au 15 juillet 2021 inclus.

devraient normalement. Il est à noter que ce biais est absent dans MAR v11. D'ailleurs, la reconstruction faite par FETTWEIS et DOUTRELOUP (2022), utilisant MAR v11, montre un cumul pluviométrique plus important dans la vallée de la Vesdre ainsi que l'absence de ce maximum proche de Saint-Hubert. Enfin, en s'intéressant au cumul sur trois jours moyenné sur le bassin versant de la Vesdre, on constate une nette différence avec les valeurs obtenues par JOURNÉE et al. (2023). Le MAR sous-estime d'au moins 28 mm cette variable en estimant une moyenne de 150 mm/3 jours, contre 178,4 mm/3 jours atteints par une des méthodes employées par JOURNÉE et al. (2023). Cet écart est d'autant plus important si nous comparons avec l'autre méthode employée dans cette étude, celui-ci grimpe à presque 40 mm/3 jours (voir section 2.2).

En revanche, MAR12-5KM surestime les précipitations dans la vallée de la Dyle en y simulant un cumul moyen de 128 mm sur 3 jours. Pour cette vallée, il est moins aisé de faire une comparaison avec les observations, celle-ci n'ayant pas été étudiée par d'autres chercheurs. Néanmoins, nous pouvons réaliser une comparaison qualitative entre le MAR et les résultats obtenus par JOURNÉE et al. (2023). Il est tout d'abord évident de constater en analysant la figure 3 de la section 2.2 que l'accumulation des précipitations ne dépassent jamais 125 mm/3 jours au nord du sillon Sambre-et-Meuse et en particulier dans la province du Brabant wallon. En outre, les régions situées sur la rive gauche de la Dyle n'ont pas vu leur cumul de précipitations grimper au-delà de 100 mm/3 jours, voire 75 mm/3 jours si nous comparons avec la méthode utilisant les données radar. En conséquence, une moyenne 128 mm/3 jours constitue avec certitude une importante surestimation. De la même manière, MAR12-5km surestime les précipitations par rapport à la reconstruction faite par FETTWEIS et DOUTRELOUP (2022). Il y est montré qu'aucune région du bassin versant de la Dyle expérimente une accumulation de précipitations supérieure à 110 mm/3 jours.

4.1.2 Analyse de l'impact de la résolution sur la vallée de la Vesdre et la Dyle

Comme nous l'avons vu précédemment, le schéma convectif n'intervient pas lorsque la résolution est égale ou inférieure à 5 km. Or, sachant que des précipitations convectives étaient incluses parmi les précipitations stratiformes, on peut se demander si les différences entre MAR12-5km et les observations ne sont pas liées à une mauvaise génération des pluies convectives par le noyau dynamique du MAR. À plus faible résolution, le schéma convectif va intervenir. Cependant, il est évident qu'en observant la figure 8b, l'utilisation d'une résolution

de 7,5 km ne permet pas une meilleure reconstruction de l'événement étudié. Au contraire, MAR12-7.5km sous-estime d'autant plus les précipitations dans la vallée de la Vesdre. Quant à la Dyle, on peut considérer que notre modèle se trompe également en divisant par un facteur deux la quantité d'eau tombée dans la vallée de la Dyle par rapport à MAR12-5km, sous-estimant dans ce cas les précipitations. Si on analyse les données du MAR pour la seule journée¹² du 15 juillet 2021 à l'aide du tableau 3, journée la plus importante pour la région entourant la Dyle, une nette différence apparaît entre MAR12-5km ET MAR12-7.5km.

Ce résultat est assez surprenant, car on peut exclure avec certitude tout impact du relief sur les précipitations dans la vallée de la Dyle, celles-ci provenant du nord-est. Or, aucun obstacle orographique situé en amont peut induire un soulèvement orographique de la masse d'air humide. Un relief moins bien représenté dû à une résolution dégradée, comme illustré sur la figure 10, ne peut pas expliquer de tels changements. À l'inverse, une topographie lissée impliquant une disparition des points culminants belges comme la Baraque Michel peut être un facteur explicatif pour la diminution des précipitations dans le bassin versant de la Vesdre. FETTWEIS et DOUTRELOUP (2022) ont également montré que le biais entre le MAR et les observations est accru quand on utilise une résolution de 7,5 km, limitant le facteur orographique dans la création des précipitations.

En continuant de dégrader la résolution jusqu'à 20 km, on constate une diminution progressive des précipitations dans les régions d'intérêt, en particulier dans la vallée liégeoise. À partir de 15 km, le cumul des précipitations passe sous la barre des 100 mm/3 jours, enlevant complètement le caractère particulièrement extrême de cet événement. Or, la physique du modèle étudié dans cette section est conçue pour fonctionner à de telles résolutions, qui restent acceptables pour un RCM. Puisque le relief est de moins en moins bien représenté comme illustré sur la figure 10, il n'est pas étonnant de s'attendre à une diminution dans la vallée de la Vesdre. Pour MAR12-20km, on constate sur la figure 8e que le maximum de précipitations se trouve plus en aval du flux atmosphérique. Ce résultat semble indiquer que l'effet aggravant du relief s'atténue, conduisant la masse d'air humide à saturer plus au sud-ouest. Néanmoins, comme nous le verrons dans la section 4.2, cette hypothèse qui peut paraître raisonnable à première vue est en réalité fautive. Ce maximum de précipitations centré dans la région de Rochefort ne fait qu'illustrer toute la complexité de la simulation des précipitations et le caractère hautement chaotique de ces dernières. En revanche, comme mentionné

12. Du 15 juillet 2021 00 :00 au 16 juillet 2021 00 :00.

précédemment, ce facteur topographique ne peut pas expliquer la différence proche d'un facteur 3 observée entre MAR12-5km et MAR13-5km.

Néanmoins, on observe un rebond des précipitations lorsqu'on examine les résultats de la simulation avec une résolution de 30 km. Ce rebond peut étonner, mais il n'est pas totalement surprenant. À cette résolution, nous sommes à un point de bascule où la physique du MAR n'est plus adaptée pour travailler avec des points de grille aussi larges. Naturellement, cela va conduire le MAR à sortir des résultats incorrects, le noyau dynamique et heuristique ne fonctionnant plus correctement. En outre, au-delà de 30 km, les résultats n'ont plus aucun sens. On remarque une nouvelle décroissance, mais celle-ci tient plus du hasard que d'un quelconque lien avec la dégradation de la résolution. Les cartes correspondant à ces simulations représentées sur la figure 8 nous montre bien le côté entièrement aléatoire de ces précipitations générées par le MAR à très basse résolution.

Jusqu'à présent, nous ne nous sommes intéressés qu'à la somme des précipitations stratiformes et convectives. Or, nous savons que la présence de précipitations convectives a contribué à aggraver la situation. Dès lors, il est utile de se demander quel est l'impact de la résolution sur le schéma convectif. Le tableau 4 montre la moyenne des précipitations convectives générées par le schéma convectif sur les deux vallées étudiées. Sans surprise, ces valeurs sont faibles pour MAR12-5km, car nous savons que c'est le MAR lui-même qui a généré l'ensemble des précipitations. Pour MAR12-7.5km, nous ne remarquons qu'un mince accroissement que l'on peut considérer comme négligeable. L'augmentation est cependant plus conséquente pour MAR12-10km où les pluies convectives sont doublées, voire triplées selon les vallées. Si nous continuons l'analyse du tableau pour des résolutions plus grossières, on constate que ces variables évoluent de manière quelque peu aléatoire où aucune relation mathématique ne peut être établie entre résolution et cumul de précipitations convectives. Ainsi, le schéma convectif reste sensible à la résolution et la figure 9 l'illustre particulièrement bien où l'on observe que le motif dessiné par les précipitations convectives varie d'une simulation à l'autre. Par exemple, des différences sont remarquables entre MAR12-10km et MAR12-15km alors que ces deux simulations ont une résolution idéale pour le schéma convectif.

Pour véritablement démontrer le caractère chaotique des précipitations, nous allons analyser trois autres jours pluvieux consécutifs mais nous ne nous intéressons pas ici à un

événement extrême. Ainsi, nous avons refait le même travail pour une période de 3 jours s'étendant du 28 juin au 30 juin 2021. Les résultats sont présentés dans le tableau 5 et la figure 12 d'une façon identique à ceux relatifs à juillet 2021. Contrairement à l'événement étudié ci-dessus, on ne constate aucunement une diminution générale des précipitations en dégradant la résolution. L'aspect chaotique des précipitations est d'autant plus mis en évidence, en particulier lorsque la résolution varie de 5 à 20 km. Evidemment, les variations absolues sont moins importantes par rapport à celles constatées en juillet 2021. En revanche, les variations relatives montent jusqu'à 50 %¹³ et sont toutes supérieures à 15 %. Le tableau 6 montre le cumul des précipitations convectives moyenné spatialement. Nous constatons des variations, mais d'un ordre de grandeur bien moins important que pour la somme des deux types de précipitations, à l'exception de MAR12-15km où une diminution plus majeure est constatée. Assurément, ce n'est pas le schéma convectif qui génère de si importantes différences entre les différentes simulations, mais bien le MAR lui-même. Une variation de la résolution va conduire le MAR à saturer les masses d'air à différents endroits, voire à ne plus les considérer comme saturées impliquant une diminution des précipitations comme cela peut être le cas pour MAR12-7.5km. La différence entre MAR12-5km et MAR12-7.5km est particulièrement frappante et la recherche de l'origine à ce phénomène est un exercice périlleux. En effet, il est impossible d'isoler les précipitations convectives générées par le noyau dynamique du MAR des précipitations stratiformes. Dans les deux périodes étudiées ici, MAR12-5km surestime peut-être les précipitations convectives, mais nous ne pouvons pas nous en assurer. Néanmoins, nous pouvons être certains qu'après l'avoir constaté également dans la vallée de la Dyle pour l'évènement du mois de juillet, deux utilisateurs du modèle MAR peuvent obtenir des résultats bien différents s'ils utilisent des résolutions différentes, bien qu'inférieures à 10 km.

Pour conclure cette section, le tableau 4 et 6 nous montre que le part des précipitations convectives peut sensiblement varier avec la résolution. À titre d'exemple, nous pouvons comparer les résultats de MAR12-10km et de MAR12-15km pour la période du mois de juin. Pour la vallée de la Vesdre, plus de 50 % de la différence entre ces deux simulations s'expliquent par une diminution des pluies convectives générées par le schéma convectif. À l'inverse, nous constatons une augmentation des précipitations dans leur ensemble dans le bassin versant de la Dyle quand on dégrade la résolution, mais une diminution des précipitations convectives. Pour cette raison, la part des précipitations convectives diminue d'environ

13. Sous-entendu par rapport à la simulation de référence (MAR12-5km).

40 %. Dans cette situation, le passage à une résolution de 15 km a conduit le MAR à générer de plus importantes précipitations stratiformes. Au contraire, son schéma convectif associé a simulé bien moins de pluies convectives sur une grande partie du territoire belge, comme le montrent les cartes 12c et 12d.

Simulation	Cumul moyenné Vesdre (mm/3jours)	Cumul moyenné Dyle (mm/3jours)	Variation Vesdre (%)	Variation Dyle (%)
MAR12-5km	150	128	0	0
MAR12-7.5km	140,72	63,1	-6,2	-50,7
MAR12-10km	107,95	45	-28	-64,8
MAR12-15 km	98,18	35,92	-34,5	-71,9
MAR12-20 km	45,3	31,2	-69,8	-75,6
MAR12-30km	66	36,66	-56,0	-71,4
MAR12-40km	39,13	20,51	-73,9	-84
MAR12-50km	18,4	12,83	-87,7	-90

TABLE 2 – Résultats des tests de sensibilité à la résolution réalisés avec MAR v12. Les cumuls présentés sont des moyennes spatiales sur les différentes vallées des précipitations simulées par le MAR du 13 au 15 juillet 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d'accroissement des différents cumuls par rapport à MAR12-5km.

Simulation	Cumul moyenné Vesdre (mm/1jour)	Cumul moyenné Dyle (mm/1jour)	Variation Vesdre (%)	Variation Dyle (%)
MAR12-5km	25,74	64,19	0	0
MAR12-7.5km	24	24,65	-6,8	-61,6
MAR12-10km	15,19	16,1	-41	74,9
MAR12-15km	34	9,8	32,1	-84,7
MAR12-20 km	15,47	7,73	-39,9	-88
MAR12-30km	27	14,8	4,9	-76,9
MAR12-40km	16,43	1,78	-36,2	-97,2
MAR12-50km	3,04	0,85	-88,2	-98,7

TABLE 3 – Cumuls moyennés spatialement des précipitations simulées par le MAR le 15 juillet 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d'accroissement des différents cumuls par rapport à MAR12-5km.

Simulation	Cumul moyenné Vesdre (mm/3jours)	Cumul moyenné Dyle (mm/3jours)	% precip. conv. Vesdre (%)	% precip. conv. Dyle (%)
MAR12-7.5km	5,01	2,34	3,6	3,7
MAR12-10km	9,12	7,79	8,4	17,3
MAR12-15km	10,18	10,68	10,4	29,7
MAR12-20km	7,35	6,3	16,2	20,2
MAR12-30km	17,11	8,32	25,9	22,7
MAR12-40km	26,52	9,42	67,8	45,9
MAR12-50km	16,25	11,35	88,3	88,5

TABLE 4 – Cumuls moyennés spatialement des précipitations convectives simulées par le schéma convectif du MAR du 13 juillet au 15 juillet 2021. L’accent est mis sur l’impact de la résolution. Les deux dernières colonnes expriment le pourcentage de précipitations convectives incluses dans l’ensemble des précipitations.

Simulation	Cumul moyenné Vesdre (mm/3jours)	Cumul moyenné Dyle (mm/3jours)	Variation Vesdre (%)	Variation Dyle (%)
MAR12-5km	45,65	40,59	0	0
MAR12-7.5km	27,27	26,93	-40,3	-33,7
MAR12-10km	37,74	23,95	-17,3	-41,0
MAR12-15km	24,67	34,41	-46	-15,2
MAR12-20km	21,92	20,27	-52	-50,1
MAR12-30km	26,96	17,46	-40,9	-57
MAR12-40km	44,54	41,32	-2,4	1,8
MAR12-50km	46,16	28,15	1,1	-30,6

TABLE 5 – Cumuls moyennés spatialement des précipitations simulées par le MAR du 28 juin au 30 juin 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d’accroissement des différents cumuls par rapport à MAR12-5km.

Simulation	Cumul moyenné Vesdre (mm/3jours)	Cumul moyenné Dyle (mm/3jours)	% precip. conv. Vesdre (%)	% precip. conv. Dyle (%)
MAR12-7.5km	17,56	18,93	64,4	70,3
MAR12-10km	17,1	17,57	45,3	73,4
MAR12-15km	9,45	11,38	38,3	33,1
MAR12-20km	15,94	19,06	72,7	94
MAR12-30km	18,75	15,42	69,5	88,3
MAR12-40km	25,83	14,33	58	34,7
MAR12-50km	16,37	10,53	35,5	37,4

TABLE 6 – Cumuls moyennés spatialement des précipitations convectives simulées par le schéma convectif du MAR du 28 juin au 30 juin 2021. Les deux dernières colonnes expriment le pourcentage de précipitations convectives incluses dans l’ensemble des précipitations.

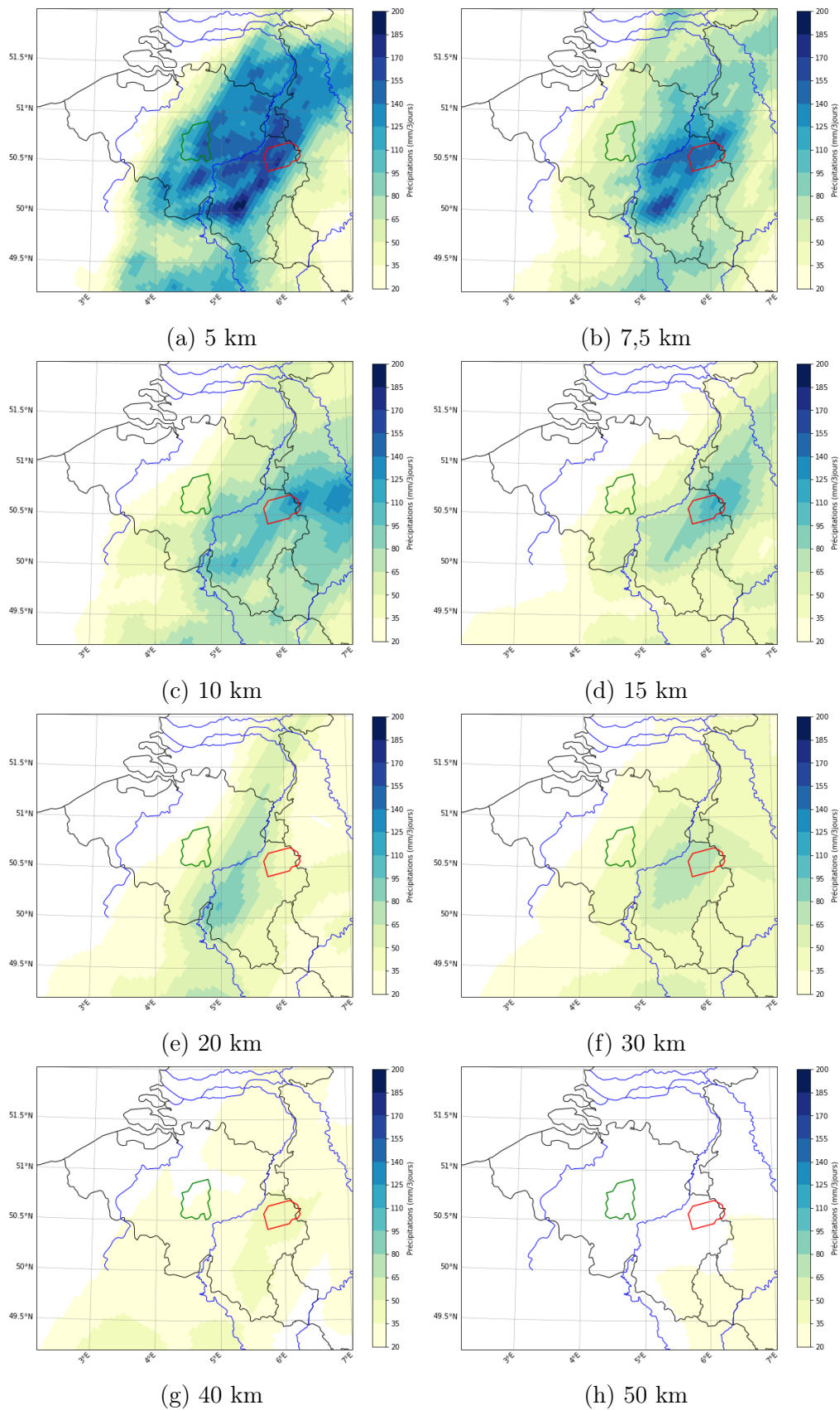


FIGURE 8 – Cumuls des précipitations (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en faisant varier la résolution de MAR v12. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.

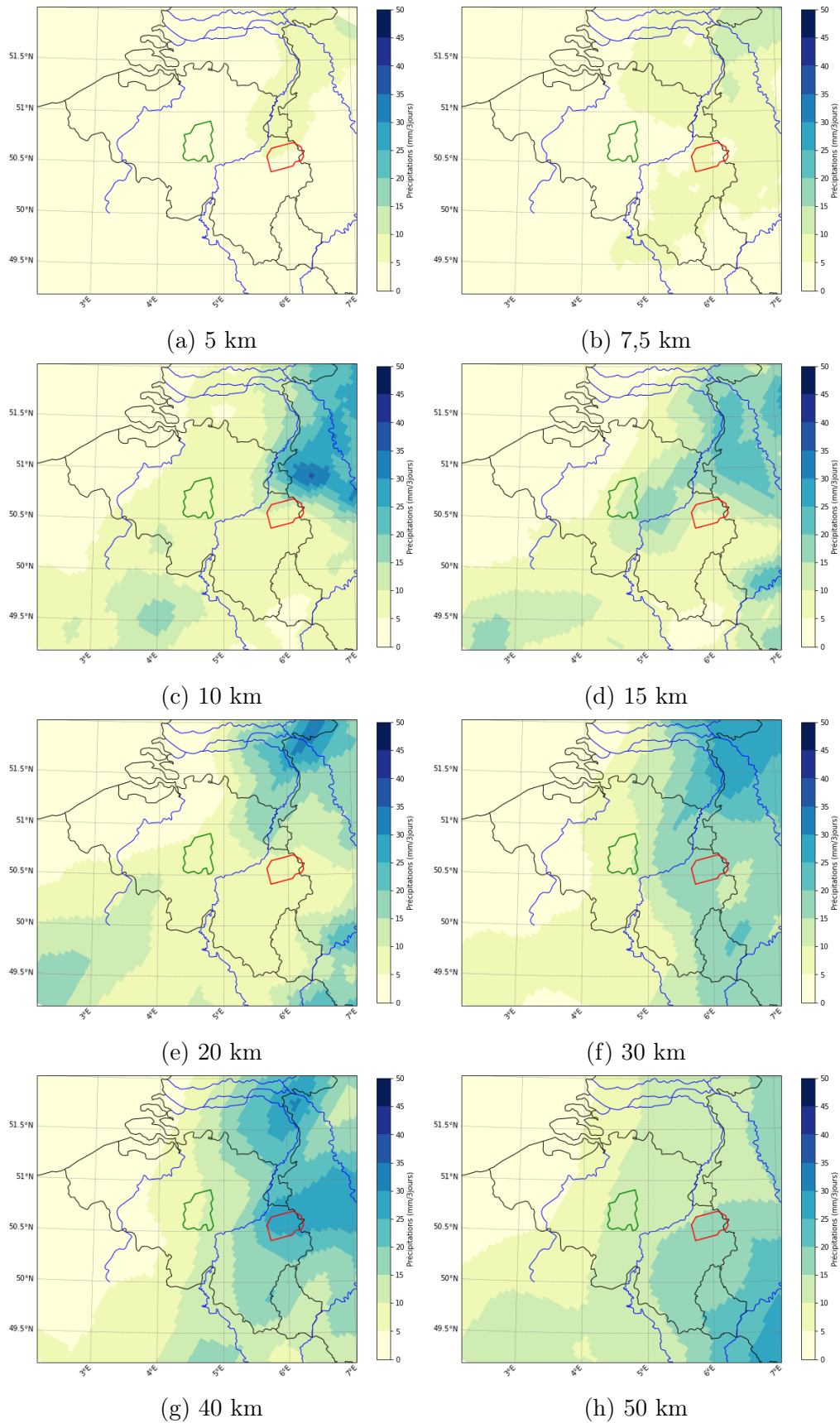


FIGURE 9 – Cumuls des précipitations convectives (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en faisant varier la résolution de MAR v12. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.

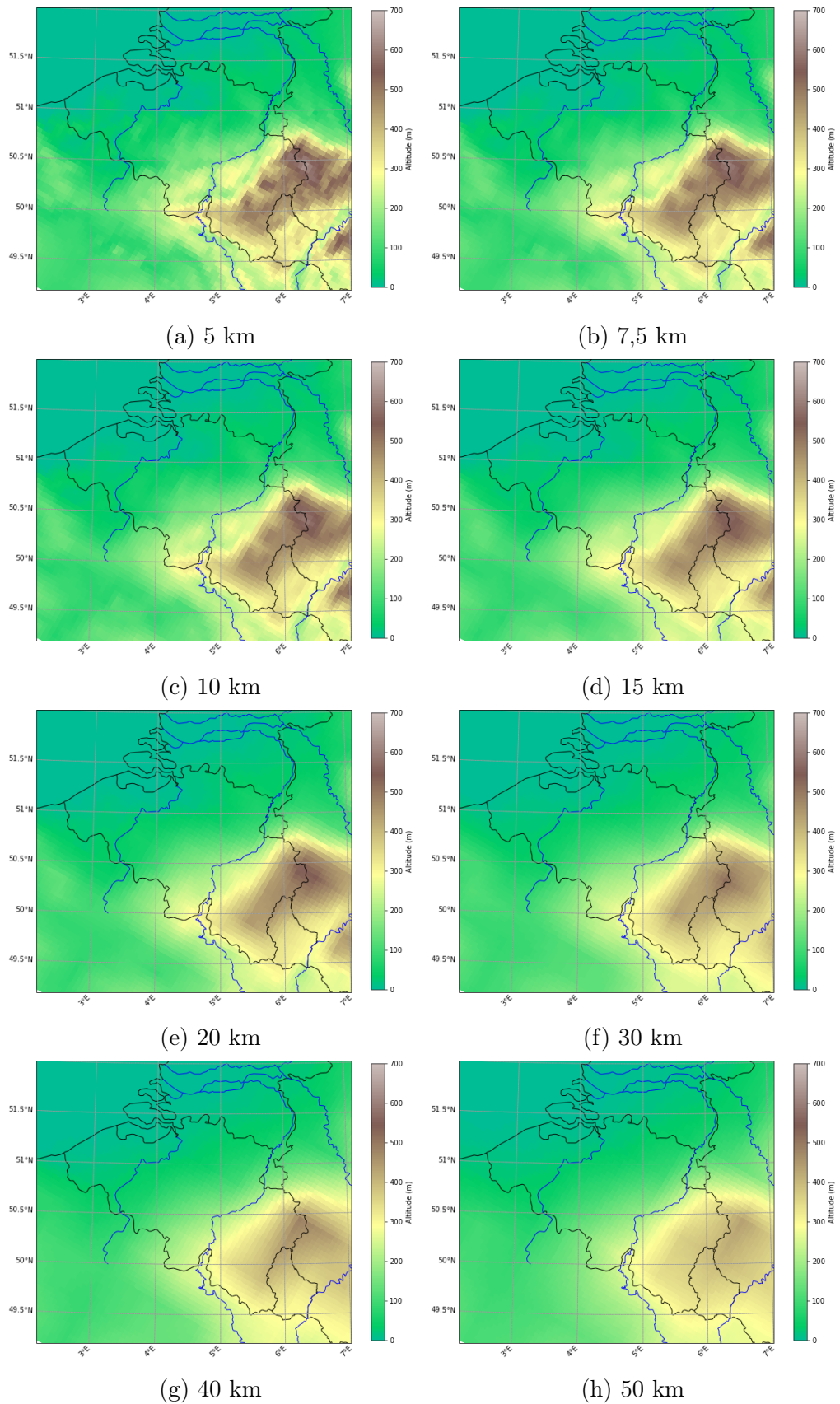


FIGURE 10 – Topographie de la Belgique des différentes simulations. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.

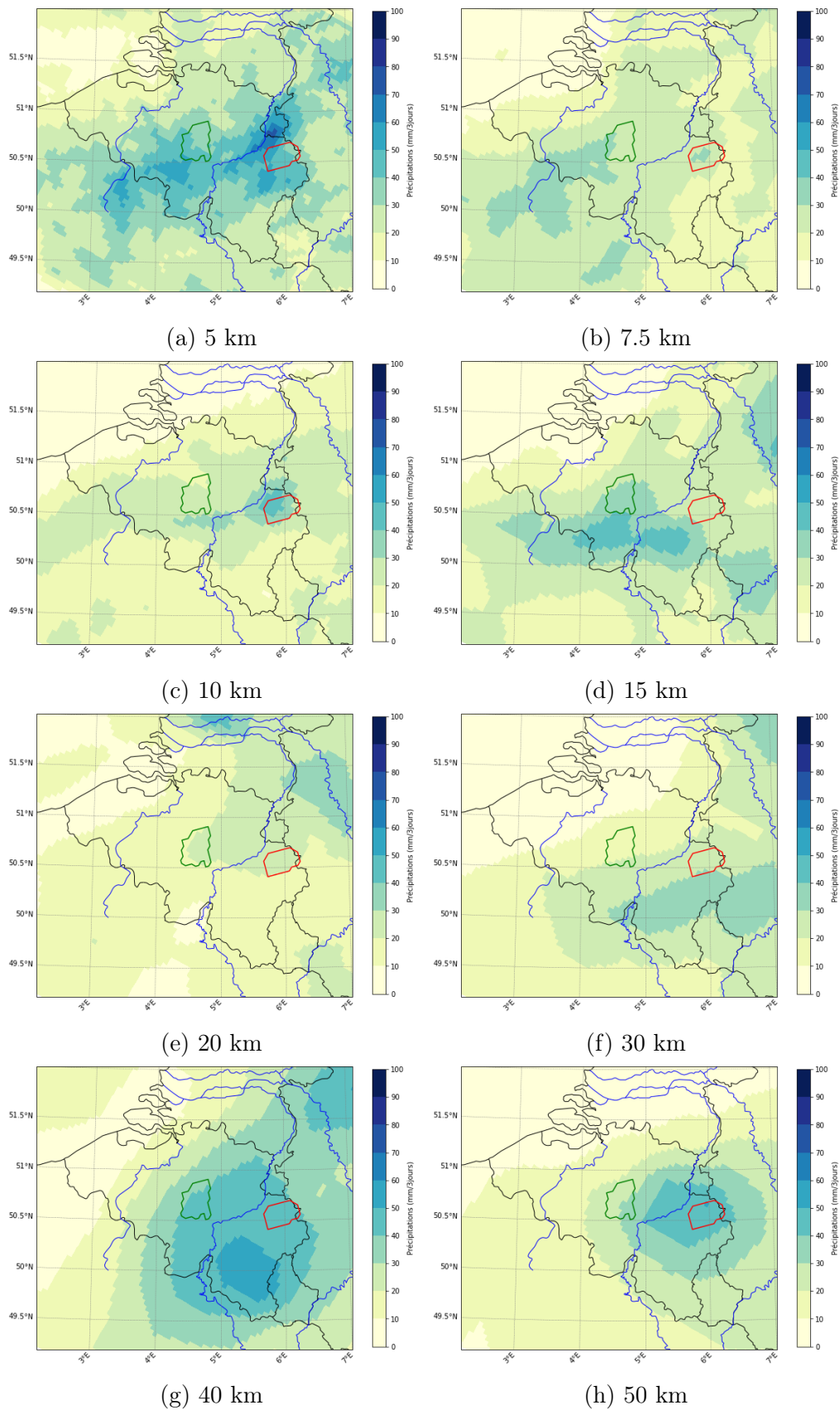


FIGURE 11 – Cumuls des précipitations (mm/3jours) du 28 au 30 juin 2021 sur la Belgique. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.

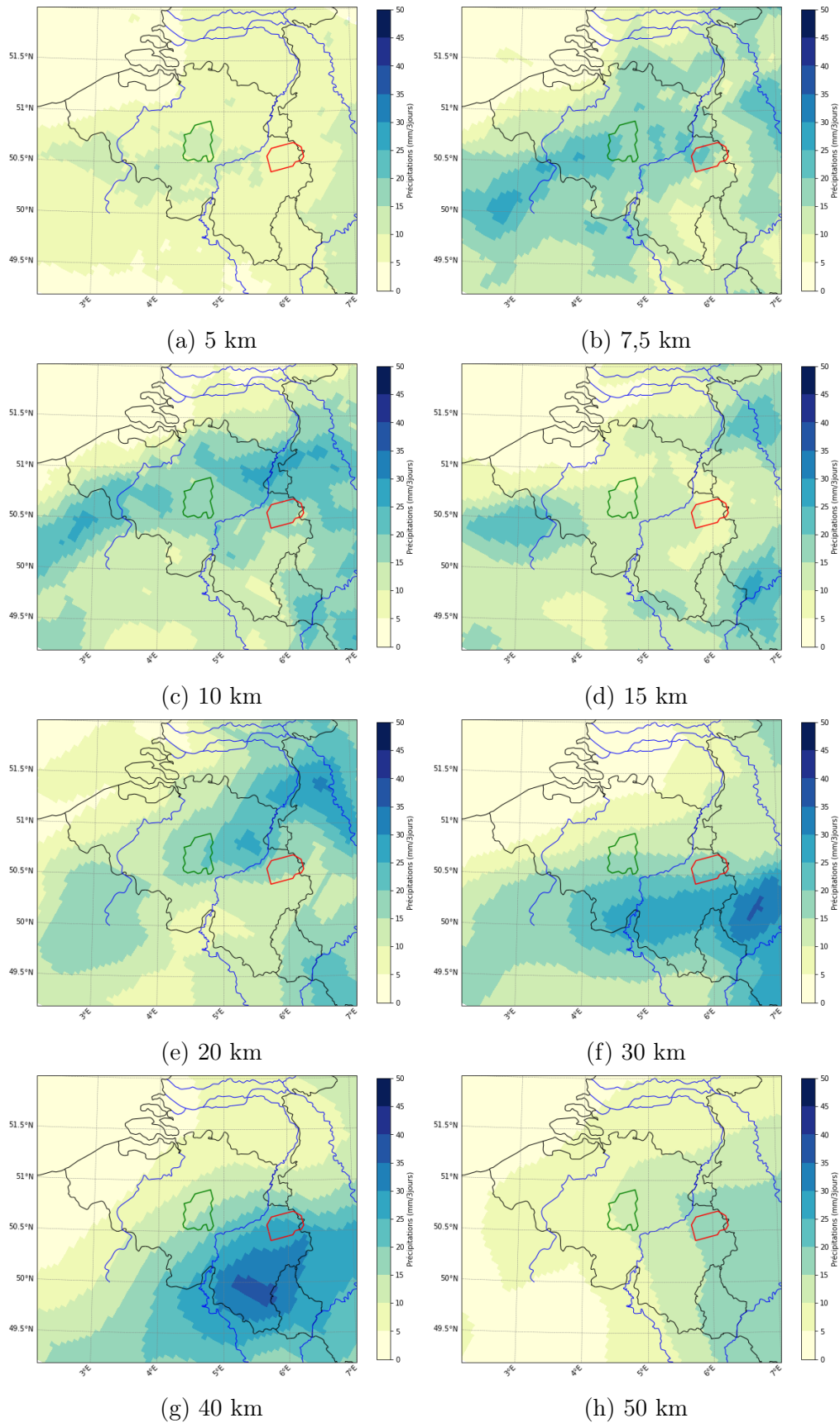


FIGURE 12 – Cumuls des précipitations convectives (mm/3jours) du 28 au 30 juin 2021 sur la Belgique. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle. La résolution des simulations est indiquée sous les cartes.

4.2 Tests de sensibilité à la topographie

Dans cette section, nous allons présenter les résultats des simulations visant à estimer l'impact du Massif ardennais sur les précipitations ayant conduit aux catastrophiques inondations. Dans un premier temps, nous analyserons les simulations réalisées avec MAR v13 à une résolution de 5 km. Dans un second temps, nous nous pencherons sur celles faites avec MAR v12 à 7,5 km.

4.2.1 Résultats des tests de sensibilité réalisés avec MAR v13

Présentation de la simulation de référence

Les résultats généraux de ces simulations sont présentés dans le tableau 8 pour nos deux régions d'intérêt et en deux dimensions sur la figure 13. Plusieurs enseignements intéressants peuvent être tirés de leur analyse.

Dans la section précédente, nous avons relevé que que MAR12-5km sous-estimait les précipitations dans la vallée de la Vesdre par rapport à d'autres travaux visant à reconstruire les évènements de juillet 2021. Cette sous-estimation est d'autant plus accentuée en utilisant la version 13 du MAR. En effet, nous obtenons uniquement 130 mm/3 jours en moyenne sur la vallée de la Vesdre, ce qui représente une diminution de 20 mm/3 jours par rapport à MAR12-5KM. Plus particulièrement, aucun maximum de précipitations n'est constaté à hauteur des points culminants belges. En analysant en parallèle les figures 13a et 16a, nous remarquons paradoxalement que MAR génère plus de précipitations dans les points de grille avec l'altitude la plus basse. La simple analyse de ces deux figures tendrait à nous faire croire que l'effet aggravant du relief n'est pas simulé par le MAR. Néanmoins, le biais lié à la vitesse de chute des précipitations est toujours présent dans MAR v13. Comme illustré dans la section précédente, il en résulte que la région de Saint-Hubert enregistre le maximum de précipitations. En conséquence, en raison de ce biais, une partie des précipitations tombant au-delà de la vallée de la Vesdre est sûrement supposée y être simulée initialement.

En revanche, MAR v13 semble être plus proche de la réalité pour la vallée de la Dyle. Un cumul moyenné sur le bassin versant de 100 mm/3 jours est plus conforme aux observations. On y constate d'ailleurs une plus grande ressemblance entre la figure 13a et les reconstructions

faites par JOURNÉE et al. (2023).

Analyse de la vallée de la Vesdre

En analysant les résultats obtenus pour la vallée de la Vesdre dans le tableau 8, nous constatons à peine d'infimes variations tant que l'altitude des pixels peut atteindre 400 mètres. Bien que le bassin de la Vesdre contienne des lieux avec des altitudes supérieures à 600 mètres, ce résultat a du sens dans notre étude. Comme expliqué précédemment, MAR v13 reproduit mal les précipitations et les sous-estime grandement là où le relief est le plus important. Par conséquent, il n'est en rien surprenant que nous observions seulement de faibles différences. En revanche, nous constatons une diminution de 26,5 mm/3 jours entre MAR13-600m et MAR13-300m. Les cartes 13a et 13d illustrent bien cette baisse qui ne concerne pas uniquement la Vesdre mais également toute une bande recouvrant une partie du territoire belge allant de la région de Saint-Hubert à la vallée de la Vesdre. L'effet aggravant des Ardennes est atténué sur une région plus vaste que sur cette dernière.

En ne se focalisant que sur les données du tableau 8, nous constatons surprenamment qu'en continuant de diminuer l'altitude maximale des points de grille, la moyenne de l'accumulation des précipitations dans le bassin versant de la Vesdre augmente. Cette hausse n'a probablement aucune explication physique et n'est le résultat que d'erreurs de simulation. En regardant attentivement les cartes de la figure 13, on constate qu'une bande d'importantes précipitations surplombant la Province du Limbourg néerlandaise et une partie de la frontière germano-néerlandaise descend progressivement vers le sud. Ce mouvement vers le sud est d'autant plus visible quand on analyse la figure 18a qui montre la différence entre les précipitations générées par MAR13-600m ET MAR13-0m. Cette bande se déplaçant vers la vallée de la Vesdre vient s'y superposer, augmentant les précipitations dans l'est de celle-ci lorsqu'on supprime le relief.

Pour nous assurer de l'absence d'explications physiques de ce déplacement, nous avons analysé la circulation atmosphérique générée par le MAR dans les différentes simulations. La figure 17 montre le vent au niveau de pression de 800 hPa moyenné sur les trois jours de l'évènement. Il ressort que la disparition progressive du massif Ardennais entraîne juste des changements presque imperceptibles de la circulation atmosphérique. La figure 19a montre la différence entre MAR13-600m et MAR13-0m avec une échelle identique à celle utilisée pour la figure 17 et nous confirme une absence de changements significatifs. Similairement,

l'analyse du vent à 850 hPa ne montre que des différences très légèrement amplifiées. Enfin, pour des niveaux de pression supérieurs à 800 hPa, nous pouvons considérer en excellente approximation que l'impact sur le vent est nul.¹⁴

Cette bande de précipitations, en amont des différents massifs, exclut tout effet de barrière possible et l'absence de changement dans la circulation atmosphérique nous prouvent que le décalage de cette bande ne peut pas être expliqué. Comme illustré dans la section précédente, cela nous montre une fois de plus le caractère chaotique des précipitations. Ces dernières dépendent d'un grand nombre de variables météorologiques et l'altération d'une d'entre elles peut, par effet domino, entraîner un changement là où l'on s'attend le moins. En voulant illustrer l'impact des Ardennes, nous avons ainsi démontré une nouvelle fois que la simulation des précipitations par les modèles contient toujours une part d'incertitude.

Néanmoins, outre cette curieuse anomalie, d'autres conclusions peuvent être tirées. Bien que montrant un résultat contre-intuitif pour la vallée de la Vesdre, les figures 13e, 13f et 13g nous montrent un impact bien plus important pour les régions situées en aval de la vallée de la Vesdre. Une nette diminution du cumul des précipitations apparaît en diminuant le relief et le maximum situé proche de Saint-Hubert disparaît totalement. La figure 16a l'illustre d'autant mieux. En effet, nous remarquons les plus grandes variations dans le nord de la Province du Luxembourg et à proximité de la frontière franco-belge. Les cumuls y diminuent localement de plus de 60 mm/3 jours et des différences supérieures à 80 mm/3 jours sont également présentes. En outre, il est remarquable de constater que les précipitations y diminuent de manière relativement continue avec la disparition du relief, au contraire du bassin versant de la Vesdre où nous observons une chute brutale.

En conclusion, bien que nous n'ayons pas montré un impact particulièrement significatif du Massif ardennais sur les précipitations dans la vallée de la Vesdre, il est indéniable que le Massif ardennais a favorisé la création de précipitations en juillet 2021.

14. Les cartes correspondantes ne sont pas présentes dans ce mémoire. Il en est de même pour la carte de la différence du vent à 850 hPa.

Analyse de la vallée de la Dyle

Le tableau 8 ne montre aucune variation notable pour la vallée de la Dyle pour les cinq premières simulations. Bien que nous constatons de légères variations, il est probable que ce ne soit une nouvelle fois une conséquence du caractère chaotique des précipitations. Comme expliqué précédemment, la masse d'air ne rencontre pas d'obstacle topographique avant d'arriver sur la vallée de la Dyle. Nous pouvons donc exclure avec une grande certitude tout lien entre la diminution du relief et ces variations.

Néanmoins, la moyenne des précipitations diminue dans MAR13-100m et en particulier dans MAR13-0m. Cette diminution est probablement liée avec la disparition du relief. La Dyle s'écoule en majorité dans la moyenne Belgique et nous n'avons pas considéré son tronçon dans la basse Belgique. En conséquence, l'altitude de son bassin versant est comprise entre 100 et 300 mètres¹⁵. En outre, son altitude moyenne dans MAR13-600m est de 114 mètres. La diminution remarquée entre MAR13-200m et MAR13-100m ne semble donc pas étonnante, car une partie des points de grille ont vu leur altitude être abaissée. Assurément, l'écart de pratiquement 15 mm/3 jours entre MAR13-100m et MAR13-0m conforte l'hypothèse d'une amplification des précipitations par un léger soulèvement orographique. Suivant l'altitude moyenne calculée, cette différence est d'ailleurs la plus conséquente. Ainsi, bien que la topographie soit faible dans la vallée de la Dyle, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'elle a tout de même une importance. Dans le cas d'un flux d'air humide provenant du nord-est, un léger effet de barrière n'est donc pas à exclure dans cette région.

4.2.2 Résultats des tests de sensibilité réalisés avec MAR v12

Similairement à la section précédente, les résultats sont présentés dans le tableau 7 et la figure 14.

Pour la vallée de la Vesdre, l'analyse des résultats donne une conclusion semblable à celle que nous avons obtenue avec MAR v13. La diminution la plus importante est une nouvelle fois constatée quand la topographie se retrouve être abaissée à 300 mètres. En outre, MAR12-200m et MAR12-0m génèrent plus de précipitations que MAR12-300m. Seul MAR12-100m ne suit pas le même comportement que son équivalent réalisé avec MAR

15. Plus précisément, la grande majorité de la vallée se situe sous la barre des 200 mètres.

v13. MAR12-100m enregistre une diminution de 34,2 % par rapport à la simulation de référence, contre 24,6 % pour la simulation dépourvue de tout relief. Les figures 14f et 14f nous montrent que MAR12-100m fait tomber les précipitations plus en aval du flux atmosphérique contrairement à MAR12-0m qui semble les concentrer à proximité du bassin versant de la Vesdre. Cela induit une différence de 15 mm/3 jours entre ces deux simulations et des résultats absolument contre-intuitifs. Il va sans dire que nous rencontrons une nouvelle preuve du caractère chaotique des précipitations. La différence entre MAR12-600m et MAR12-0m est illustrée sur la figure 18b. Contrairement à son homologue présenté sur la figure 18a, nous n’observons pas un net décalage d’une bande de précipitations située sur les pays germaniques voisins à la Belgique. En outre, nous remarquons que l’intégralité du bassin de la Vesdre observe une diminution des précipitations entre MAR12-600m et MAR12-0m. Cela se traduit par une baisse de 24,6 % des précipitations entre ces deux dernières contre 15,5 % entre MAR13-600m et MAR13-0m. Enfin, la différence la plus importante se trouve une nouvelle fois dans la région de Saint-Hubert et une réduction de minimum 20mm/3 jours est remarquée au sud-ouest de la vallée de la Vesdre.

Si les conclusions sont similaires pour la vallée de la Vesdre, il en est totalement différent pour la vallée de la Dyle. En diminuant le relief, nous constatons une importante croissance des précipitations atteignant presque 50 % dans certains cas. Rien de semblable n’avait été observé en utilisant la version 13 de notre modèle régional. Comme nous l’avions remarqué pour leur homologue, la variation la plus conséquente suivant un abaissement de 100 mètres du seuil a lieu entre MAR12-100m et MAR12-0m. Cependant, le cumul des précipitations de cette dernière reste en moyenne plus important que celui obtenu avec MAR12-600m. Cette constatation nous force à nuancer les conclusions que nous avons émises grâce à MAR v13. Dans le cas des intenses précipitations de juillet 2021, l’impact de la topographie sur la vallée de la Dyle reste incertain tant les résultats varient entre nos deux jeux de simulations.

Pour terminer cette section, le tableau 9 et la carte 15 nous renseignent sur les précipitations convectives générées par le schéma convectif. Pour la Dyle, la variation absolue est faible par rapport à l’ensemble des précipitations et leur part au sein de celui-ci reste pratiquement inchangée. La seule exception est MAR12-0m où une légère augmentation des deux paramètres se produit. Néanmoins, nous remarquons que le schéma convectif est bien moins sensible aux variations topographiques dans cette région que ne l’est le MAR.

Le schéma convectif semble légèrement être plus sensible aux mêmes variations dans la vallée de la Vesdre, où un écart de 7 mm/3 jours est constaté entre MAR12-600m et MAR12-0m. De la même manière, elles gagnent en importance par rapport à l'ensemble des précipitations dans lesquelles leur pourcentage passe de 3,6 % à 11,4 % entre les deux extrêmes. Pour conclure, il est évident que le schéma convectif n'est absolument pas le premier responsable des différences entre les simulations que nous observons dans le tableau 7.

Simulation	Cumul moyenné Vesdre (mm/3jours)	Cumul moyenné Dyle (mm/3jours)	Variation Vesdre (%)	Variation Dyle (%)
MAR12-600m	140,72	63,1	0	0
MAR12-500m	135,94	72,7	-3,4	15,2
MAR12-400m	136,94	74,04	-2,7	17,3
MAR12-300m	105,43	87,13	-25,1	38,1
MAR12-200m	111,13	92,92	-21	47,3
MAR12-100m	92,59	92,21	-34,2	46,1
MAR12-0m	106,13	68,69	-24,6	8,9

TABLE 7 – Résultats des tests de sensibilité au Massif ardennais réalisés avec MAR v12. Les cumuls présentés sont des moyennes spatiales sur les différentes vallées des précipitations simulées par le MAR du 13 au 15 juillet 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d'accroissement des différents cumuls par rapport à MAR12-600m.

Simulation	Cumul moyenné Vesdre (mm/3jours)	Cumul moyenné Dyle (mm/3jours)	Variation Vesdre (%)	Variation Dyle (%)
MAR13-600m	129,44	103,91	0	0
MAR13-500m	129,5	106,29	0	2,3
MAR13-400m	128,12	111,01	-1	6,8
MAR13-300m	103,94	101,94	-19,7	-1,9
MAR13-200m	108,45	100,27	-16,2	-3,5
MAR13-100m	114,96	93,57	-11,2	-10
MAR13-0m	109,43	78,75	-15,5	-24,2

TABLE 8 – Résultats des tests de sensibilité au Massif ardennais réalisés avec MAR v13. Les cumuls présentés sont des moyennes spatiales sur les différentes vallées des précipitations simulées par le MAR du 13 au 15 juillet 2021. Les deux dernières colonnes expriment le taux d'accroissement des différents cumuls par rapport à MAR13-600m.

Simulation	Cumul moyenné Vesdre (mm/3jours)	Cumul moyenné Dyle (mm/3jours)	% precip. conv. Vesdre (%)	% precip. conv. Dyle (%)
MAR12-600m	5,01	2,34	3,6	3,7
MAR12-500m	7,13	2,84	5,2	3,9
MAR12-400m	7,08	2,97	5,2	4
MAR12-300m	5,86	2,92	5,6	3,4
MAR12-200m	7,77	3,83	7	4,1
MAR12-100m	10,64	3,32	11,5	3,6
MAR12-0m	12	4,39	11,3	6,4

TABLE 9 – Cumuls moyennés spatialement des précipitations convectives simulées par le schéma convectif du MAR v12 du 13 juillet au 15 juillet 2021. L'accent est mis sur l'impact du Massif ardennais. Les deux dernières colonnes expriment le pourcentage de précipitations convectives incluses dans l'ensemble des précipitations.

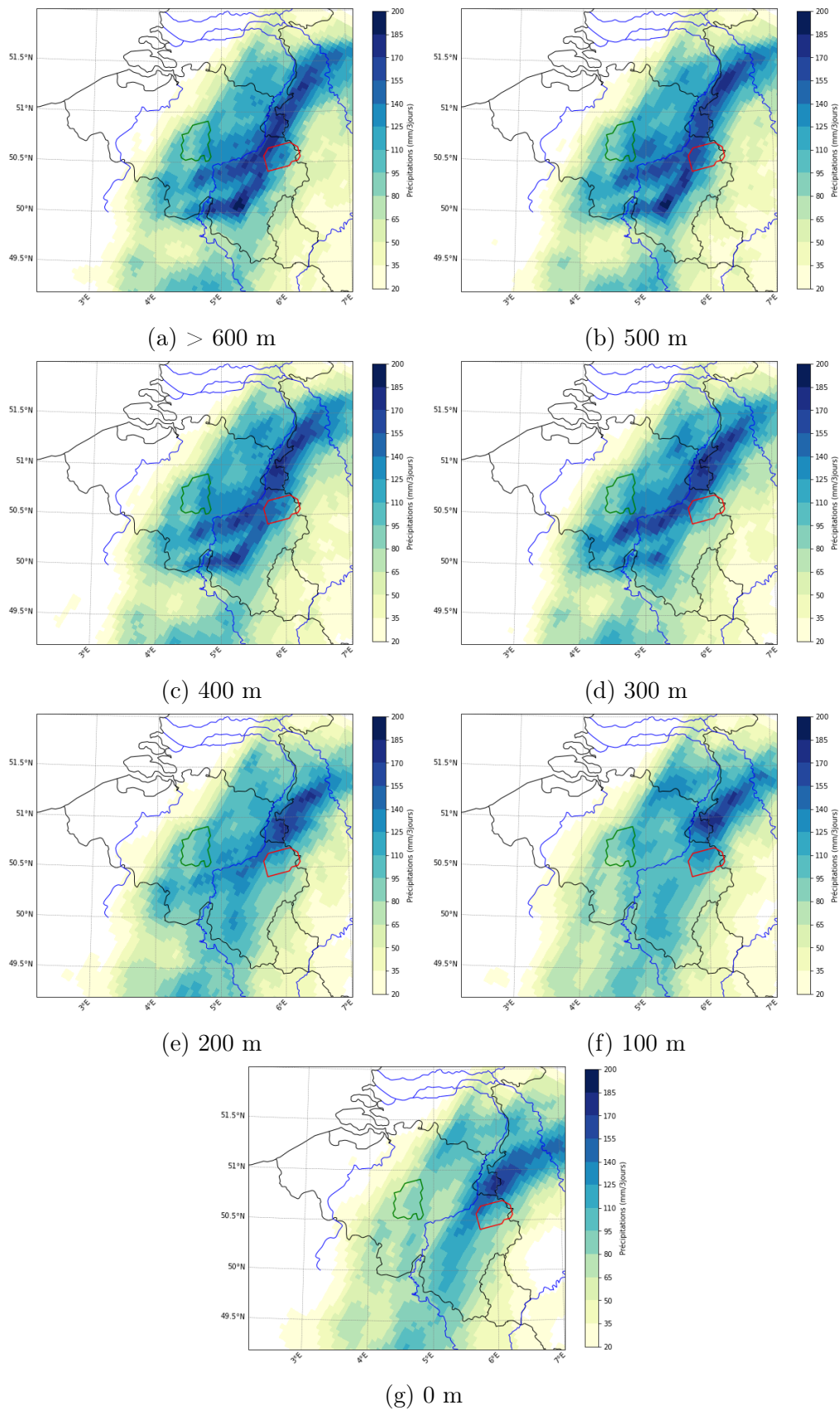


FIGURE 13 – Cumuls des précipitations (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en abaissant progressivement l'altitude maximale (indiquée sous les cartes) des points de grille de MAR v13 à 5km. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.

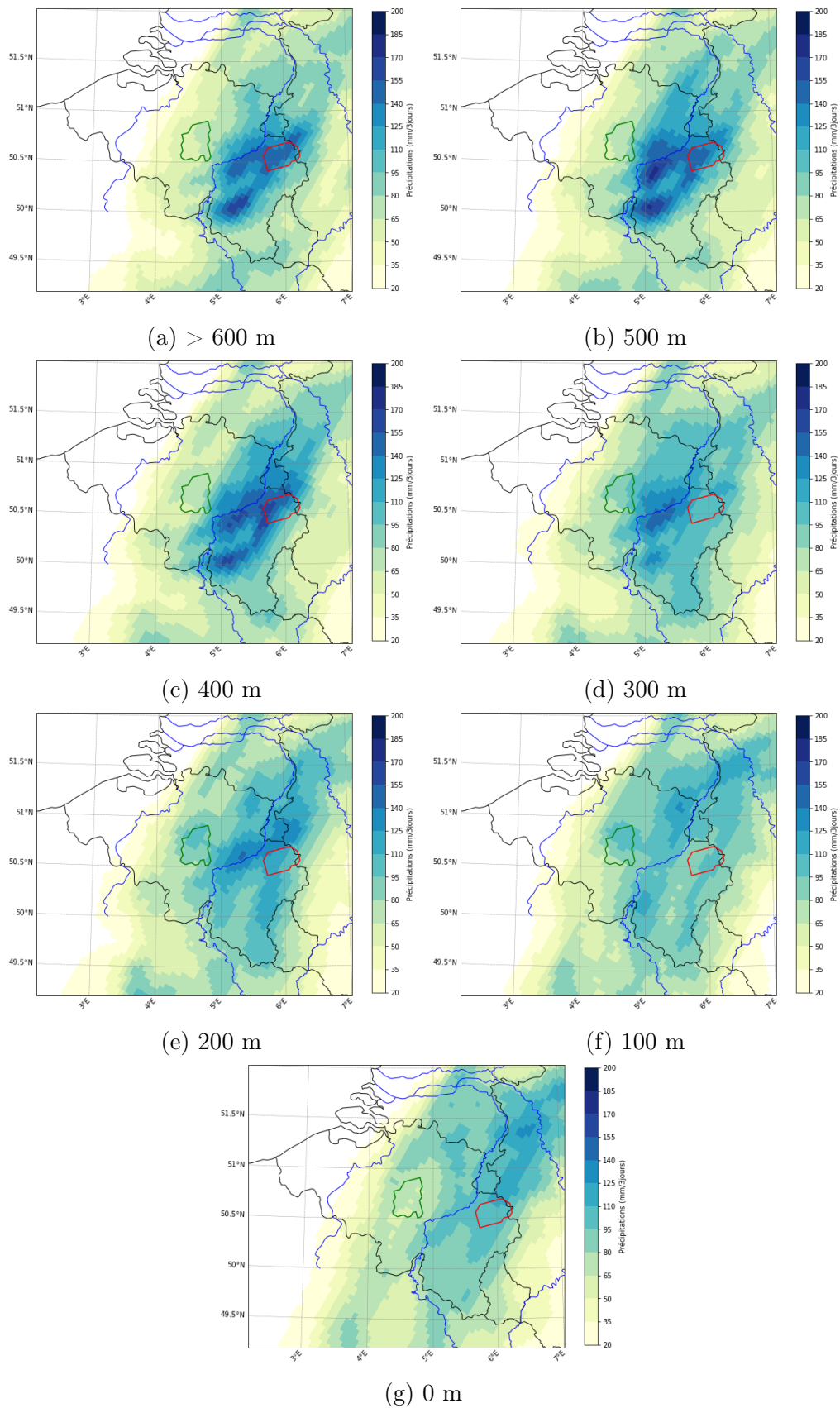


FIGURE 14 – Cumuls des précipitations (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en abaissant progressivement l'altitude maximale (indiquée sous les cartes) des points de grille de MAR v12 à 7.5km. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.

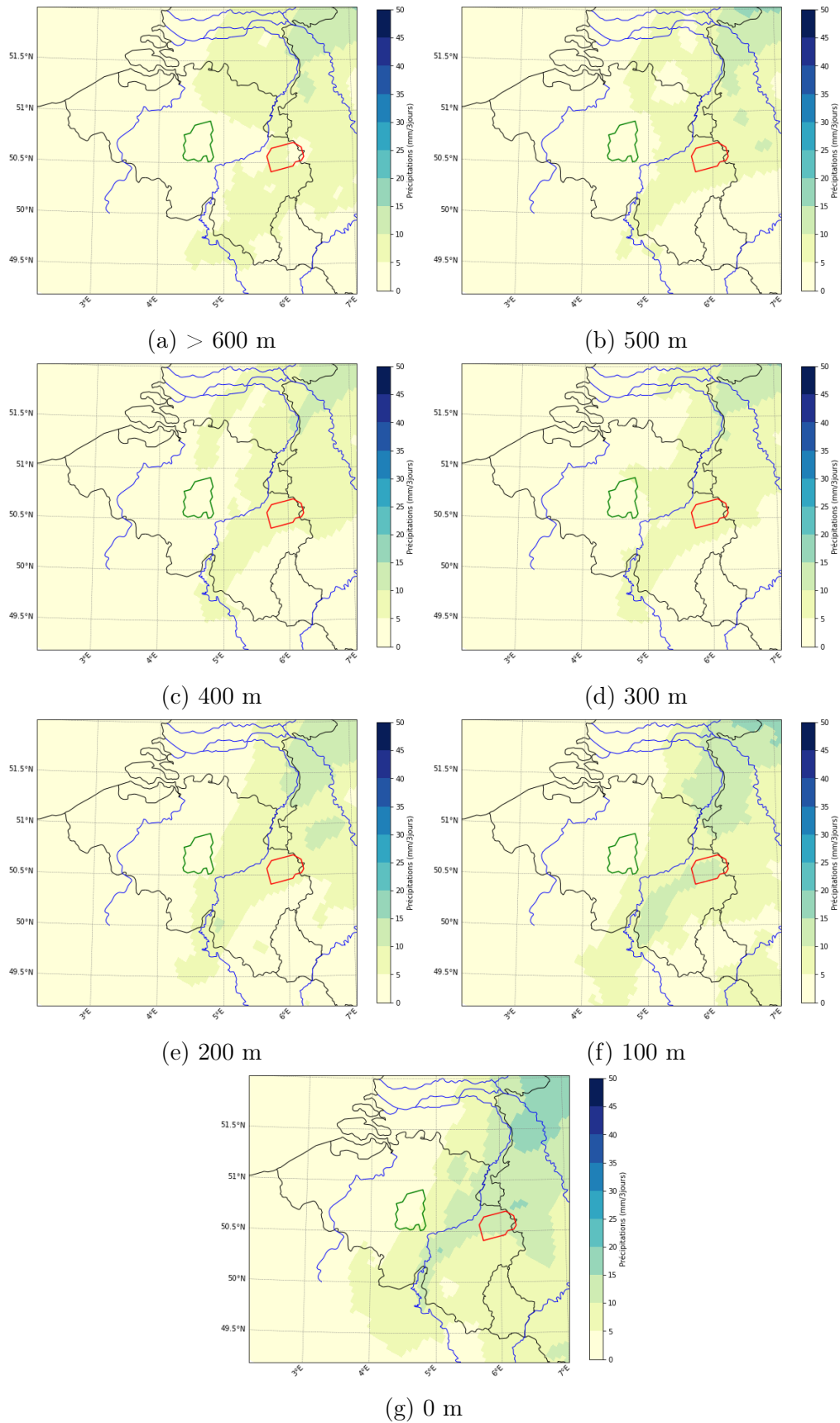


FIGURE 15 – Cumuls des précipitations convectives (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en abaissant progressivement l'altitude maximale (indiquée sous les cartes) des points de grille de MAR v12 à 7.5km. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.

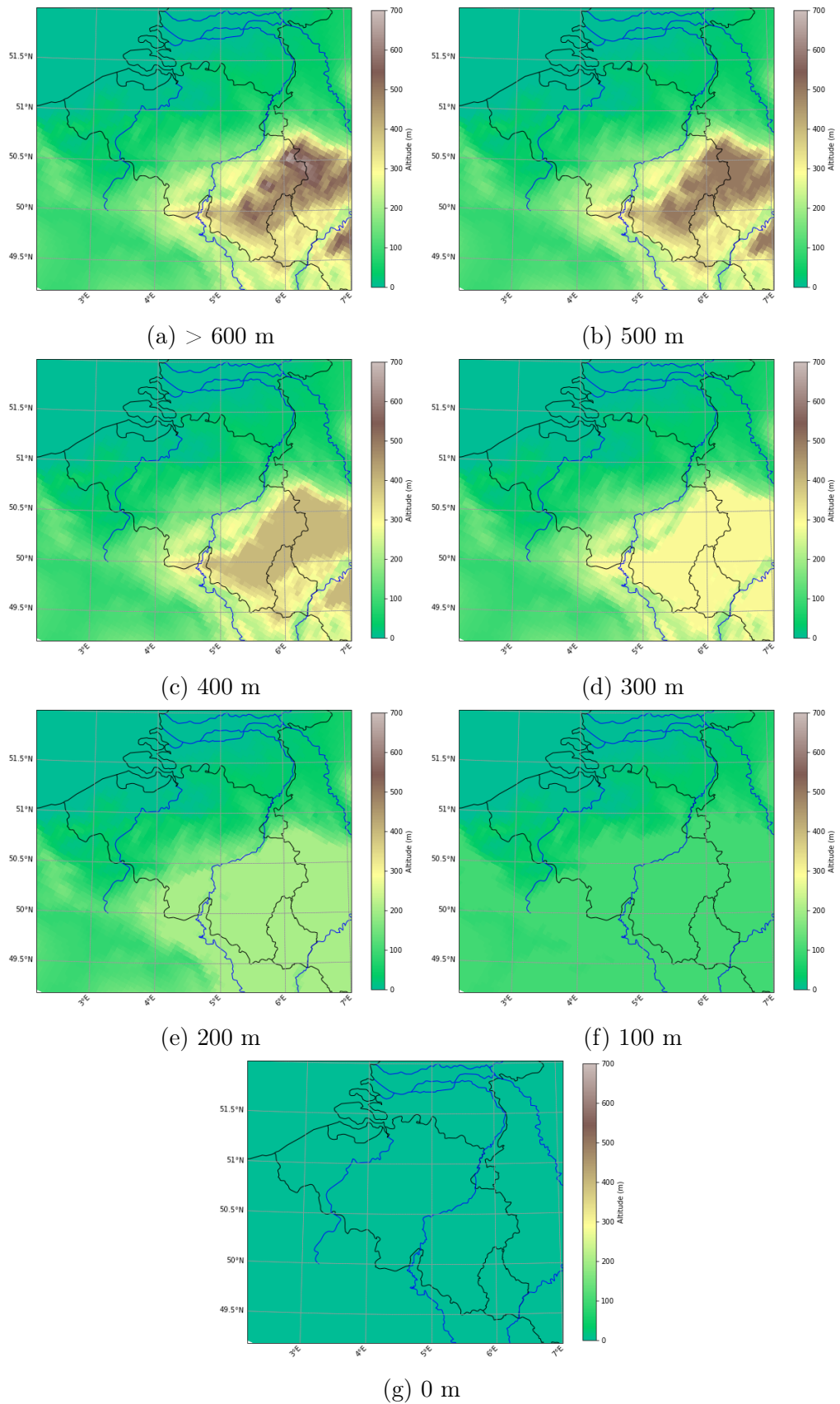


FIGURE 16 – Topographie (m) de la Belgique des différentes simulations. Le seuil topographique fixé pour chacune d’entre elles est indiqué sous les cartes.

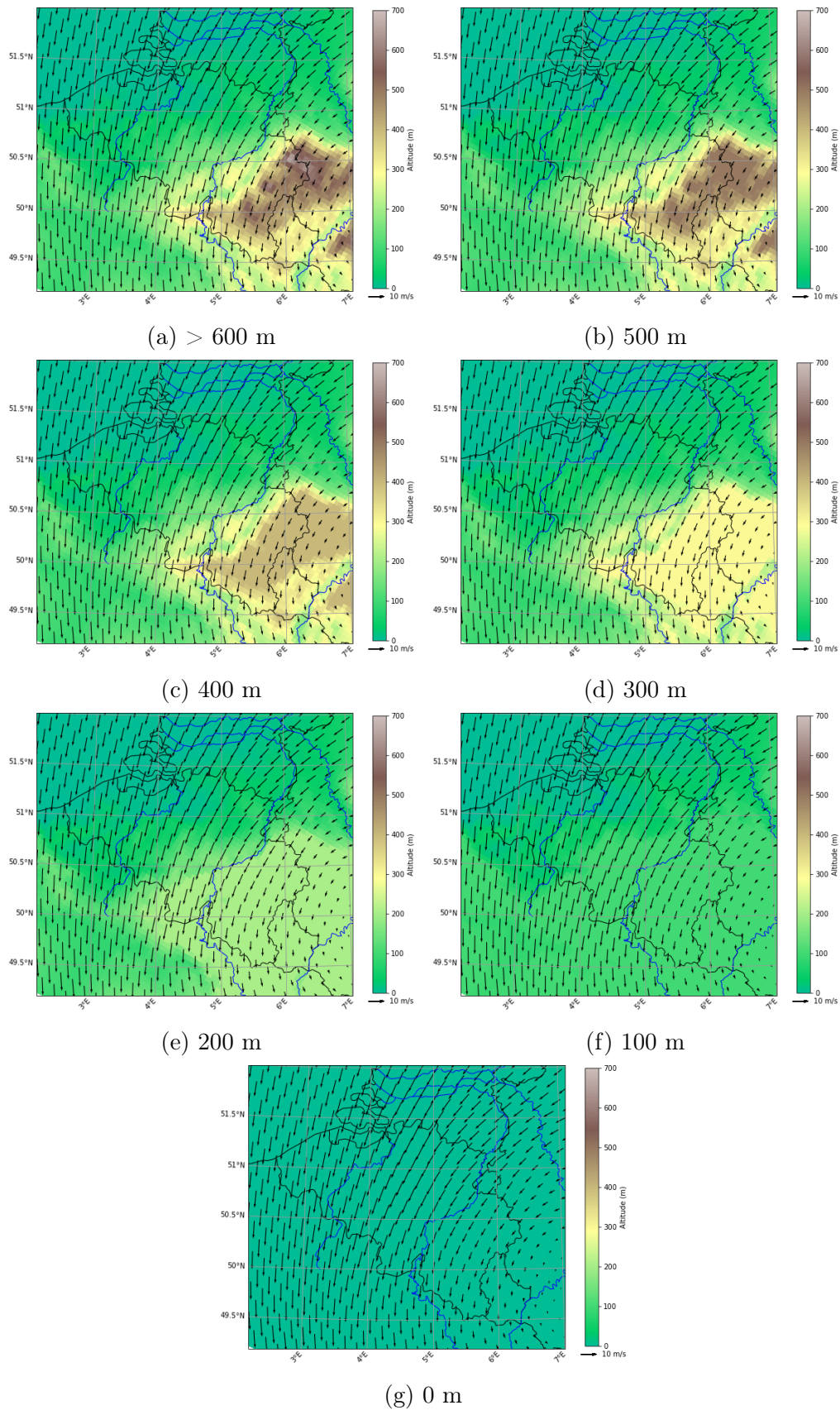


FIGURE 17 – Moyenne de la vélocité du vent (vitesse en m/s) du 13 au 15 juillet 2021 sur la Belgique obtenus en abaissant progressivement l'altitude maximale (indiquée sous les cartes) des points de grille de MAR v13 à 5km. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.

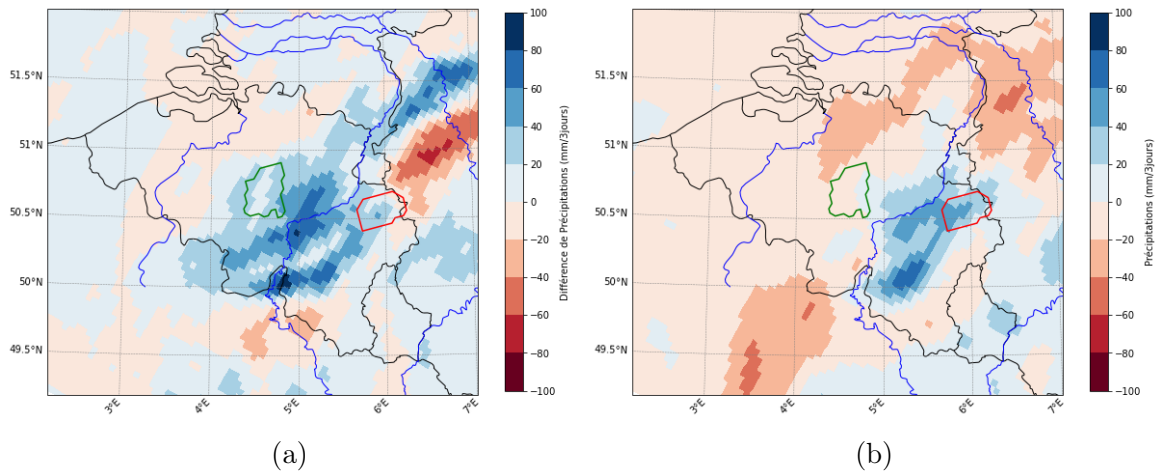


FIGURE 18 – Différence du cumul des précipitations (mm/3jours) du 13 au 15 juillet 2021 entre MAR13-600m et MAR13-0m (a) et entre MAR12-600m et MAR12-0m (b). Le bleu indique une plus grande quantité de précipitations générées par MAR12/13-600m et le rouge par MAR12/13-0m. Le polygone rouge entoure le bassin versant de la Vesdre et le vert celui de la Dyle.

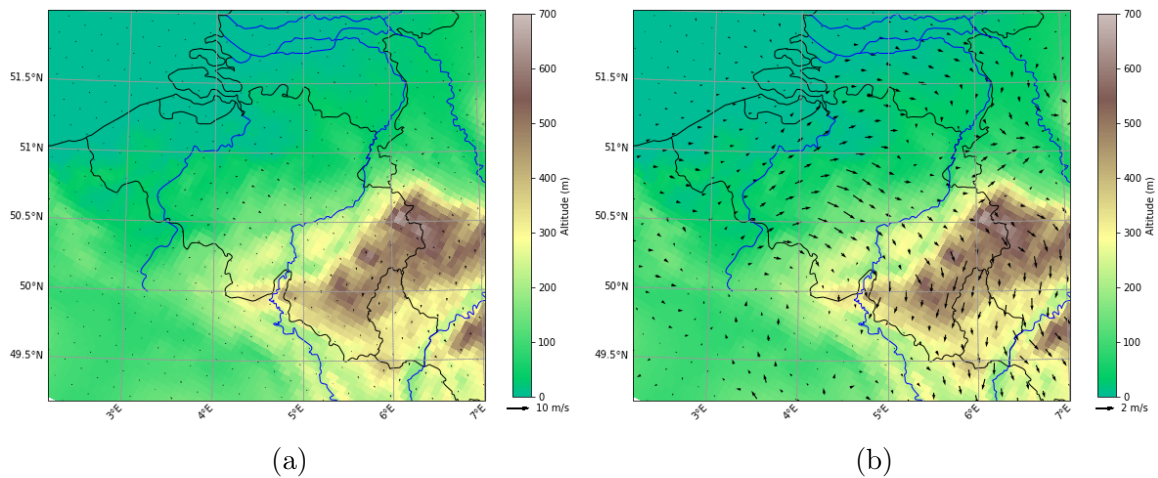


FIGURE 19 – Différence entre MAR13-600m et MAR13-0m de la moyenne de la vitesse du vent (vitesse en m/s) du 13 au 15 juillet 2021. La figure (a) utilise la même échelle que la figure 17 et la figure (b) une autre échelle pour amplifier les différences.

4.2.3 Lien entre tests de sensibilité à la résolution et à la topographie

Dans la section explicitant les résultats des tests de sensibilité à la résolution, nous avons émis l'hypothèse qu'un lissage topographique dû à une dégradation de la résolution pourrait expliquer, du moins partiellement, les différences observées dans la vallée de la Vesdre. Après analyse de l'impact du Massif ardennais simulé par le MAR, nous pouvons affirmer que ces différences sont davantage une conséquence du changement de la résolution que du lissage topographique qui en résulte. En comparant MAR12-5km et MAR12-10km grâce au tableau 2, nous constatons une diminution relative de 28 %. Or, la figure 16 montre qu'à une résolution de 10 km, l'altitude maximale des Hautes Fagnes dépassent toujours les 500 mètres. Il est également évident qu'une partie du bassin versant de la Vesdre a toujours une altitude largement supérieure à 400 mètres. Or, nous avons constaté une baisse significative qu'à partir du moment où nous avons fixé le seuil à 300 mètres. Dès lors, comme pour la vallée de la Dyle, les différences observées sont surtout provoquées par des changements de comportement du MAR induit par un changement de la résolution.

4.2.4 Conclusion

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de nos différents tests de sensibilité. Tous ont montré que la modélisation des précipitations, et en particulier d'intenses précipitations, restent un exercice difficile. Les précipitations dépendent d'un grand nombre d'autres variables physiques et cette dépendance leur confère par conséquent un caractère chaotique. Ainsi, ce dernier a été mis en évidence, de manière quelque peu involontaire, en influençant la topographie de la grille utilisée par le MAR.

Le MAR présente une grande sensibilité à la résolution où des résultats significativement différents peuvent être obtenus en la faisant varier. Cette conclusion est particulièrement solide pour les événements extrêmement pluvieux comme nous l'avons démontré en analysant juillet 2021. En outre, celle-ci reste valable aussi pour des épisodes pluvieux non exceptionnels pour lesquels d'importantes variations relatives entre les différentes simulations peuvent apparaître. Pour résumer, il est impossible d'établir une relation mathématique liant la variation de la résolution et la variation des précipitations.

Les résultats visant à déterminer l'impact du Massif ardennais sur les intenses précipitations de juillet 2021 sont à considérer avec précaution. Comme nous l'avons expliqué, la

vitesse de chute des précipitations y est erronée, entraînant un surplus de précipitations dans la région de Saint-Hubert. En conséquence, le cumul de précipitations dans le bassin de la Vesdre est sous-estimé. Bien qu'il soit évident, après l'analyse des différentes figures, que la topographie a joué un rôle dans la création d'intenses pluies, la quantification de ce phénomène dans la vallée de la Vesdre est incertaine. En fonction de l'ensemble de simulations utilisé, la diminution relative du cumul moyenné spatialement des précipitations varient de 15,5 % à 24,6 % quand on retire entièrement la topographie. Néanmoins, il serait intéressant de refaire un test de sensibilité avec une version corrigée du MAR. Concernant le bassin versant de la Dyle, le jeu de simulations réalisé avec MAR à 5 km semble indiquer un accroissement des précipitations par soulèvement orographique. À l'opposé, MAR à 7,5 km nous donne des conclusions inverses. L'impact du relief sur les intenses précipitations en juillet 2021 y reste donc indéterminé.

Les tests de sensibilité à la topographie ont néanmoins permis de démontrer que le lissage de la topographie résultant d'une dégradation de la résolution ne permet pas d'expliquer complètement les différences observées dans la section 4.1.

4.3 Projections climatiques

4.3.1 Vallée de la Vesdre

Présentation générale

Le tableau 10 résume notre analyse des événements extrêmement pluvieux dans la vallée de la Vesdre. Nous y avons recensé tous les épisodes pluvieux avec un cumul supérieur à 100 mm/3 jours et à 150 mm/3jours¹⁶ Nous allons uniquement analyser les 13 événements appartenant à la seconde catégorie dont leur cumul se rapproche de ceux estimés pour la vallée de la Vesdre (voir section 4.1.1).

Nous remarquons que le GCM utilisé pour forcer le MAR influe énormément sur la prédiction d'extrêmes précipitations. MAR-MPI prédit trois événements extrêmes dans un avenir relativement proche si l'humanité suit les scénarios SSP les moins optimistes. À l'inverse, MAR-MIROC est plus alarmant pour le scénario SSP1-2.6 où 4 événements se répartissant tout le long du siècle ont été prédits. En outre, MIROC-585 n'exclut pas le risque d'extrêmes pluies. Cependant, l'analyse des cumuls révèle que ces deux événements sont d'intensité moindre à ceux prédits par MIROC-126. Quant à MAR-NOR, ce modèle se trouve à l'intersection des deux précédents. Ce dernier prédit un risque d'extrêmes précipitations pour les deux scénarios intermédiaires.

Si nous nous intéressons à la répartition temporelle de ces 13 événements, nous remarquons que huit d'entre eux ont lieu avant 2060. Les cinq restants sont surtout concentrés dans les deux scénarios les plus optimistes. Pour expliquer cette répartition, nous devons utiliser des notions de thermodynamique. La relation de Clausius-Clapeyron lie la pression de vapeur saturante d'une substance volatile avec sa température. Appliquée à l'atmosphère, cette relation montre qu'au plus l'air est chaud, au plus il peut contenir de la vapeur d'eau (suivant une relation exponentielle). Ainsi, différentes études ont montré une augmentation de 6 à 7 % de la pression partielle de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère par degré de réchauffement climatique (TABARI (2020), LENDERINK et al. (2021)). Or, une hausse de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère implique un réservoir plus important pour les intenses précipitations. Néanmoins, comme mentionné dans FETTWEIS et DOUTRELOUP (2022), un

16. Non inclus dans la première catégorie.

réchauffement climatique trop important peut conduire à des étés trop secs, inhibant la production de tels extrêmes pluviométriques. En conséquence, il est logique d'observer la majorité de ces événements se produire lorsque le réchauffement climatique reste relativement modéré. Néanmoins, MAR-MIROC montre qu'un réchauffement climatique majeur n'est pas nécessairement synonyme d'une absence totale d'extrême pluvieux, allant à contresens des autres modèles.

Projection	< 2015		2020-2040		2040-2060		2060-2080		2080-2100	
	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j
MIROC6										
HIST	3									
SSP1-2.6				1	2	1	2	2	4	
SSP2-4.5					3		4		1	
SSP3-7.0			1				3		3	
SSP5-8.5				1	2		5		1	1
MPI-ESM1-2-HR										
HIST										
SSP1-2.6					1					
SSP2-4.5							2			
SSP3-7.0				1	1	1				
SSP5-8.5			1	1			3			
NOR-ESM2										
HIST	4	1								
SSP1-2.6			5		1		5		2	
SSP2-4.5			1		1	1	1		2	1
SSP3-7.0			2		3	1	1	1	3	
SSP5-8.5					4		1			

TABLE 10 – Tableau récapitulatif des projections réalisées avec MAR13-5km dans la vallée de la Vesdre.

Circulation atmosphérique

Parmi les 13 événements extrêmement pluvieux recensés, nous pouvons les diviser en trois catégories.

La première comprend sept événements ayant été produits par une circulation atmosphérique semblable à celle de juillet 2021. La figure 20 montre la moyenne de la vitesse du vent à 700 hPa pour ces derniers. Une évidente circulation cyclonique, majoritairement centrée sur l'Allemagne, est présente dans tous les cas. On constate aussi la plupart du temps un maximum de précipitations sur le flanc ouest de ces systèmes dépressionnaires. Bien que nous ayons fait systématiquement une moyenne sur trois jours, des circulations cycloniques aussi marquées supposent un déplacement relativement faible de ces dernières, s'apparentant dès lors à une situation de blocage. Tous ces événements se produisent exclusivement en été, rappelant une nouvelle fois les événements de juillet 2021. KAUTZ et al. (2022) a montré que des situations de blocage atmosphériques peuvent influencer la fréquence d'apparition d'événements extrêmes du cycle hydrologique. Il y est démontré que plusieurs épisodes d'intenses précipitations en Europe centrale résultent d'un blocage atmosphérique. Il n'est donc pas anormal que la majorité des événements pluvieux que nous avons détectés résulte d'une circulation atmosphérique pratiquement invariable.

La figure 21 montre les cumuls correspondants à l'échelle de la Belgique simulés par MAR13-5km¹⁷. L'effet de barrière du massif ardennais y est particulièrement marquant. En effet, dans la plupart des cas, on y constate un maximum de précipitations dans le coin supérieur gauche du polygone délimitant la vallée de la Vesdre. Or, c'est précisément dans cette région du bassin versant que l'on y retrouve ses points culminants. En outre, le plateau de Saint-Hubert, la Baraque de Fraiture et la Baraque Michel sont bien visibles pour certains événements comme illustré, par exemple, sur les figures 21b et 21e. Dès lors, une amplification des précipitations résultant d'un soulèvement orographique par le Massif ardennais est commun pour les événements pluvieux provenant d'un système dépressionnaire centré sur l'Allemagne.

17. Notons qu'ici, nous ne parlerons pas de la simulation effectuée dans le cadre de tests de sensibilité, mais bien de la projection du MAR v13 à 5km.

Analysons la deuxième catégorie d'événements extrêmement pluvieux dont les circulation atmosphériques sont représentées sur la figure 22. Ces derniers résultent d'un intense courant atmosphérique en altitude, d'origine maritime, avec une vitesse principalement dirigée vers l'est. Dans les trois cas, ce phénomène se produit en automne ou au début de l'hiver et produit des cumuls de précipitations comparables aux événements estivaux. Comme pour la précédente catégorie, la figure 23 illustre les précipitations à l'échelle de la Belgique. Notons qu'une nouvelle fois, une influence du Massif ardennais n'est pas à exclure. Les trois points culminants cités ci-dessus apparaissent distinctement sur la figure 23b. Les deux autres événements présentent également un maximum de précipitations dans les Hautes Fagnes.

La dernière catégorie contient les trois derniers événements n'ayant pas pu être classés dans les deux catégories précédentes. Pour ceux-ci, aucune circulation atmosphérique typique est remarquable. Deux d'entre eux montrent une circulation cyclonique, mais bien moins marquée que celles illustrées sur la figure 20, allant dans le sens d'un système dépressionnaire en mouvement.

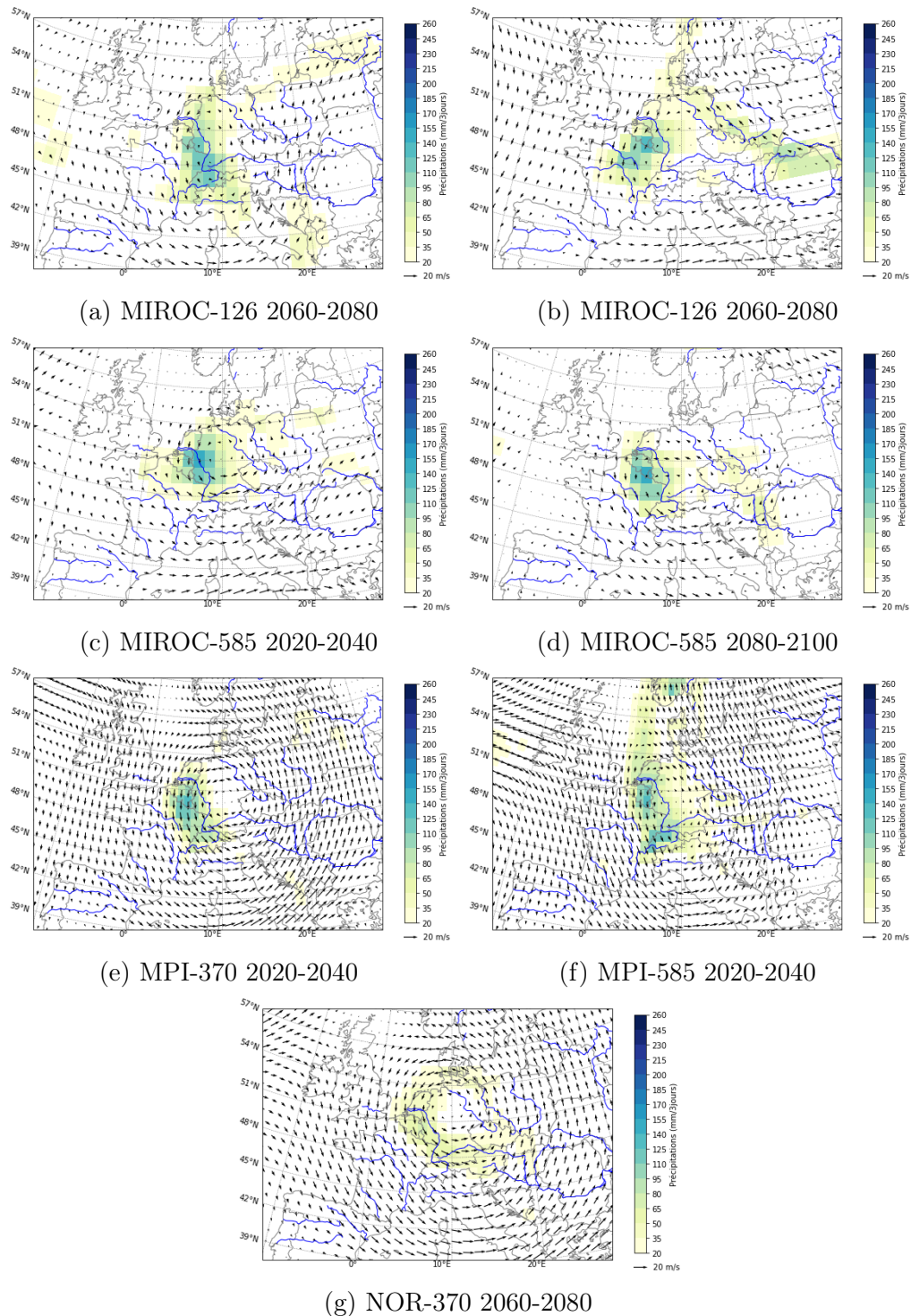


FIGURE 20 – Cumuls de précipitations (mm/3journs) et moyennes de la vitesse du vent (vitesse en m/s) pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3journs) simulés par MAR13-5km. Ces évènements présentent tous une circulation cyclonique semblable à celle observée en juillet 2021. Pour chacun d'entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d'apparition.

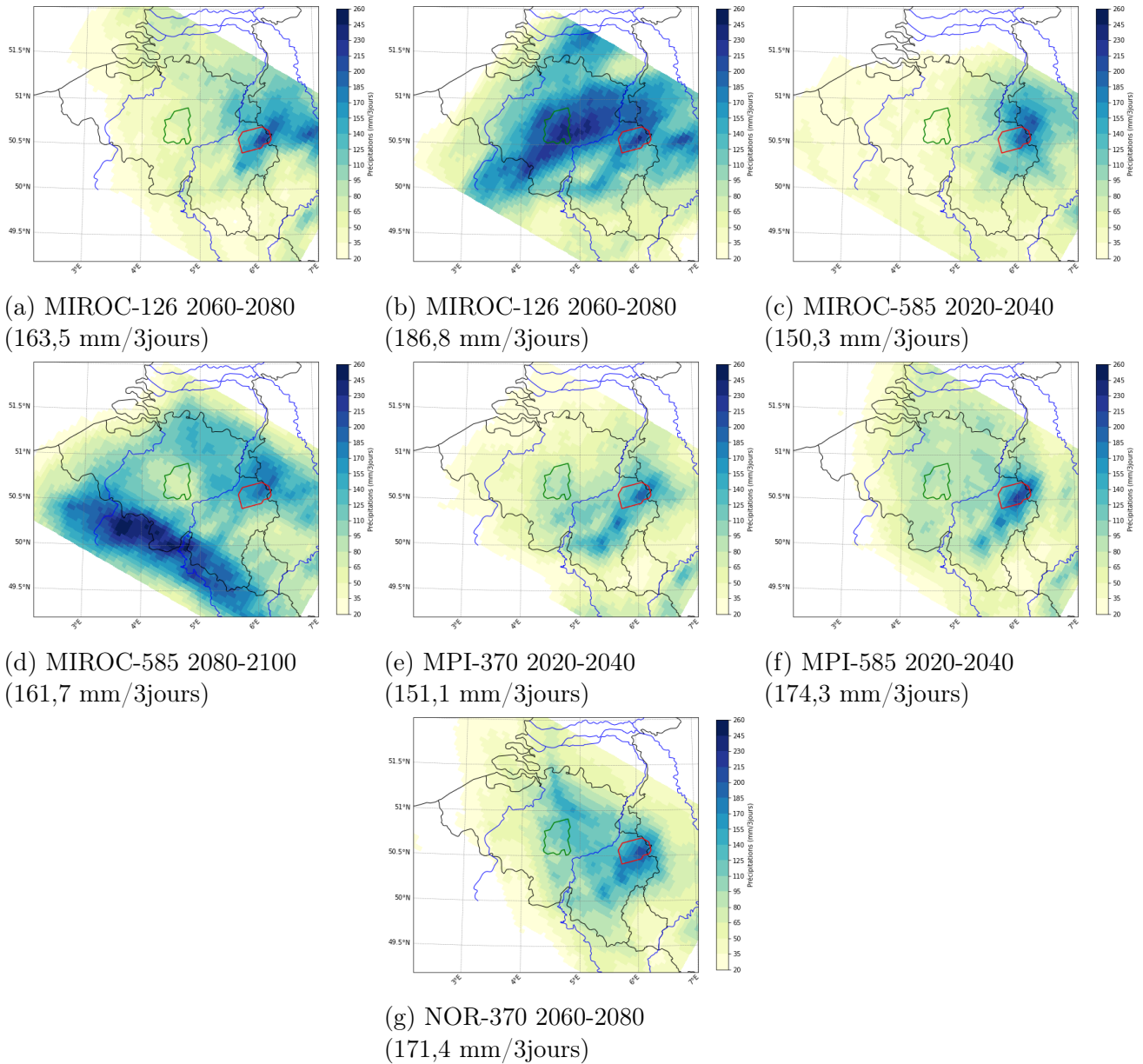


FIGURE 21 – Cumuls de précipitations (mm/3jours) pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par le MAR13-5km. Ces évènements présentent tous une circulation cyclonique évidente semblable à celle observée en juillet 2021. Pour chacun d’entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d’apparition. Les cumuls moyennés sur la vallée de la Vesdre sont affichés entre parenthèses.

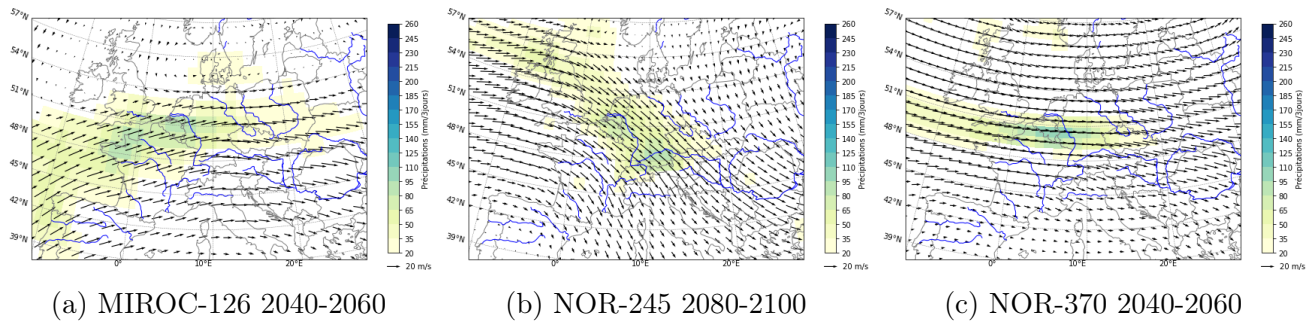


FIGURE 22 – Cumuls de précipitations (mm/3jours) pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par MAR13-5km. Un flux atmosphérique automnal ou hivernal avec une importante vélocité dirigée majoritairement vers l’est est commun à tous ces évènements. Pour chacun d’entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d’apparition.

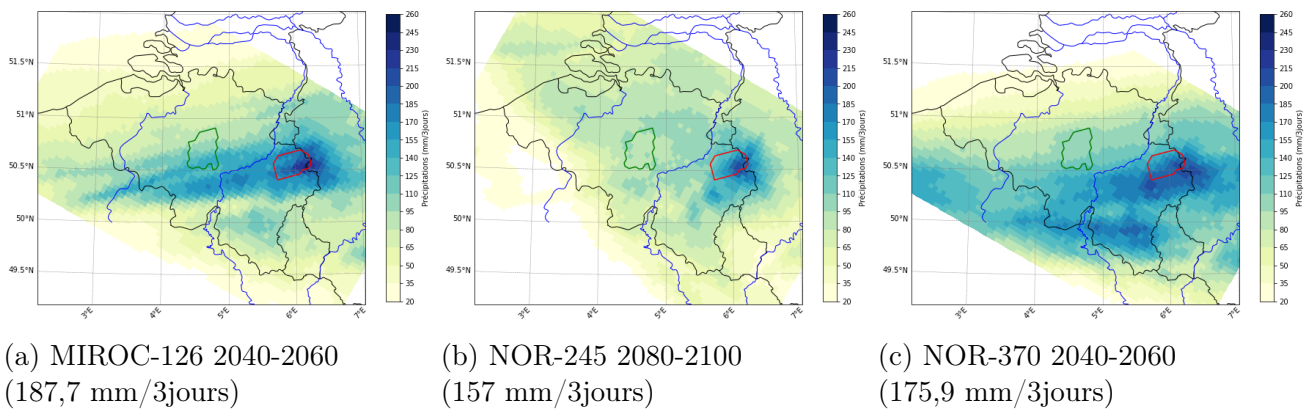


FIGURE 23 – Cumuls de précipitations (mm/3jours) pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par MAR13-5km. Un flux atmosphérique automnal ou hivernal avec une importante vélocité dirigée majoritairement vers l’est est commun à tous ces évènements. Pour chacun d’entre eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d’apparition. Les cumuls moyennés sur la vallée de la Vesdre sont affichés entre parenthèses.

Comparaison avec les GCM

Dans notre recherche d'événements extrêmement pluvieux, nous nous sommes aussi intéressés aux données issues directement des GCM. Il ressort qu'aucun de ces derniers ne prédit d'événements avec un cumul supérieur à 150 mm/3jours. Toutes projections confondues, seuls 9 épisodes pluvieux dépassant les 100 mm/3jours ont été générés (contre 71 par MAR13-5km) dont six par MIROC6. Notons par ailleurs que la projection suivant le scénario SSP5-8.5 de ce dernier modèle est la plus optimiste, contenant à elle seule 4 des 9 évènements dont le plus intense (s'élevant à 124 mm/3jours).

Il est donc évident que les GCM ne semblent pas être adaptés pour prédire des évènements aussi extrêmes, du moins si l'on ne s'intéresse qu'au cumul des précipitations. Cependant, il peut être intéressant de regarder la déviation des cinq événements les plus extrêmes de chaque projection par rapport à leur moyenne climatologique calculée sur la période de référence (1980-2014). En effet, un cumul de 100 mm de précipitations sur trois jours sera plus extrême pour un modèle en moyenne plus sec en comparaison avec un modèle plus humide. Ainsi, l'importante différence observée entre MAR13-5km et les GCM pourrait s'expliquer par des cumuls ordinairement moins importants sur la période de référence. En d'autres termes, les GCM seraient initialement plus secs que le MAR dans le bassin versant de la Vesdre.

Les tableaux 11, 12 et 13 confirment cette hypothèse. Pour chaque projection faite par le MAR et les GCM eux-mêmes, ils recensent la moyenne des déviations et des cumuls des précipitations des cinq événements les plus pluvieux. Comme exemple, analysons la première ligne du tableau 11. En moyenne, MAR-NOR126 intensifie les précipitations des évènements extrêmes de 70,38 % par rapport NOR-ESM2. Néanmoins, cette différence relative pour les déviations est seulement 7,01 %. Dès lors, bien que MAR-NOR126 simule des cumuls bien plus importants que NOR-126, la déviation par rapport à la référence climatologique reste relativement similaire. Expliqué différent, un évènement avec un cumul de 76,88 mm/3jours prédit par NOR-126 est juste 7 % moins extrême qu'un cumul de 130,98 mm/3jours simulé par MAR-NOR126.

Le tableau 13 est d'ailleurs particulièrement intéressant, car nous y constatons que MIROC6 génère des évènements en moyenne plus extrêmes que MAR-MIROC.

Cette absence de corrélation entre la moyenne des cumuls et celle des déviations n'est pas incohérente. Nous avons vu précédemment que le relief amplifie dans certains cas les précipitations extrêmes. Or, cette amplification n'est pas un phénomène propre aux intenses précipitations, mais à leur entièreté. Dès lors, comme les GCM sont incapables de bien considérer la topographie de par leur résolution très grossière, ceux-ci ne vont pas simuler de soulèvement orographique, qu'importe l'intensité des précipitations. Notons que nous nous intéressons uniquement aux différences dues à la topographie, mais nous n'affirmons pas que ce seul facteur explique l'ensemble des différences observées entre le MAR et les GCM.

Scénario	Déviacion	Déviacion	Précipitations	Précipitations	Taux d'accroissement	Taux d'accroissement
	NOR	MAR13	NOR	MAR13	précipitations	déviacion
126	8,73	9,34	76,88	130,98	70,38	7,01
245	8,24	9,97	72,93	139,06	90,68	21,05
370	9,22	9,91	80,79	138,28	71,17	7,52
585	9,22	7,77	80,73	110,85	37,31	-15,77

TABLE 11 – Moyennes des déviacions par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par NOR-ESM2 et MAR13-5km forcé par ce dernier. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre NOR-ESM2 et MAR13-5km.

Scénario	Déviacion	Déviacion	Précipitations	Précipitations	Taux d'accroissement	Taux d'accroissement
	MPI	MAR13	MPI	MAR13	précipitations	déviacion
126	7,57	7,72	77,16	97,15	25,90	1,88
245	7,98	7,69	80,84	98,12	21,37	-3,66
370	8,18	8,25	82,63	117,82	42,59	0,84
585	9,45	9,21	94,05	122,72	30,49	-2,52

TABLE 12 – Moyennes des déviacions par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MPI-ESM1-2-HR et MAR13-5km forcé par ce dernier. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MPI-ESM1-2-HR et MAR13-5km.

Scénario	Déviacion	Déviacion	Précipitations	Précipitations	Taux d'accroissement	Taux d'accroissement
	MIROC	MAR13	MIROC	MAR13	précipitations	déviacion
126	11,05	13,79	96,22	174,23	81,08	24,8
245	10,58	9,56	91,68	124,22	35,5	-9,64
370	10,61	9,85	91,93	127,72	38,94	-7,16
585	12,72	10,46	108,78	134,86	23,97	-17,74

TABLE 13 – Moyennes des déviacions par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MIROC6 et MAR13-5km forcé par ce dernier. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MIROC6 et MAR13-5km.

Comparaison avec MAR v12 à 7.5 km

Le tableau 14 récapitule nos résultats obtenus avec MAR12-7.5km. En le comparant avec 10, nous constatons bien moins d'évènements extrêmes. Ici, seuls sept évènements avec un cumul supérieur à 150 mm/3jours sont recensés. Une importante baisse est aussi constatée pour les évènements avec une intensité plus faible.

Les raisons de ces écarts sont comparables à celles expliquant la différence entre le MAR et les GCM. Pour s'en convaincre, nous pouvons analyser les tableaux 15, 16 et 17. Ceux-ci illustrent que dans la plupart des cas, MAR13-5km prédit en moyenne des évènements plus intenses, mais déviant moins de la moyenne sur la période de référence par rapport à MAR12-7.5km. Ce dernier est en général plus sec sur la vallée de la Vesdre, diminuant par conséquent le nombre d'évènements supérieurs aux seuils fixés.

Dans notre comparaison avec les GCM, nous avons affirmé que la topographie était peu prise en compte dans ces modèles à faible résolution, expliquant leur incapacité à produire des cumuls de précipitations semblables à ceux observés en juillet 2021. Dès lors, nous pouvons nous demander si des différences entre la topographie de MAR13-5km et MAR12-7.5km sont partiellement responsables des variations observées.

La figure 24 va dans ce sens, où nous remarquons de plus amples différences aux différents points culminants belges. À l'inverse, 25 montre que d'autres facteurs peuvent également intervenir. Nous n'y voyons pas aussi explicitement une influence topographique. Rappelons que MAR13-5km s'occupe intégralement de la création des précipitations convectives au contraire de MAR12-7.5km. En outre, nous avons démontré dans la section 4.1 que MAR peut avoir un comportement totalement différent en changeant la résolution. Dès lors, les causes ayant conduit aux différences entre les tableaux 10 et 14 sont probablement multiples.

Projection	< 2015		2020-2040		2040-2060		2060-2080		2080-2100	
	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j
MIROC6										
HIST	2									
SSP1-2.6			3		2		2	1	1	1
SSP2-4.5			1				1	1		
SSP3-7.0				1			1		1	
SSP5-8.5				1	2					
MPI-ESM1-2-HR										
HIST										
SSP1-2.6										
SSP2-4.5										
SSP3-7.0			1		1					
SSP5-8.5				1						
NOR-ESM2										
HIST	1									
SSP1-2.6			1				2		2	
SSP2-4.5			1		1				2	
SSP3-7.0							2	1	1	
SSP5-8.5			1				2			

TABLE 14 – Tableau récapitulatif des projections réalisées avec MAR12-7.5km dans la vallée de la Vesdre.

Scénario	Déviaton MAR12	Déviaton MAR13	Précipitations MAR12	Précipitations MAR13	Taux d'accroissement précipitations	Taux d'accroissement déviaton
126	10,21	9,34	122,25	130,98	7,15	-8,46
245	8,8	9,97	106,79	139,06	30,21	13,35
370	10,61	9,91	126,68	138,28	9,16	-6,55
585	8,01	7,77	98,07	110,85	13,03	-3

TABLE 15 – Moyennes des déviations par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MAR12-7.5km et MAR13-5km forcés par NOR-ESM2. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MAR12-7.5km et MAR13-5km.

Scénario	Déviaton MAR12	Déviaton MAR13	Précipitations MAR12	Précipitations MAR13	Taux d'accroissement précipitations	Taux d'accroissement déviaton
126	8,29	7,72	86,47	97,15	12,35	-6,96
245	8,01	7,69	83,85	98,12	17,02	-4
370	9,88	8,25	101,21	117,82	16,41	-16,51
585	10,20	9,21	104,20	122,72	17,78	-9,71

TABLE 16 – Moyennes des déviations par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MAR12-7.5km et MAR13-5km forcés par MPI-ESM1-2-HR. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MAR12-7.5km et MAR13-5km.

Scénario	Déviaton MAR12	Déviaton MAR13	Précipitations MAR12	Précipitations MAR13	Taux d'accroissement précipitations	Taux d'accroissement déviaton
126	15,19	13,79	152,26	174,23	14,43	-9,20
245	12,65	9,56	128,29	124,22	-3,17	-24,41
370	11,34	9,85	115,93	127,72	10,17	-13,11
585	11,11	10,46	113,83	134,86	18,47	-5,88

TABLE 17 – Moyennes des déviations par rapport à la période 1980-2014 et des précipitations des cinq évènements les plus pluvieux prédits par MAR12-7.5km et MAR13-5km forcés par MIROC6. Les deux dernières colonnes représentent la différence relative entre MAR12-7.5km et MAR13-5km.

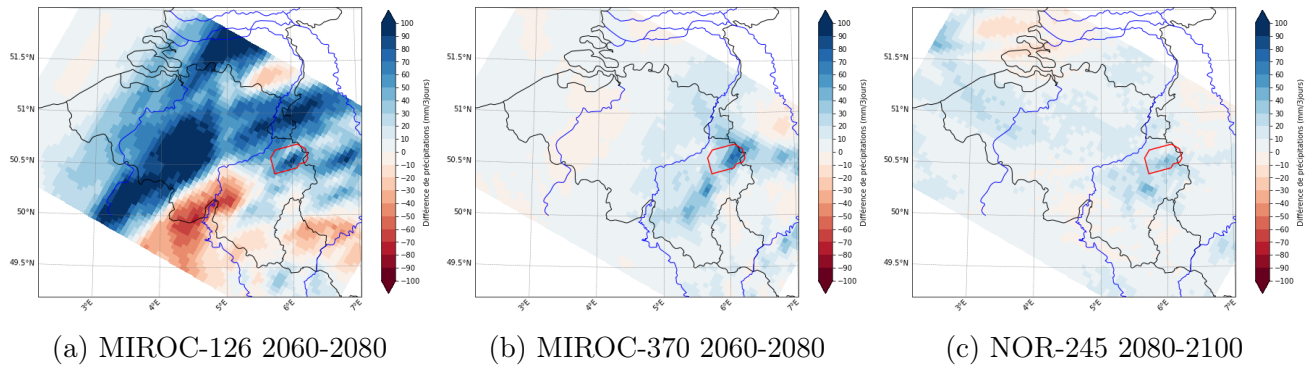


FIGURE 24 – Différences des cumuls de précipitations (mm/3jours) entre MAR13-5km et MAR12-7.5km pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par le MAR13-5km. La couleur bleue/rouge représente une plus grande quantité de précipitations générées par MAR13-5km/MAR12-7.5km. Une influence topographique y est visible. Pour chacun d'eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d'apparition.

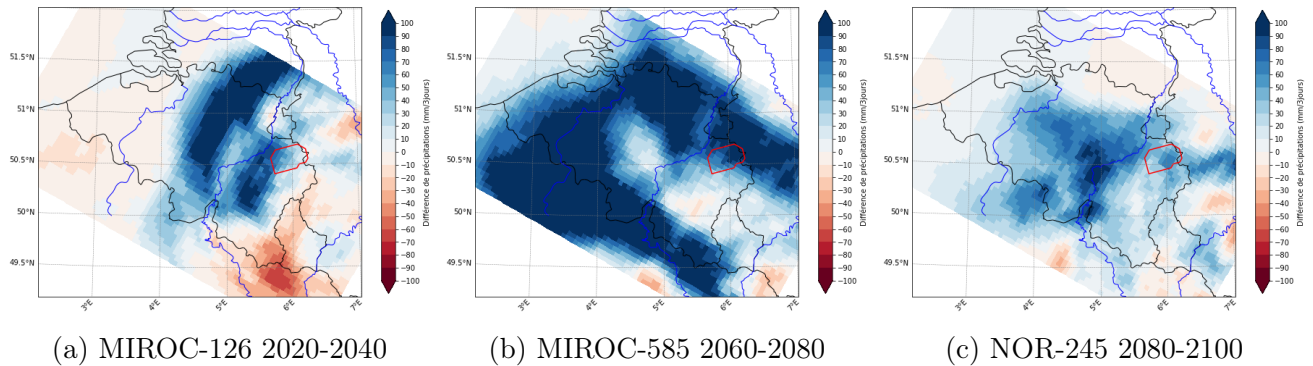


FIGURE 25 – Différence des cumuls de précipitations (mm/3jours) entre MAR13-5km et MAR12-7.5km pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 150 mm/3jours) simulés par le MAR13-5km. La couleur bleue/rouge représente une plus grande quantité de précipitations générées par MAR13-5km/MAR12-7.5km. Une influence topographique y est moins évidente. Pour chacun d'eux, le GCM ayant forcé le MAR est indiqué sous les figures ainsi que leur période d'apparition.

4.3.2 Vallée de la Dyle

Présentation générale

Le tableau 18 nous renseigne sur les occurrences d'événements extrêmes simulés par MAR13-5km dans la vallée de la Dyle. Au total, nous observons 16 épisodes pluvieux avec un cumul supérieur à 100 mm/3jours. L'utilisation du seuil de 100 mm/3jours repose sur deux critères :

- En utilisant MAR13-5km forcé par ERA5, nous avons obtenu un cumul de 103,91 mm/3jours sur la vallée de la Dyle pour les évènements de juillet 2021.
- En fonction du GCM ayant forcé le MAR, 100 mm/3jours correspond à une déviation par rapport à la période de référence de 11,5 à 13 écart-types. En comparaison, 150 mm/3jours dans la vallée de la Vesdre correspond à une déviation de 10,8 à 12,5 écart-types.

Contrairement à la vallée de la Vesdre, nous remarquons une meilleure répartition temporelle des événements extrêmement pluvieux. En revanche, MAR-MIROC est de nouveau le modèle le plus optimiste et MAR-MPI le plus pessimiste. Également, la grande majorité des évènements ont lieu dans un contexte dans lequel le réchauffement climatique n'est pas (encore) trop important. Ainsi, comme pour la Vesdre, un réchauffement climatique trop conséquent réduit le risque d'avoir des cumuls de précipitations équivalents à ceux de juillet 2021 dans le bassin versant de la Dyle.

Circulation atmosphérique et lien avec la vallée de la Vesdre

Au contraire de la vallée de la Vesdre où nous avons pu établir deux catégories distinctes, les évènements extrêmes de la Dyle présentent une bien plus grande variabilité dans leur circulation atmosphérique respective. En outre, aucune circulation typique ne domine la création de ces évènements. Il n'est donc pas réellement possible de réaliser une analyse analogue à celle de la Vesdre.

Néanmoins, sur les 16 extrêmes recensés dans la vallée de la Dyle, cinq d'entre eux impliquent un cumul supérieur à 150 mm/3jours pour la Vesdre. Parmi ceux-ci, deux d'entre eux résultent d'une situation proche d'un blocage atmosphérique. Ainsi, contrairement à

juillet 2021, les projections indiquent qu'il est possible d'expérimenter d'intenses précipitations dans une des deux vallées sans que cela soit le cas dans l'autre. Cette situation semble d'ailleurs être majoritaire.

Projection	< 2015		2020-2040		2040-2060		2060-2080		2080-2100	
	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j
MIROC6										
HIST	1									
SSP1-2.6			1		2			1	1	
SSP2-4.5								1		
SSP3-7.0					1					1
SSP5-8.5			1							
MPI-ESM1-2-HR										
HIST										
SSP1-2.6										
SSP2-4.5										
SSP3-7.0					1					
SSP5-8.5					1					
NOR-ESM2										
HIST										
SSP1-2.6							1		1	
SSP2-4.5										
SSP3-7.0					1		1		1	
SSP5-8.5										

TABLE 18 – Tableau récapitulatif des projections réalisées avec MAR13-5km dans la vallée de la Dyle.

Comparaison avec les GCM

En analysant les événements extrêmes prédits par les GCM recensés dans le tableau 19, nous remarquons une importante différence avec la vallée de la Vesdre. Deux des trois GCM prédisent autant d'événements extrêmes que le MAR forcé par ces derniers. Certes, nous remarquons des changements dans la répartition entre les scénarios et dans la répartition temporelle. D'ailleurs, il est surprenant de constater que MIROC-585 prédit 5 événements extrêmes répartis équitablement le long du siècle contre seulement 1 pour MAR-MIROC585.

Néanmoins, l'analyse de la période de référence nous permet de mieux comprendre ces résultats. Au contraire de la Vesdre, tous les GCM sont en moyenne plus humides que le MAR, qu'importe le forçage. Dès lors, il n'est pas étonnant que ces GCM soient capables de prédire des événements intenses dans le point de grille incluant la vallée de la Dyle. À l'inverse, il est même plutôt surprenant que NOR-ESM2, bien que plus humide que MAR-NOR, génère aussi peu d'événements extrêmes.

Il est néanmoins intéressant de noter que sur les 12 événements prédits par les GCM, MAR prédit des cumuls de précipitations bien inférieurs à 100 mm/3jours pour sept d'entre eux. Les figures 26 et 27 illustrent ce phénomène se produisant surtout pour MIROC-585. Cela est sûrement dû à des différences dans la génération des précipitations convectives. Tous ces phénomènes se déroulent pendant l'été, présentent un flux d'origine maritime et une circulation cyclonique. Il n'est donc pas impossible que l'atmosphère soit instable et que les GCM, au contraire du MAR, génèrent une grande quantité de précipitations convectives.

Projection	< 2015		2020-2040		2040-2060		2060-2080		2080-2100	
	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j	> 100 mm/3j	> 150 mm/3j
MIROC6										
HIST	1									
SSP1-2.6			1							1
SSP2-4.5							2			
SSP3-7.0										
SSP5-8.5			1		1		1		2	
MPI-ESM1-2-HR										
HIST										
SSP1-2.6										
SSP2-4.5										
SSP3-7.0									1	
SSP5-8.5			1							
NOR-ESM2										
HIST										
SSP1-2.6										
SSP2-4.5										
SSP3-7.0					1					
SSP5-8.5										

TABLE 19 – Tableau récapitulatif des projections des différents GCM dans la vallée de la Dyle.

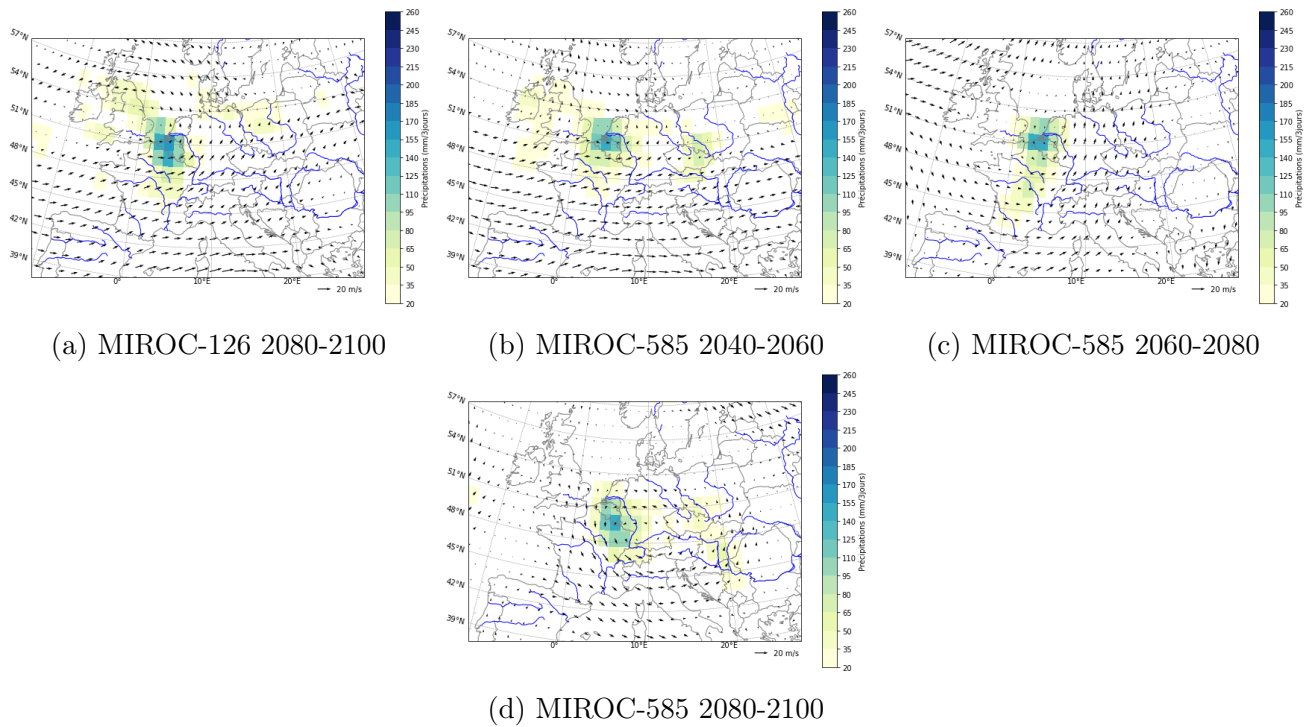


FIGURE 26 – Cumuls des précipitations (mm/3jours) et moyenne de la vitesse du vent (vitesse en m/s) pour différents évènements extrêmement pluvieux (> 100 mm/3jours) simulés par les différents GCM indiqués sous les cartes.

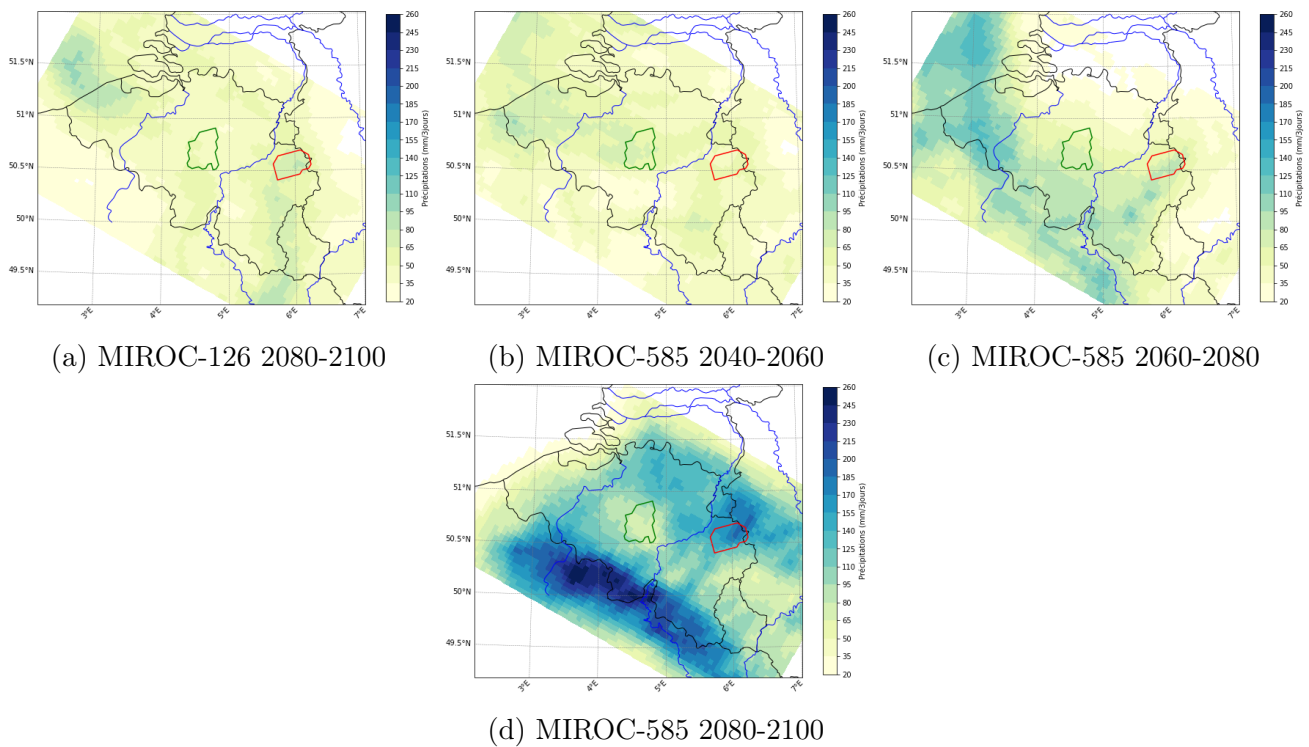


FIGURE 27 – Cumuls des précipitations (mm/3jours) prédits par MAR13-5km forcé par les GCM indiqués sous les cartes. Au contraire des GCM, MAR ne simule pas d'intenses précipitations.

5 Conclusion

Les inondations de juillet 2021, par leur gravité, restent gravées dans la mémoire de nombreux citoyens belges.

Dans un premier temps, nous avons étudié cet événement avec le modèle MAR. Comme nous l'avons démontré, la reconstruction d'un tel événement par un modèle régional est fortement sensible à la résolution. Pour un même RCM, des différences significatives dans la prédiction d'extrêmes précipitations peuvent être remarquées en changeant la résolution. Nous avons prouvé que ces différences étaient surtout la conséquence d'un changement de comportement du MAR. Cette assertion est également vraie pour d'autres épisodes pluvieux non extrêmes.

Dans ce mémoire, nous avons tenté de quantifier l'impact du Massif ardennais sur la création des intenses précipitations observées en juillet 2021. Différentes études affirment qu'une amplification des précipitations due à un soulèvement orographique a été un facteur aggravant. Nos deux ensembles de simulations ont effectivement montré, dans la vallée de la Vesdre, un accroissement de 15,5 % à 24,6 % des précipitations provoqué par la présence du Massif ardennais. Néanmoins, nous avons démontré que MAR forcé par ERA5 reconstruit mal les cumuls de précipitations observés. Dès lors, bien qu'il soit indéniable que ce massif a eu une influence, la quantification de cette dernière reste incertaine.

Dans le dernier chapitre, nous nous sommes intéressés au futur des extrêmes précipitations dans la vallée de la Vesdre et la Dyle. Il ressort de notre étude que ce genre d'événement est susceptible de se reproduire dans les prochaines décennies, en particulier si le réchauffement climatique reste modéré. L'analyse de la circulation synoptique montre que des situations s'apparentant à un blocage atmosphérique sont un des principaux facteurs conduisant à d'intenses précipitations dans la vallée de la Vesdre. Pour finir, nous avons illustré la faiblesse des GCM pour prédire des cumuls de précipitations semblables à ceux observés en juillet 2021, surtout dans le bassin versant de la Vesdre.

Références

- ASSURALIA. (2022). 11 mois après les inondations, près de 90 % des sinistrés ont été indemnisés [Consulté le 16 juillet 2023, à l'adresse <https://press.assuralia.be/11-mois-apres-les-inondations-pres-de-90--des-sinistres-ont-ete-indemnisés>].
- BECHTOLD, P., BAZILE, E., GUICHARD, F., MASCART, P., & RICHARD, E. (2001). Amass-flux convection scheme for regional and global models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(573), 869-886. <https://doi.org/10.1002/qj.49712757309>
- BRASSEUR, O. (2001). Development and application of a physical approach to estimating wind gusts. *Monthly Weather Review*, 129(1), 5-25. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0005:DAAOAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0005:DAAOAP>2.0.CO;2)
- BRASSEUR, O., GALLÉE, H., CREUTIN, J.-D., LEBEL, T., & MARBAIX, P. (2002). High resolution simulations of precipitation over the Alps with the perspective of coupling to hydrological models. In M. BENISTON (Éd.), *Climatic Change : Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management* (p. 75-99). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/0-306-47983-4_4
- BRASSEUR, O., NTEZIMANA, V., GALLÉE, H., SCHAYES, G., & TRICOT, C. (1998). Importance of the convective adjustment scheme in the simulation of the diurnal cycle of convective activity in Africa. *Proceedings of the International Conference on Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology in Memoriam Franz Bultot*.
- BRUN, É., DAVID, P., SUDUL, M., & BRUNOT, G. (1992). A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 38(128), 13-22. <https://doi.org/10.3189/S0022143000009552>
- DEWALS, B., ERPICUM, S., PIROTTON, M., & ARCHAMBEAU, P. (2021). July 2021 extreme floods in the Belgian part of the Meuse basin [Consulté à l'adresse <https://orbi.uliege.be/handle/2268/263750>].
- DOUTRELOUP, S., WYARD, C., AMORY, C., KITTEL, C., ERPICUM, M., & FETTWEIS, X. (2019). Sensitivity to convective schemes on precipitation simulated by the regional climate model MAR over Belgium (1987–2017). *Atmosphere*, 10(1), 34. <https://doi.org/10.3390/atmos10010034>
- FETTWEIS, X., & DOUTRELOUP, S. (2022). Analyse météorologique de l'évènement pluvieux de juillet 2021 et évolution climatique du bassin de la Vesdre [Consulté à l'adresse <https://orbi.uliege.be/handle/2268/296474>].
- GALLEE, H., & SCHAYES, G. (1994). Development of a three-dimensional meso-primitive equation model : katabatic winds simulation in the area of Terra Nova Bay. *Monthly Weather Review*, 122, 671-685. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0671:DOATDM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0671:DOATDM>2.0.CO;2)
- GALLÉE, H. (2004). A high-resolution simulation of a West African rainy season using a regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, 109(D5), D05108. <https://doi.org/10.1029/2003JD004020>
- GALLÉE, H., GHÉLIN, O. F. d., & BROEKE, M. R. v. d. (1995). Simulation of atmospheric circulation during the gimex 91 experiment using a meso-gamma primitive equations model. *Journal of Climate*, 8(11), 2843-2859. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<2843:SOACDT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<2843:SOACDT>2.0.CO;2)
- GUTJAHR, O., PUTRASAHAN, D., LOHMANN, K., JUNGCLAUS, J. H., von STORCH, J.-S., BRÜGGEMANN, N., HAAK, H., & STÖSSEL, A. (2019). Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3241-3281. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>

- HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., ABDALLA, S., ABELLAN, X., BALSAMO, G., BECHTOLD, P., BIAVATI, G., BIDLOT, J., BONAVITA, M., & THÉPAUT, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Inondations de juillet 2021 : Bilan et perspectives [Consulté le 16 juillet 2023, à l'adresse <http://dirupo.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/gw-dirupo/home/presse--actualites/communiqués-de-presse1/presses/inondations-de-juillet-2021--bilan-et-perspectives.html>]. (2022).
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. MASSON-DELMOTTE, P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M. I. GOMIS et al., Éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IRM. (2021a). 2021 : Une année humide et des précipitations extrêmes [Consulté le 16 juillet 2023, à l'adresse <https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/2021-une-annee-humide-et-des-precipitations-extremes>].
- IRM. (2021b). Ce que l'on sait sur les pluies exceptionnelles des 14 et 15 juillet 2021 [Consulté le 16 juillet 2023, à l'adresse <https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/ce-que-lon-sait-sur-les-pluies-exceptionnelles-des-14-et-15-juillet-2021>].
- JOURNÉE, M., GOUDENHOOFDT, E., VANNITSEM, S., & DELOBBE, L. (2023). Quantitative rainfall analysis of the 2021 mid-July flood event in Belgium. *EGUsphere*, 1-24. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-542>
- KAUTZ, L.-A., MARTIUS, O., PFAHL, S., PINTO, J. G., RAMOS, A. M., SOUSA, P. M., & WOOLLINGS, T. (2022). Atmospheric blocking and weather extremes over the Euro-Atlantic sector – a review. *Weather and Climate Dynamics*, 3(1), 305-336. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-305-2022>
- KESSLER, E. (1969). On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations. In *Meteorological Monographs* (p. 1-84). American Meteorological Society. https://doi.org/10.1007/978-1-935704-36-2_1
- KITTEL, C. (2021). *Present and future sensitivity of the Antarctic surface mass balance to oceanic and atmospheric forcings : Insights with the regional climate model MAR* (thèse de doct.). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/258491>
- KOKS, E. E., van GINKEL, K. C. H., van MARLE, M. J. E., & LEMNITZER, A. (2022). Brief communication : Critical infrastructure impacts of the 2021 mid-July western European flood event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(12), 3831-3838. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3831-2022>
- 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, R. M., FOWLER, H. J., GOERGEN, K., HEINRICH, D., ... WANDERS, N. (2021). Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. *World Weather Attribution*. <http://hdl.handle.net/1854/LU-8732135>
- LENDERINK, G., DE VRIES, H., FOWLER, H. J., BARBERO, R., VAN ULFT, L., & VAN MEIJGAARD, E. (2021). Scaling and responses of extreme hourly precipitation in three climate experiments with

- a convection-permitting model. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2195), 20190544. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0544>
- LIN, Y.-L., FARLEY, R. D., & ORVILLE, H. D. (1983). Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 22, 1065-1092. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2)
- MOHR, S., EHRET, U., KUNZ, M., LUDWIG, P., CALDAS-ALVAREZ, A., DANIELL, J. E., EHMELE, F., FELDMANN, H., FRANCA, M. J., GATTKE, C., HUNDHAUSEN, M., KNIPPERTZ, P., KÜPFER, K., MÜHR, B., PINTO, J. G., QUINTING, J., SCHÄFER, A. M., SCHEIBEL, M., SEIDEL, F., & WISOTZKY, C. (2023). A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe – Part 1 : Event description and analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(2), 525-551. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-525-2023>
- NOTEBAERT, B., VERSTRAETEN, G., WARD, P., RENNSSEN, H., & VAN ROMPAEY, A. (2011). Modeling the sensitivity of sediment and water runoff dynamics to Holocene climate and land use changes at the catchment scale. *Geomorphology*, 126(1), 18-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.08.016>
- RIDDER, K. D., & GALLÉE, H. (1998). Land surface-induced regional climate change in southern Israel. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 37(11), 1470-1485. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<1470:LSIRCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<1470:LSIRCC>2.0.CO;2)
- SELAND, Ø., BENTSEN, M., SELAND GRAFF, L., OLIVIE, D., TONIAZZO, T., GJERMUNDSEN, A., DEBERNARD, J. B., GUPTA, A. K., HE, Y., KIRKEVÅG, A., SCHWINGER, J., TJIPUTRA, J., SCHANCKE AAS, K., BETHKE, I., FAN, Y., GRIESFELLER, J., GRINI, A., GUO, C., ILICAK, M., & SCHULZ, M. (2020). The Norwegian Earth System Model, NorESM2 – Evaluation of the CMIP6 DECK and historical simulations [Preprint]. *Climate and Earth System Modeling*. <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-378>
- TABARI, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10(1), 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- TATEBE, H., OGURA, T., NITTA, T., KOMURO, Y., OGOCHI, K., TAKEMURA, T., SUDO, K., SEKIGUCHI, M., ABE, M., SAITO, F., CHIKIRA, M., WATANABE, S., MORI, M., HIROTA, N., KAWATANI, Y., MOCHIZUKI, T., YOSHIMURA, K., TAKATA, K., O'ISHI, R., & KIMOTO, M. (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12(7), 2727-2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>
- WYARD, C., SCHOLZEN, C., FETTWEIS, X., VAN CAMPENHOUT, J., & FRANÇOIS, L. (2017). Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959–2010 using the regional climate model MAR. *International Journal of Climatology*, 37, 2782-2796. <https://doi.org/10.1002/joc.4879>