



**Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la
résilience wallonne à travers l'adaptation aux
changements climatiques**
Scénarios, impacts et mesures
Rapport du volet 2 – Projections climatiques



ICEDD



**LIÈGE université
Climatologie**



**LIÈGE université
Gembloux
Agro-Bio Tech**



LEMA



lepur

Pouvoir adjudicateur :



**Wallonie
environnement
Awac**



ISSeP
Institut scientifique
de service public



JETPACK.AI



**UNIVERSITÉ
DE NAMUR**



**Wallonie
Relance**

Auteurs

Xavier Fettweis - xavier.fettweis@uliege.be

Théo Denis – theo.denis@uliege.be

Laurine Fiol – laurine.fiol@uliege.be



Comité de relecture

Manu Harchies - mha@icedd.be

Personnes de contact

Manu Harchies, Responsable d'équipe - mha@icedd.be



Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable

Boulevard Frère Orban 4

B-5000 NAMUR

+32 81 25 04 80

www.icedd.be

Photo de couverture : Jonas Jaeken from Unsplash

Namur, le 28 février 2024

Comment citer ce rapport

Fettweis, X. Denis, T. Fiol, L. Harchies, M. (2024). *Actualisation des projections climatiques sur la Wallonie à l'aide du modèle régional MAR forcé par les données les plus récentes (CMIP6) de 6 modèles climatiques globaux selon les scénarios SSP370 et SSP585*. Service Public de Wallonie (SPW) - Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AWAC).



ICEDD est certifié ISO 9001 :2015

Table des matières

1.	Introduction	7
2.	Méthodologie	9
2.1.	Modèle MAR.....	9
2.2.	Les réanalyses et les ESM	9
2.3.	Masque de la région Wallonne.....	10
2.4.	Validation du MAR	12
2.5.	Calcul des différents indicateurs	12
2.5.1.	Indicateurs relatifs à la température	13
2.5.2.	Indicateurs relatifs aux précipitations.....	14
2.5.3.	Autres indicateurs	15
2.6.	Etude des biais sur le climat présent	16
2.7.	Etude des projections futures	17
3.	Résultats	19
3.1.	Validation du MAR	19
3.2.	Biais sur la période de référence	21
3.2.1.	Indicateurs relatifs à la température	21
3.2.2.	Indicateurs relatifs aux précipitations.....	22
3.2.3.	Indicateurs relatifs au vent.....	23
3.2.4.	Autres indicateurs	23
3.3.	Projections climatiques	25
3.3.1.	Identification des périodes d'étude.....	25
3.3.2.	Indicateurs relatifs à la température	25
3.3.3.	Indicateurs relatifs aux précipitations.....	31
3.3.4.	Autres indicateurs	42
4.	Conclusion	50
5.	Référence	52
5.1.	Références générales	52
5.2.	Références ESM	52

Table des Figures

Figure 1 - augmentation de la température de l'air par rapport à la période de référence 1850-1900 au niveau global. Graphique construit par le VITO sur base de données historiques (lignes grises) provenant du « C3S Global Temperature Trend Monitor » et de données de projections climatiques (lignes colorées) provenant de et al. (2021).	7
Figure 2 - Élévation de surface (en m) du domaine MAR considéré sur la Belgique.....	11
Figure 3 - Masque de sélection de la Wallonie.....	11
Figure 4 - Corrélation, biais standardisé et RMSE centré de MAR-ERA calculé sur la période 2010-2020 à partir des observations de l'IRM pour la température minimale en été.	20
Figure 5 - Corrélation, biais standardisé et RMSE centré de MAR-ERA calculé sur la période 2010-2020 à partir des observations de l'IRM pour les précipitations en été.	20
Figure 5 - Changement de la température moyenne annuelle en fonction des degrés de réchauffement mondiaux.....	26
Figure 6 - Changement de la température maximale estivale en fonction des degrés de réchauffement mondiaux.	27
Figure 7 - Changement du nombre de jours d'été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.....	28
Figure 8 - Changement du nombre de jours de gel en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.....	29
Figure 9 - Changement du nombre de jours en vigilance canicule en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	30
Figure 10 - Changement du nombre de vagues de chaleur de 5 jours en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.....	31
Figure 12 - Changements des précipitations en été prévus par les ESMs utilisés dans le dernier rapport du GIEC.	32
Figure 12 - Changement de la somme des précipitations en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	33
Figure 13 - Changement de la somme des précipitations en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	33
Figure 14 - Changement du nombre de jours de précipitations en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	37
Figure 15 - Changement du nombre de jours de fortes précipitations en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	37
Figure 16 - Changement du nombre maximum de jours secs consécutifs en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	40
Figure 17 - Changement du cumul maximum sur 5 jours en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	40
Figure 18 - Changement de la vitesse du vent en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.....	43
Figure 20 - Changements de la vitesse du vent en surface annuelle prévus par les ESMs utilisés dans le dernier rapport du GIEC.	43
Figure 20 - Changement de l'humidité spécifique en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	45
Figure 21 - Changement de l'humidité spécifique en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	45
Figure 22 - Changement de l'éclairement solaire à la surface en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.....	47
Figure 23 - Changement de l'éclairement solaire à la surface en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	47
Figure 24 - Changement de l'évapotranspiration de référence en juillet en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.....	48
Figure 25 - Changement de l'évapotranspiration de référence en août en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.....	49

Table des Tableaux

Tableau 1 - Modèles climatiques globaux utilisés dans cette analyse, accompagnés de leur abréviation, des scénarios utilisés pour chacun d'entre eux et de leur sensibilité climatique.....	10
Tableau 2 - Liste des indicateurs relatifs à la température.....	13
Tableau 3 - Liste des indicateurs relatifs aux précipitations.....	14
Tableau 4 - Liste des indicateurs non relatifs aux précipitations et à la température.....	16
Tableau 5 - Moyenne sur la Wallonie et sur la période 2010-2020 de la corrélation, du biais standardisé et du RMSE centré de MAR-ERA calculé à partir des données d'observations de l'IRM pour la température journalière moyenne, maximale, minimale et les précipitations journalières à l'échelle temporelle annuelle et saisonnière.....	19
Tableau 6 - Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs aux températures. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.....	21
Tableau 7 - Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs aux précipitations. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.....	22
Tableau 8 - Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs au vent. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.....	23
Tableau 9 - Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour l'évapotranspiration de référence, l'humidité spécifique et l'éclairement solaire à la surface. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.....	24
Tableau 10 - Périodes d'étude pour les projections futures.....	25
Tableau 11 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs de base de la température (changement +/- écart-type). En rouge : plus chaud que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.....	25
Tableau 12 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs au nombre de jours d'été et de gel, le nombre de degrés-jours et la période de croissance végétative (changement +/- écart-type). En rouge : plus chaud que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.....	27
Tableau 13 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs aux vagues de chaleur et au nombre de jours en vigilance canicule (changement +/- écart-type). En rouge : plus chaud que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.....	29
Tableau 14 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour l'indicateur relatif à la somme des précipitations (changement +/- écart-type). En rouge/bleu : plus sec/humide que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.....	31
Tableau 15 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour la somme des précipitations dans un monde à +3°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent pour l'indicateur et la période considérée.....	34
Tableau 16 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour la somme des précipitations dans un monde à +4°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent pour l'indicateur et la période considérée.....	34
Tableau 17 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs au nombre de jours (fortes/très fortes) précipitations (changement +/- écart-type). En rouge/bleu : plus sec/humide que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.....	35
Tableau 18 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour le nombre de jours de (fortes / très fortes) précipitations dans un monde à +3°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent pour l'indicateur et la période considérée.....	38
Tableau 19 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour le nombre de jours de (fortes / très fortes) précipitations dans un monde à +4°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent pour l'indicateur et la période considérée.....	38
Tableau 20 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs au nombre maximum de jours secs consécutifs, au cumul maximum sur 5 jours et au cumul maximum journalier (changement +/- écart-type). En rouge/bleu : plus sec/humide que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.....	39
Tableau 21 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour les indicateurs relatifs au nombre maximum de jours secs consécutifs, au cumul maximum sur 5 jours et au cumul maximum journalier dans un monde à +3°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent.....	41
Tableau 22 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour les indicateurs relatifs au nombre maximum de jours secs consécutifs, au cumul maximum sur 5 jours et au cumul maximum journalier dans un monde à +4°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent.....	41

Tableau 23 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs au vent (changement +/- écart-type). En rouge/bleu : augmentation/diminution par rapport à la période de référence. Case grisée : changement non significatif.....	42
Tableau 24 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs à l'humidité spécifique (changement +/- écart-type). En bleu : plus humide par rapport à la période de référence. Case grisée : changement non significatif.	44
Tableau 25 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour l'éclairement solaire à la surface (changement +/- écart-type). En bleu : plus humide par rapport à la période de référence. Case grisée : changement non significatif.....	46
Tableau 26 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour l'évapotranspiration de référence (changement +/- écart-type). En bleu/rouge : augmentation/diminution par rapport à la période de référence. Case grisée : changement non significatif.	48

1. Introduction

Dans le cadre de l'étude de vulnérabilité et d'adaptation aux changements climatiques commandité par le gouvernement Wallon via l'Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AWAC), le Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège est responsable de l'actualisation des projections climatiques sur la Wallonie en utilisant les récentes sorties du modèle régional du climat MAR développé par ce même laboratoire. L'objectif de ces projections étant d'apporter des éléments de réponse à la question "Quel sera le climat potentiel de la Wallonie dans un monde (à l'échelle globale) à +2°C, +3°C ou +4°C par rapport à 1850-1900?".

Ce rapport présente l'ensemble des résultats définitifs obtenus par Théo Denis et Xavier Fettweis d'octobre 2023 à février 2024. Conformément aux précisions de la note méthodologique, ces résultats sont basés sur les sorties du modèle MAR (version 3.14) forcé par 6 modèles globaux de la base de données CMIP6 (MIROC6, NOR-ESM2-MM, MPI-ESM1-2-HR, EC-EARTH3-VEG, CMCC-CM2-SR5 et IPSL-CM6A-LR) utilisant deux scénarios SSP (SSP370 et SSP585) pour réaliser des projections climatiques. L'ensemble des indicateurs analysés ainsi qu'une brève description de ces derniers sont par ailleurs présentés dans la section 2.5.

L'utilisation du modèle régional MAR est justifiée par le fait qu'il s'agit des seules projections régionales disponibles à l'heure actuelle sur les données globales les plus récentes (CMIP6). Les 3 autres modèles régionaux utilisés en Belgique (dans le cadre du projet Cordex 2.0) ne fourniront des résultats que dans le courant de l'année 2025. Si ceux-ci nous parviennent avant la fin du projet nous discuterons de manière qualitative les divergences apparentes de ces modèles régionaux.

Le choix des 6 modèles globaux est basé sur les recommandations^[6] de CORDEX-Europe (ç-à-d la liste des ESM à utiliser pour faire des projections futures sur l'Europe à l'aide de modèles régionaux comme le MAR) .

Le choix des scénarios SSP3 et SSP5 est basé sur les éléments suivants :

Le GIEC (IPCC¹) estime les augmentations de température au cours du XXIème siècle tel que présenté sur la Figure 1, pour 4 scénarios appelés *Shared Socio-economic Pathway* (SSP), soit « scénarios socio-économiques partagés ». Voir Riahi et al. (2017) and IPCC (2021) pour une description.

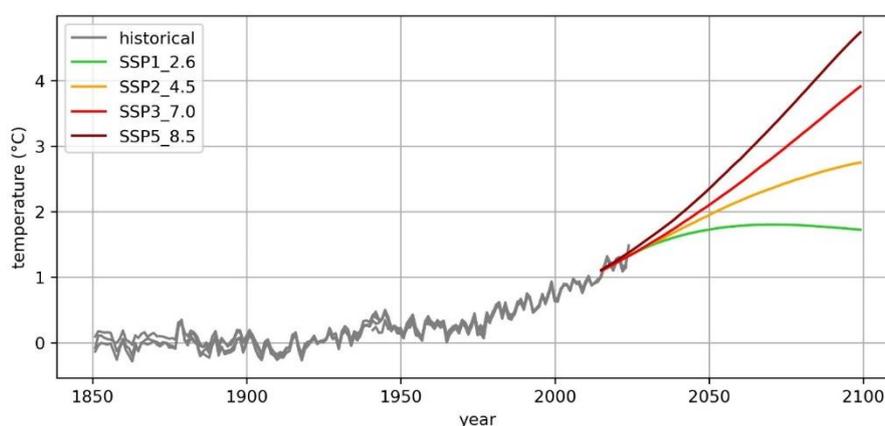


Figure 1 - augmentation de la température de l'air par rapport à la période de référence 1850-1900 au niveau global. Graphique construit par le VITO sur base de données historiques (lignes grises) provenant du « C3S Global Temperature Trend Monitor » et de données de projections climatiques (lignes colorées) provenant de et al. (2021).

¹ <https://www.ipcc.ch/>

Selon le 6ème rapport du GIEC² la mise en oeuvre actuelle des politiques climatiques nous mène sur une trajectoire d'un réchauffement global à la fin du siècle par rapport à la période 1850-1900 autour de +3,2°C : *“Policies implemented by the end of 2020 are projected to result in higher global GHG emissions in 2030 than emissions implied by NDCs, indicating an ‘implementation gap’ (high confidence). Without a strengthening of policies, global warming of 3.2 [2.2 to 3.5] °C is projected by 2100 (medium confidence).”*. Soit une valeur se situant entre les scénarios SSP2_4.5 (~+2,7°C) et SSP3_7.0 (~+3,6°C).

Si dans les prochaines années la communauté internationale prenait les mesures nécessaires pour renforcer la mise en oeuvre des politiques climatiques afin d'atteindre tous les engagements nationaux inconditionnels, nous pourrions alors rejoindre le scénario SSP2. A l'inverse, des aléas de politique nationales menant à des désengagements du point de vue climatique nous mèneraient vers le scénario SSP3.

Il est à noter que tant le scénario SSP2 que le scénario SSP3 nous font atteindre des degrés de réchauffement globaux de +2°C au cours du XXIème siècle. Ce réchauffement survient quelques années plus tard dans le cadre du SSP2.

Le réchauffement de +3°C n'est par contre atteint que dans 3 modèles sur 6 dans le scénario SSP2.

Pour cette étude il a donc été choisi de se caler sur le scénario SSP3 afin d'éviter le risque d'une mise en oeuvre de mesures d'adaptation trop tardive face à un réchauffement de +2°C et afin de pouvoir pleinement considérer les mesures d'adaptation d'un monde à +3°C qui est une hypothèse plausible.

Le scénario SSP5_8.5 a été ajouté, car il s'agit du seul scénario dans lequel un réchauffement de +4°C au niveau global est atteint avant la fin du XXIème siècle. Or il s'agissait du scénario « du pire » qu'il était imposé d'explorer dans cette étude.

Précisions importantes sur les degrés de réchauffement :

- Quand on parle de +2°, +3° et +4° de réchauffement global, il s'agit de l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air sur l'ensemble de la planète par rapport à la période de référence 1850-1900.
- Les résultats des projections réalisées dans cette étude fourniront notamment l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air sur la Wallonie, par rapport à la période de référence 1980-2010.
- Afin de donner des éléments de comparaison :
 - o La température annuelle moyenne de l'air sur l'ensemble de la planète a augmenté de +0,7°C entre la période 1850-1900 et la période 1980-2010.
 - o La température annuelle moyenne de l'air en Wallonie a augmenté de +1,3°C entre les mêmes périodes.

Ce rapport est constitué de quatre principales parties :

1. La première décrit brièvement la méthodologie employée dans ce travail.
2. La suivante présente les résultats de la validation du MAR forcé par les réanalyses ERA5 par rapport aux données climatologiques fournies par l'IRM (*Institut Royal Météorologique*).
3. La troisième partie présente les biais du MAR forcé par les 6 différents ESM (*Earth System Model*) cités ci-dessus en comparaison avec MAR forcé par ERA5. Cette analyse a été réalisée sur notre période de référence : 1981-2010 sachant que la base de données CMIP6 ne dispose pas des sorties de modèle globaux avant 1950 pour forcer MAR.
4. Enfin, la dernière partie, la plus conséquente, présente les résultats des différentes projections climatiques.

² https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

2. Méthodologie

2.1. Modèle MAR

Le modèle utilisé dans ce document est le modèle régional du climat MAR (pour *Modèle Atmosphérique Régional*) développé par le Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie de l'Université de Liège. Le modèle MAR est un modèle tridimensionnel qui permet de reconstituer à l'aide d'équations physiques l'état de l'atmosphère à hautes résolutions spatiales (5–10 km) et temporelles (1 heure) sur une petite portion de territoire en le forçant³ à ses frontières latérales par des champs météorologiques (température, vent, humidité et pression de surface) provenant de modèles climatiques globaux (couvrant la terre entière) qui tournent à des résolutions spatiales de typiquement 100 km.

La configuration de MAR utilisée dans le cadre de cette étude résout le climat au-dessus de la Belgique à la résolution spatiale de 5 km pour une résolution temporelle de 30 s (c'est-à-dire le pas de temps interne de la physique du modèle) comme dans Wyard et al. (2017)^[1] ou Doutreloup et al. (2019)^[2].

2.2. Les réanalyses et les ESM

Comme expliqué dans la section précédente, MAR doit être forcé à ses frontières latérales par des modèles climatiques globaux appelés Earth System Model (ESM) en anglais. Deux principaux cas de figure existent. Le premier consiste à forcer le MAR par des réanalyses pour reconstruire le climat observé. Les réanalyses sont des modèles globaux dans lesquels sont assimilées toutes les 6 heures des données météorologiques provenant d'observations (station météo, satellite, ballon sonde, bouée, ...). Ces assimilations permettent aux réanalyses de produire des sorties temporellement et spatialement continues fidèles au climat observé. Dans ce cas, MAR est forcé par les réanalyses ERA5^[3], qui sont la représentation la plus fidèle de l'atmosphère observée depuis 1940. Dans le deuxième cas, MAR est forcé par des modèles globaux pour étudier l'évolution du climat moyen des prochaines décennies. L'ensemble des ESM utilisés dans ce travail provient de la base de données CMIP6 utilisée dans le dernier rapport du GIEC (2021)^[4]. Pour la période 2015-2100, ces ESM sont forcés par des évolutions de gaz à effet de serre anthropiques telles que définies par les scénarios SSP ("Shared Socioeconomic Pathways")^[5]. Les différents ESM utilisés ici sont NOR-ESM2-MM, MPI-ESM1-HR, MIROC6, EC-Earth3-Veg, CMCC-CM2-SR5 et IPSL-CM6A-LR.

Une caractéristique importante des ESM est leur sensibilité à une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Pour une même augmentation de GES dans l'atmosphère, deux modèles ne vont pas nécessairement produire un réchauffement climatique similaire. Pour déterminer cette sensibilité, on définit la sensibilité climatique d'un modèle comme étant le réchauffement moyen planétaire qui serait atteint par ce modèle si on doublait la concentration en dioxyde de carbone par rapport à la période préindustrielle. Dans son dernier rapport, le GIEC atteste que la meilleure estimation de la sensibilité climatique est de 3°C avec des valeurs probables allant de 2,5°C à 4°C. Les sensibilités climatiques des ESM utilisés ici sont reprises dans le tableau 1.

L'analyse du tableau 1 montre une certaine variabilité de la sensibilité climatique. Cela illustre l'importance de sélectionner plusieurs ESM représentant des futures différents pour caractériser l'incertitude provenant des modèles globaux.

Dans la suite de ce rapport, nous allons utiliser la notation MAR-XXX-YYY pour désigner les triplets « MAR-ESM-Scénario » où XXX correspond à l'abréviation de l'ESM et YYY les trois chiffres

³ Dans ce contexte, forcer un modèle signifie lui imposer des valeurs limites aux frontières de son domaine d'intégration provenant d'autres modèles. Ce forçage est nécessaire car il est impossible d'isoler une région du monde du reste de la circulation atmosphérique globale. MAR a donc besoin de savoir ce qu'il se passe en dehors des frontières de son domaine pour pouvoir fonctionner.

caractéristiques des scénarios SSP⁴. Notons que pour MAR forcé par ERA5, nous utiliserons la notation MAR-ERA.

Nom de l'ESM	Abréviation (Pays d'origine des modèles)	Scénarios utilisés	Sensibilité climatique	Références
NOR-ESM2-MM	NOR (Norvège)	SSP3-7.0 SSP5-8.5	2,5 °C	(Seland et al., 2020)
MIROC6	MIR (Japon)		2,61 °C	(Tatebe et al., 2019)
MPI-ESM1-2-HR	MPI (Allemagne)		3 °C	(Gutjahr et al., 2019)
EC-EARTH3-VEG	EC3 (Suède)		4,31 °C	(Döscher et al., 2021)
CMCC-CM2-SR5	CMCC (Italie)		3,52 °C	(Cherchi et al., 2019)
IPSL-CM6A-LR	IPSL (France)		4,56 °C	(Boucher et al., 2020)

Tableau 1 - Modèles climatiques globaux utilisés dans cette analyse, accompagnés de leur abréviation, des scénarios utilisés pour chacun d'entre eux et de leur sensibilité climatique.

2.3. Masque de la région Wallonne

Comme montré sur la figure 1, la grille du MAR utilisée pour réaliser les projections climatiques couvre une superficie bien plus étendue que la Wallonie. En conséquence, un masque a été créé pour isoler la Wallonie du reste du domaine du MAR. Dès lors, il est possible de calculer des indicateurs statistiques comme la moyenne ou l'écart type de variables climatologiques sur la Wallonie. Quelques approximations, notamment au niveau de la frontière linguistique, ont été utilisées pour définir ce masque à 5 km de résolution même si, comme illustré sur la figure 2, ce masque représente assez fidèlement la Région Wallonne. Néanmoins, le domaine d'intégration du MAR ne couvre pas le bassin complet de la Meuse et de la Sambre. Par conséquent, si on travaille sur l'hydrologie de ces cours d'eau, des modifications effectuées par nos voisins français en amont de la Meuse peuvent avoir des impacts que nous ne percevrons pas.

⁴ A titre d'exemple, MAR-MIR-370 signifie « MAR forcé par l'ESM MIROC6, lui-même forcé par l'évolution de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre définie par le scénario SSP3-7.0 ».

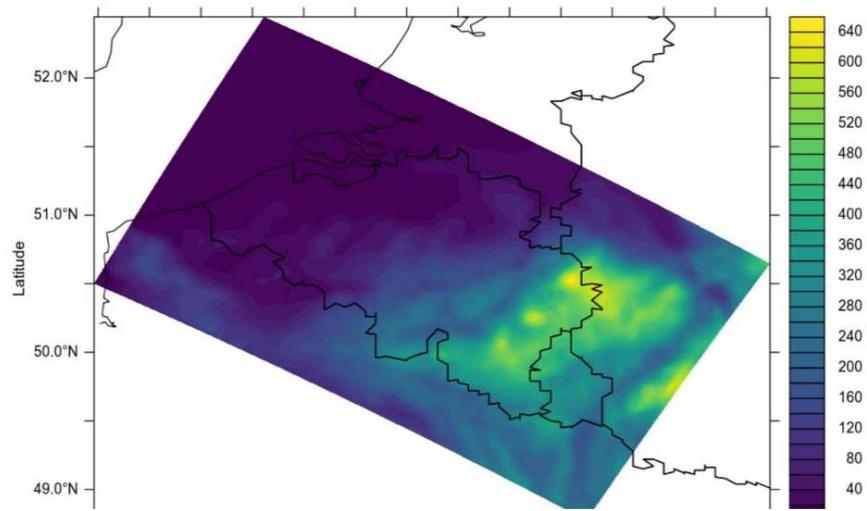


Figure 2 - Élévation de surface (en m) du domaine MAR considéré sur la Belgique.

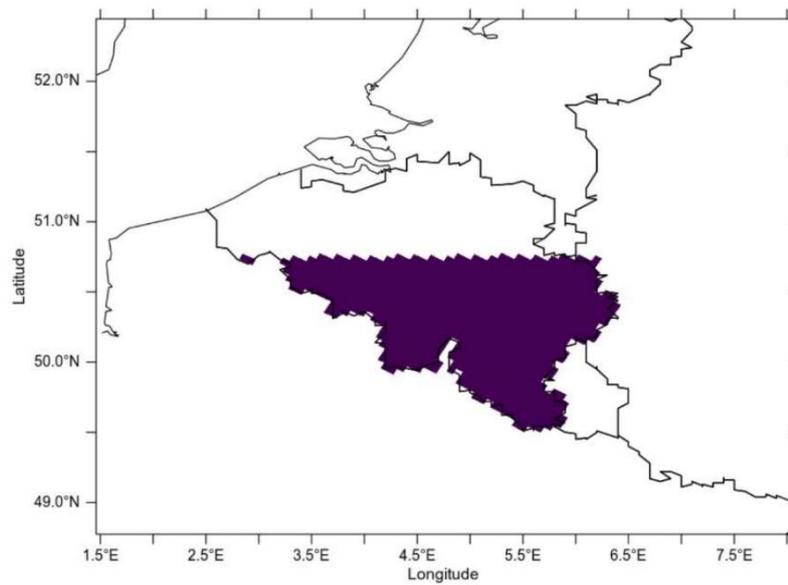


Figure 3 - Masque de sélection de la Wallonie

2.4. Validation du MAR

Dans l’optique de démontrer la robustesse du MAR à représenter le climat observé de la Région Wallonne et dès lors justifier la pertinence de son utilisation pour une telle étude, une validation de MAR-ERA a été réalisée à partir d’observations des conditions météorologiques. Ces données, fournies par l’IRM (Institut Royal Météorologique) proviennent de stations météorologiques dispersées sur le territoire belge. Après interpolation, celles-ci sont disponibles sous forme de grille, comme les sorties du MAR facilitant ainsi la comparaison entre les observations et le MAR.

Nous avons évalué l’aptitude du MAR à modéliser correctement à l’échelle journalière les variables suivantes : température moyenne/minimale/maximale ainsi que la somme des précipitations, à l’échelle temporelle annuelle et saisonnière. Ces variables constituent la base de la majorité des indicateurs calculés que nous détaillerons ultérieurement (cf. section 2.5). Pour chacune de ces variables, nous avons calculé 3 indicateurs statistiques : la corrélation, le biais standardisé et le RMSE (*root-mean-square error, racine de l’écart quadratique moyen en français*) centré⁵. Cette validation a été faite sur l’ensemble de la période 2010-2020.

Du fait de son importance dans ce rapport, nous rappelons ici la formule du biais standardisé :

$$\text{Biais standardisé} = \frac{(\text{Moyenne}_{\text{MAR}} - \text{Moyenne}_{\text{IRM}})}{\text{Ecart - Type}_{\text{IRM}}}$$

Le biais standardisé est donc égal au biais divisé par l’écart-type des observations i.e. la variabilité journalière des observations. Il est également possible de définir le biais absolu standardisé. La formule est presque la même, à la différence que nous prenons la valeur absolue de la différence entre la moyenne du MAR et celle des observations. En modélisation du climat, un biais standardisé (absolu) est considéré comme significatif s’il est supérieur à 1.

2.5. Calcul des différents indicateurs

Dans le cadre du projet AWAC, une actualisation des indicateurs analysés dans le projet ECORES de 2011 a été demandée. Les indicateurs peuvent se diviser en trois principales catégories : les indicateurs relatifs à la température, ceux aux précipitations et enfin ceux qui ne rentrent pas dans les deux précédentes catégories (évolution du vent, évapotranspiration ...). La temporalité choisie (annuelle, saisonnière ou mensuelle) pour calculer les indicateurs dépend de leur définition.

Notons que pour les indicateurs calculés à l’échelle saisonnière, les saisons pour une année N sont définies de la manière suivante :

Hiver : 01 décembre (N-1) au 28 février N

Printemps : 01 mars N au 31 mai N

Eté : 01 juin N au 31 août N

Automne : 01 septembre N au 30 novembre N

sachant que 2 des 6 ESMs choisis ne présentent pas d’années bissextiles.

⁵ Le RMSE centré (RMSEC) se calcule de cette façon : $RMSE_{\text{centré}} = \sqrt{RMSE^2 - \text{biais}^2}$.

2.5.1. Indicateurs relatifs à la température

Les indicateurs relatifs à la température sont présentés dans le tableau 2. Ceux-ci ont été calculés à partir de la variable du MAR donnant la température à 2 mètres. Pour la plupart d’entre eux, leur calcul ne présente aucune subtilité. Seuls les indicateurs relatifs aux vagues de chaleur doivent être un peu précisés. Nous avons choisi la définition d’une vague de chaleur utilisée par l’IRM que nous avons généralisée. Pour considérer qu’une vague de chaleur ait une durée de 5+X jours, il faut au moins 5+X jours consécutifs avec une température maximale supérieure ou égale à 25°C et au moins 3 jours avec une température maximale supérieure ou égale à 30°C, avec X un nombre de jours valant au minimum 0. Pour déterminer le nombre de vagues de chaleur d’une durée de 5 jours, nous avons utilisé une fenêtre glissante se décalant de jour en jour vérifiant si la condition est bien respectée pour la période comprenant le jour en question et les 4 suivants. Dès lors, 6 jours consécutifs avec une température maximale supérieure à 25°C dont les trois au centre de cette période ont une température maximale supérieure à 30°C comptent pour 2 vagues de chaleur de 5 jours. La même méthode est employée pour les vagues de chaleur de 7, 10 et 15 jours.

Indicateur	Abréviation	Unité	Echelle de calcul	Descriptif
Température moyenne	Tmoy	°C	Annuelle Saisonnaire	Température moyenne journalière
Température minimale	Tmin	°C	Saisonnaire	Température minimale journalière moyenne
Température maximale	Tmax	°C	Saisonnaire	Température maximale journalière moyenne
Nombre de jours d’été	J-ete	Jours	Annuelle	Nombre de jours avec une température maximale strictement supérieure à 25°C
Nombre de jours de gel	J-gel	Jours	Annuelle Mensuelle pour mars et avril	Nombre de jours avec une température minimale inférieure (ou égale) à 0°C
Période de croissance végétative	PCV	Jours	Annuelle	Nombre de jours séparant les 6 premiers jours consécutifs avec une température moyenne strictement supérieure à 5°C des 6 premiers jours consécutifs avec une température moyenne strictement inférieure à 5°C après le premier juillet
Degré-jour	Deg-jour	°C.j	Annuelle	Somme sur tous les jours avec une température moyenne inférieure à 17°C de la différence 17 – Tmoy
Nombre de jours de vigilance canicule	J-Canicule	Jours	Annuelle	Nombre de jours avec une moyenne glissante sur 3 jours des températures maximales supérieure ou égale à 34°C et une moyenne glissante sur 3 jours des températures minimales supérieure ou égale à 19°C
Nombre de vagues de chaleur de 5/7/10/15 jours	Vague chaleur 5/7...	#	Annuelle	Période d’au-moins 5/7/10/15 jours consécutifs avec une température maximale supérieure ou égale à 25°C et comprenant au moins 3 jours avec une température maximale supérieure ou égale à 30°C

Tableau 2 - Liste des indicateurs relatifs à la température.

2.5.2. Indicateurs relatifs aux précipitations

Le modèle MAR sépare les précipitations liquides et solides en deux variables distinctes. Pour le calcul des différents indicateurs, nous avons systématiquement fait la somme de celles-ci. Dès lors, aucune distinction ne sera faite dans ce rapport entre les précipitations liquides (pluie...) et les précipitations solides (neige, grêle ...).

En outre, une précision s'impose sur la définition d'un jour sec. MAR a tendance à générer de faibles quantités de précipitations (associées à du bruit numérique dans MAR) pour des jours qui devraient normalement être secs. Bien que cette quantité soit infime, cela peut biaiser certains indicateurs comme le nombre de jours de précipitations ou le maximum de jours secs consécutifs. Pour pallier ce souci, nous avons déterminé un seuil pour le cumul des précipitations journalières sous lequel nous considérons un jour comme sec. En tentant de maximiser la corrélation entre les données de l'IRM présentées dans la section 2.4 et les sorties du MAR du nombre maximum de jours secs annuels/saisonniers moyennés sur la Wallonie, nous avons déterminé que 1,5 mm/jour était un seuil raisonnable. Les journées avec un cumul de précipitations inférieur à ce seuil seront donc considérées comme sèches.

Les indicateurs relatifs aux précipitations sont présentés dans le tableau 3. Aucun d'entre eux ne présente de subtilité dans leur définition.

Indicateur	Abbréviation	Unité	Echelle de calcul	Descriptif
Somme des précipitations	Somme precip	mm	Annuelle Saisonnaire	Somme des précipitations sur l'année/saison considérée
Maximum de jours secs consécutifs	Max j secs	Jours	Saisonnaire	Nombre maximal de jours où les précipitations journalières sont strictement inférieures à 1.5 mm
Cumul maximum de précipitations sur 5 jours	Max cumul 5j	mm	Saisonnaire	Maximum des cumuls des précipitations sur 5 jours
Nombre de jours de précipitations	Jours precip	Jours	Saisonnaire	Nombre de jours avec des précipitations journalières supérieures ou égales à 1.5 mm
Nombre de jours de fortes précipitations	Jours fortes precip	Jours	Saisonnaire	Nombre de jours avec des précipitations journalières supérieures ou égales à 10 mm
Nombre de jours de très fortes précipitations	Jours très fortes precip	Jours	Saisonnaire	Nombre de jours avec des précipitations journalières supérieures ou égales à 20 mm
Cumul maximum de précipitations journalier	Cumul max	mm	Saisonnaire	Maximum des précipitations journalières

Tableau 3 - Liste des indicateurs relatifs aux précipitations.

2.5.3. Autres indicateurs

Les autres indicateurs sont présentés dans le tableau 4. Les deux premiers indicateurs concernent la vitesse du vent à 10 mètres ainsi que sa variabilité. Seule la vitesse est prise en compte ici, aucune étude sur la direction du vent ne sera réalisée dans ce rapport. L'analyse de l'écart type de la vitesse du vent nous permettra de déterminer si le vent sera plus ou moins⁶ constant dans le temps. L'évapotranspiration de référence a été calculée à partir de la formule de Penman-Monteith que nous rappelons ci-dessous :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

où

ET_0 est l'évapotranspiration potentielle (mm.j^{-1})

R_n est le flux radiatif net à la surface de la culture ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$)

G est le flux de chaleur dans le sol ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$)

T est la température moyenne journalière de l'air à 2 mètres ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 est la vitesse moyenne journalière du vent à 2 mètres (m.s^{-1})

e_s est la pression de vapeur saturante de l'eau (kPa)

e_a est la pression partielle de la vapeur d'eau (kPa)

Δ est la pente de la courbe de la pression de vapeur saturante de l'eau (kPa.C^{-1})

γ est la constante psychrométrique (kPa.C^{-1}).

Cette formule nous permet d'obtenir l'évapotranspiration journalière d'un hypothétique champ recouvert de gazon d'une hauteur de 0,12m, ayant une résistance surfacique de 70 s.m^{-1} et un albédo de 0,23. On suppose que ce gazon ne souffre pas de stress hydrique et se développe normalement. A partir de l'évapotranspiration de référence, il est possible de calculer l'évapotranspiration potentielle d'autres cultures en multipliant l'évapotranspiration de référence par un coefficient cultural.

Enfin, nous nous intéresserons à l'évolution de l'humidité au travers de l'humidité spécifique ainsi qu'à l'ensoleillement. Nous avons étudié l'évolution de l'ensoleillement au travers de l'éclairement solaire à la surface. Il s'agit de la somme du rayonnement solaire direct (sans diffusion) et indirect (avec diffusion par l'atmosphère, principalement par les nuages). Une partie de ce rayonnement sera réfléchi et celle-ci est fonction de l'albédo de la surface. Si la surface est recouverte de neige, la majorité du rayonnement solaire sera réfléchi en conséquence de l'albédo important de la neige. A l'inverse, une surface sombre absorbe la majorité du rayonnement solaire. Pour terminer, dans des conditions anticycloniques, le rayonnement solaire direct sera bien plus important que le rayonnement solaire indirect. L'inverse se produit si le ciel est totalement couvert de nuages.

⁶ En d'autres termes, une augmentation de l'écart-type de la vitesse du vent signifie qu'on alternera plus entre des périodes avec un vent important et des périodes avec un vent faible. A l'inverse, une diminution de l'écart-type signifie que le vent aura plus tendance à garder une vitesse constante proche de la moyenne de la période considérée.

Indicateur	Unité	Echelle de calcul	Descriptif
Vitesse du vent à 10m	m.s ⁻¹	Saisonnaire	Moyenne de la vitesse du vent sur la période considérée
Ecart-type de la vitesse du vent à 10m	m.s ⁻¹	Saisonnaire	Ecart-type de la vitesse du vent sur la période considérée
Evapotranspiration de référence	mm.j ⁻¹	Mensuelle	Moyenne journalière sur la période considérée de l'évapotranspiration de référence calculée selon la formule de Penman–Monteith
Somme de l'éclairement solaire à la surface	W/m ²	Saisonnaire	Somme sur la période considérée de l'éclairement solaire à la surface Fonction de la couverture nuageuse, du jour de l'année ainsi que de la concentration en vapeur d'eau et en aérosols dans l'atmosphère
Humidité spécifique à 2m	g/kg	Saisonnaire	Moyenne journalière de l'humidité spécifique sur la période considérée

Tableau 4 - Liste des indicateurs non relatifs aux précipitations et à la température.

2.6. Etude des biais sur le climat présent

L'analyse des biais sur le climat présent permet de déterminer la robustesse d'un modèle à représenter le climat présent. Bien qu'il n'y ait qu'aucune certitude qu'un modèle efficace pour représenter le climat passé ou présent le soit également pour représenter les changements climatiques dans le futur, un biais important sur le climat présent reste un bon indicateur de vigilance. En conséquence, comme nous le détaillerons dans la section 2.7, même les modèles biaisés sur le climat présent seront utilisés pour les projections climatiques sachant que rien ne prouve qu'un modèle biaisé sur la période de référence est moins efficace pour quantifier les changements des climats futurs.

Pour évaluer la capacité d'un modèle à représenter le climat présent, les sorties des MAR-ESM ont été comparées avec les "réanalyses" MAR-ERA sur la période de référence 1981-2010, à différentes échelles temporelles (mensuelles, saisonnières, annuelles) en fonction des indicateurs sachant qu'aucune donnée d'observations n'a été assimilée dans MAR contrairement aux ERA5 qui forcent MAR à ses frontières latérales. Les biais standardisés⁷ des MAR-ESM pour les différents indicateurs ont également été calculés sur la même période. Si le biais absolu standardisé est supérieur à 1, cela signifie que le biais est statistiquement significatif en climatologie. Ces calculs ont été réalisés pour chaque point de grille de la grille du MAR.

En outre, une valeur moyenne sur la Wallonie du biais absolu standardisé⁸ a également été calculée pour chaque indicateur. Si cette valeur est inférieure à 1, le modèle n'est pas significativement biaisé sur la Wallonie. Dans le cas où un modèle présente un biais moyen absolu standardisé largement supérieur à 1 pour certains indicateurs, il est nécessaire d'être vigilant en analysant les projections de ces modèles pour ces indicateurs sachant que MAR n'est déjà pas capable de reproduire le climat présent.

⁷ Même définition que dans la section 2.4, à la différence que les observations sont MAR-ERA dans ce cas.

⁸ Moyenne arithmétique des biais standardisés des points de grille.

2.7. Etude des projections futures

L'étude des résultats des projections futures des différents indicateurs a été effectuée par degré de réchauffement global donné (+2°C, +3°C, +4°C) par rapport à 1850-1900. La première étape consiste à identifier les périodes durant lesquelles ces seuils ont été atteints.

Pour déterminer ces seuils de réchauffement, les sorties brutes à l'échelle globale des ESM ayant forcé le MAR ont été utilisées⁹. Pour chaque ESM, la valeur moyenne de la température planétaire a été calculée pour chaque année. Pour y parvenir, nous avons calculé la moyenne annuelle de la température par point de grille. Nous avons ensuite fait la moyenne de ces valeurs en pondérant par l'aire des points de grille pour n'avoir qu'une seule valeur par année pour l'ensemble de la terre.

En obtenant ces moyennes annuelles de la température planétaire, nous pouvons calculer la température moyenne pour différentes périodes de 20 et 30 ans sachant que ces seuils de température seront dépassés plus tôt dans les modèles à forte sensibilité climatique. Nous avons pu ainsi déterminer la température moyenne pour la période préindustrielle 1850-1900 et déterminer les premières périodes de 20 ou 30 ans qui seraient, en moyenne, 2/3/4°C plus chaude que cette dernière à l'échelle globale. Notons que pour étudier l'évolution des différents indicateurs, notre période de référence 1981-2010 est déjà en moyenne ~0,7°C plus chaude à l'échelle mondiale que la période préindustrielle 1850-1900.

Dans ce rapport, nous n'avons pas utilisé tous les scénarios SSP disponibles. En effet, pour l'étude de projections dans un monde à +2°C ou +3°C, nous avons favorisé le scénario SSP3-7.0. Dans ce scénario, les ESM atteignent en moyenne un réchauffement global de +2°C 20 à 30 ans avant d'atteindre un réchauffement de +3-3.5°C, le plus souvent à la fin du siècle. Le scénario SSP5-8.5 a été utilisé pour l'étude du climat moyen dans un monde à +4°C. Il est évident que les autres seuils (+2°C et +3°C) sont logiquement atteints dans ce dernier scénario mais plus tôt dans le siècle que dans le scénario SSP3-7.0. Néanmoins, nous avons préféré utiliser le scénario SSP3-7.0 pour les deux premiers seuils car celui-ci semble être actuellement le plus probable concernant la trajectoire des émissions de gaz à effet de serre^[7] selon les mise en œuvre des politiques climatiques jusqu'à 2020.

Pour chaque ESM, les premières périodes de 30 ans atteignant un réchauffement planétaire de +2°C ou +3°C ont été déterminées pour le scénario SSP3-7.0. Le choix d'une période de 30 ans provient de la durée de notre période de référence 1981-2010 qui rappelons-le n'est pas la même période de référence que celle du GIEC (1850-1900) pour une question de disponibilités de sorties 6h des ESMs pour forcer notre modèle MAR. Nous pouvons donc comparer des périodes de même longueur. En revanche, même en suivant la trajectoire que prédit le scénario SSP5-8.5, plusieurs ESM sélectionnés dans ce rapport ne contiennent pas de période de 30 ans atteignant les 4°C de réchauffement planétaire. En revanche, en prenant des périodes de 20 ans, tous les ESM finissent par les atteindre. En conséquence, pour ce degré de réchauffement, nous avons utilisé des périodes de 20 ans.

Une fois les différentes périodes déterminées, la démarche suivie pour calculer l'évolution d'un indicateur par point de grille pour un certain degré de réchauffement est la suivante :

1. Calcul de la valeur moyenne annuelle/saisonnière/mensuelle et de l'écart-type correspondant d'un indicateur pour la période 1981-2010 pour tous les MAR-ESM¹⁰ ;
2. Pour chaque année comprise dans la période correspondant au degré de réchauffement, calcul

⁹ Ici, ce sont les données mêmes des ESM qui ont été utilisées, et non pas les données du MAR forcé par ces différents ESM. Nous avons des données couvrant la planète entièrement, mais à bien plus faible résolution.

¹⁰ Il s'agit bien d'une moyenne sur l'ensemble de la période, et non pas d'une moyenne pour chaque année incluse dans cette période. Par point de grille, nous avons donc une valeur si c'est un indicateur annuel, 4 valeurs si c'est un indicateur saisonnier et 12 valeurs si c'est un indicateur mensuel.

de la différence entre la valeur annuelle/saisonnière/mensuelle de l'indicateur et la moyenne calculée au premier point¹¹. Si c'est un indicateur annuel, on obtient donc 20 ou 30 valeurs représentant la variation par rapport à la période de référence. Nous calculons ensuite la moyenne de ces variations ainsi que leur écart-type (ç-à-d leur variabilité interannuelle). Nous obtenons donc l'évolution moyenne des indicateurs ainsi qu'un intervalle de confiance pour chaque MAR-ESM ;

3. Regroupement des variations obtenues pour chaque MAR-ESM obtenues au deuxième point pour calculer la moyenne et l'écart-type de la variation pour l'ensemble des 6 ESMs forçant MAR. Dans le cas d'un indicateur annuel, on calcule la moyenne et l'écart-type de 120 ou 180 valeurs (6 modèles fois 20/30 années). Pour un indicateur saisonnier, on a donc 120/180 valeurs pour chaque saison etc. Ainsi, nous obtenons une valeur globale regroupant l'ensemble des MAR-ESM disponibles. Notons que par simplicité et aussi pour des raisons que nous détaillerons par la suite, les modèles biaisés pour certains indicateurs sont tout de même inclus dans le calcul de cette moyenne globale ;
4. Que ce soit pour chaque MAR-ESM ou l'ensemble de ceux-ci, des moyennes arithmétiques de la moyenne et de l'écart-type sont calculées sur la Wallonie à partir du masque défini dans la section 2.3. Nous obtenons ainsi une valeur moyennée sur la Wallonie ;
5. Des cartes à l'échelle de la Belgique sont créées à partir de la moyenne regroupant tous les modèles expliquée au troisième point. Cela permet de voir s'il y a d'importantes variations spatiales de l'évolution d'un indicateur donné sur le territoire wallon.

Ci-dessus, nous avons expliqué comment calculer le changement moyen d'un indicateur par degré de réchauffement. Néanmoins, un changement sera considéré comme statistiquement significatif si sa valeur absolue par rapport à la moyenne 1981-2010 est supérieure à l'écart-type (variabilité interannuelle) calculé sur la période de référence 1981-2010. Par ailleurs, il est tout à fait possible que certains pixels présentent un changement significatif tandis que d'autres non. En calculant la moyenne de la variabilité interannuelle de la période de référence sur la Wallonie en regroupant les 6 MAR-ESM et en utilisant la moyenne globale de toutes les anomalies futures telle que présentée au troisième point dans la liste ci-dessus, nous pouvons en déduire si le changement climatique sera significatif ou non à l'échelle de la Belgique.

¹¹A l'inverse du premier point de la liste, nous obtenons ici une valeur pour chaque année/saison/mois inclus dans la période correspondant au degré de réchauffement.

3. Résultats

3.1. Validation du MAR

Les résultats moyennés spatialement et temporellement de la validation de MAR-ERA sont présentés dans le tableau 5. Nous constatons que le modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 est très performant pour représenter la température moyenne et maximale journalière sur la Wallonie. La corrélation est supérieure à 0,9 pour toutes les saisons, le biais standardisé est proche de 0 et le RMSE centré est légèrement supérieur à 1°C sachant que l'écart-type journalier de la température moyenne et maximale est de 6,9°C et 8°C respectivement. Le biais standardisé est néanmoins légèrement plus important en valeur absolue pour la température maximale journalière. MAR-ERA a tendance à sous-estimer légèrement la température maximale pour toutes les saisons. Cette sous-estimation n'est en revanche pas statistiquement significative.

Cependant, les résultats sont légèrement moins bons pour la température minimale journalière. Les corrélations y sont plus faibles et les biais standardisés sont plus élevés, en particulier en été. Cela signifie que MAR-ERA surestime la température minimale. La figure 3 montre que certains points de grille ont un biais standardisé supérieur à 1. Les RMSE centrés sont également plus importants en comparaison avec ceux de la température moyenne et maximale journalière.

Enfin, bien que les corrélations soient plus faibles pour les précipitations, les biais standardisés sont très faibles et les RMSE centrés ne dépassent pas les 5 mm sachant que l'écart-type journalier est de 3,6 mm/jour. Une corrélation plus faible n'est pas illogique pour les précipitations. MAR-ERA ne génère pas toujours les précipitations au même moment qu'elles ont été observées par les stations de l'IRM, impliquant dès lors une diminution de la corrélation. Néanmoins, en regardant à l'échelle d'une saison, ce décalage temporel n'a aucune importance comme le montrent les biais standardisés. La figure 4 montre les différents indicateurs statistiques à l'échelle de la Belgique pour les précipitations en été. On constate que le biais standardisé est faible pour tous les points de grille. On y voit également des valeurs plus élevées pour le RMSE centré dans la région des Hautes Fagnes, là où le maximum de précipitation en Belgique est observé.

		Année	Hiver	Printemps	Été	Automne
Température journalière moyenne	Corrélation	0,98	0,95	0,97	0,92	0,96
	Biais std.	0,04	-0,04	0,04	0,22	0,04
	RMSEC (°C)	1,34	1,20	1,29	1,45	1,25
Température Journalière maximale	Corrélation	0,98	0,94	0,97	0,95	0,97
	Biais std.	-0,16	-0,30	-0,29	-0,17	-0,26
	RMSEC (°C)	1,49	1,31	1,50	1,51	1,41
Température journalière minimale	Corrélation	0,93	0,88	0,88	0,77	0,85
	Biais std.	0,31	0,19	0,49	0,78	0,48
	RMSEC (°C)	2,21	2,09	2,12	2,02	2,28
Précipitations journalières	Corrélation	0,62	0,65	0,61	0,57	0,65
	Biais std.	-0,06	-0,11	-0,01	0,07	-0,02
	RMSEC (mm/j)	3,77	3,60	3	4,43	3,66

Tableau 5 - Moyenne sur la Wallonie et sur la période 2010-2020 de la corrélation, du biais standardisé et du RMSE centré de MAR-ERA calculé à partir des données d'observations de l'IRM pour la température journalière moyenne, maximale, minimale et les précipitations journalières à l'échelle temporelle annuelle et saisonnière.

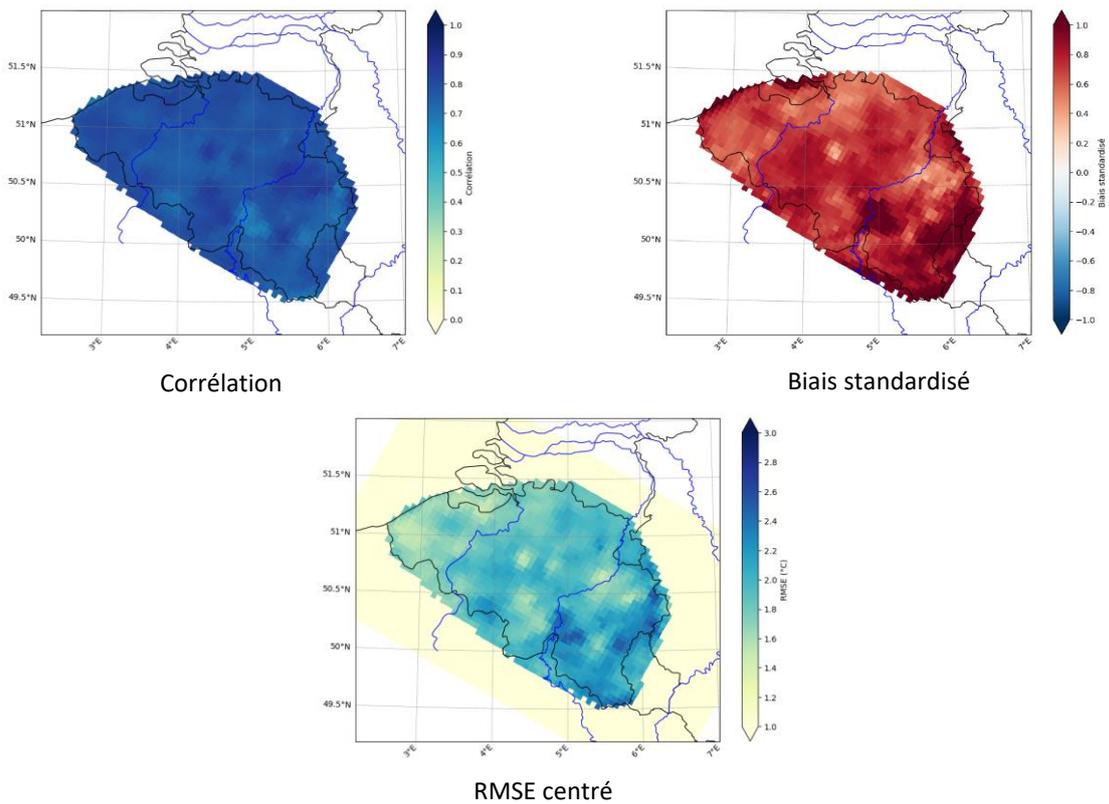


Figure 4 - Corrélation, biais standardisé et RMSE centré de MAR-ERA calculé sur la période 2010-2020 à partir des observations de l'IRM pour la température minimale en été.

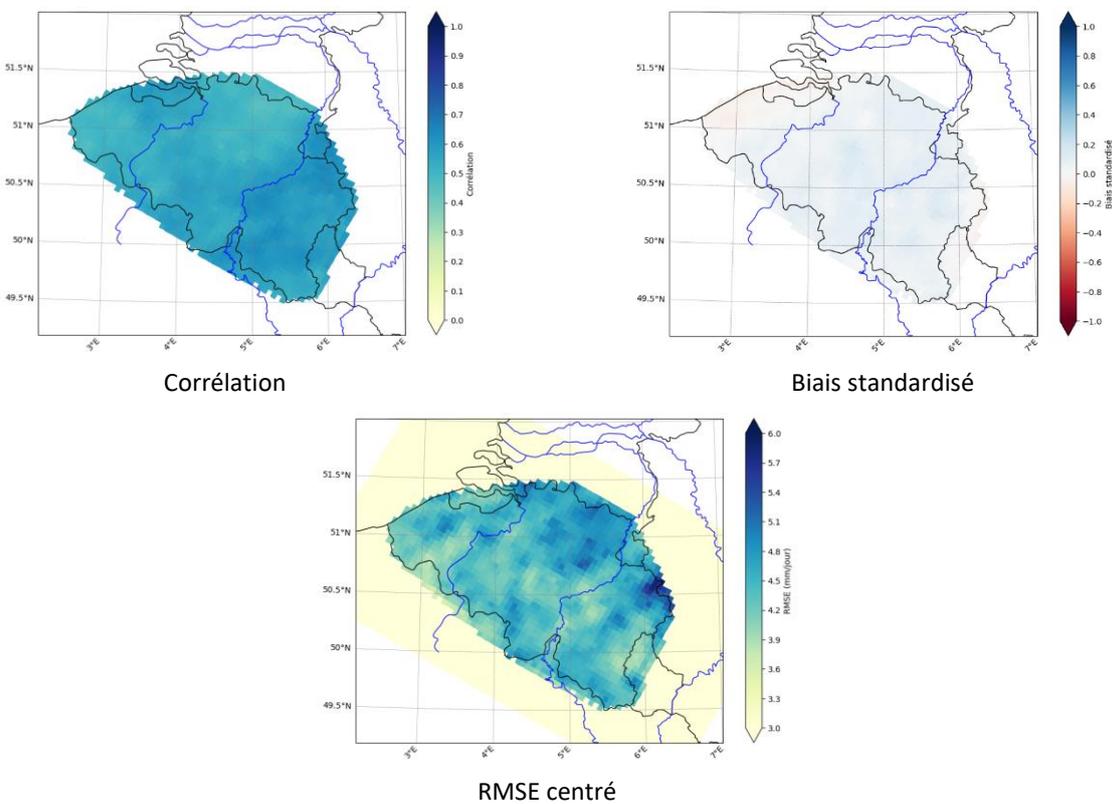


Figure 5 - Corrélation, biais standardisé et RMSE centré de MAR-ERA calculé sur la période 2010-2020 à partir des observations de l'IRM pour les précipitations en été.

3.2. Biais sur la période de référence

Dans cette section seront présentées les conclusions générales tirées de l'analyse des biais des différentes sorties des MAR-ESM par rapport à MAR-ERA sur le climat présent (1981-2010). Nous analyserons exclusivement les biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie. Rappelons qu'aucune observation n'est assimilée dans les ESMs ce qui explique que ceux-ci peuvent présenter des biais significatifs sur le climat présent. De plus, comme ils n'assimilent aucune observation, leur variabilité interannuelle ne correspond pas à celle observée et seule leur capacité à représenter (via MAR) le climat moyen (ici MAR-ERA) observé peut être évaluée.

3.2.1. Indicateurs relatifs à la température

Les biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie sont présentés dans le tableau 6.

		MAR-CMCC	MAR-EC3	MAR-MIR	MAR-MPI	MAR-NOR	MAR-IPSL
Tmoy	Année	0,38	0,23	0,38	0,12	0,35	0,15
	Hiver	0,33	0,20	0,12	0,05	0,52	0,06
	Printemps	0,16	0,32	0,29	0,60	0,14	0,38
	Eté	0,18	0,05	0,94	0,20	0,11	0,44
	Automne	0,13	0,54	0,06	0,06	0,13	0,13
Tmax	Hiver	0,25	0,11	0,14	0,04	0,54	0,08
	Printemps	0,22	0,37	0,16	0,73	0,17	0,30
	Eté	0,41	0,22	1,29	0,16	0,28	0,92
	Automne	0,49	0,71	0,46	0,07	0,29	0,46
Tmin	Hiver	0,37	0,26	0,08	0,06	0,40	0,05
	Printemps	0,10	0,23	0,43	0,38	0,19	0,42
	Eté	0,41	0,36	0,24	0,24	0,44	0,57
	Automne	0,24	0,35	0,32	0,17	0,60	0,21
J-été	Année	0,51	0,23	0,93	0,14	0,46	0,62
J-gel	Année	0,68	0,43	0,12	0,04	0,32	0,22
	Mars	0,14	0,08	0,35	0,47	0,06	0,07
	Avril	0,19	0,29	0,15	0,41	0,28	0,44
Deg-jour	Année	0,36	0,23	0,24	0,21	0,37	0,11
PCV	Année	0,31	0,13	0,26	0,19	0,22	0,13
J-canicule	Année	1,03	0,13	0,09	0,15	0,35	0,13
Vague chaleur5	Année	0,69	0,11	0,45	0,26	0,41	0,62
Vague chaleur7	Année	0,61	0,13	0,38	0,28	0,32	0,62
Vague chaleur10	Année	0,65	0,13	0,38	0,17	0,35	0,71
Vague chaleur15	Année	1,08	0,12	0,54	0,09	0,41	1,59

Tableau 6 - Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs aux températures. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.

L'analyse du tableau 6 montre que très peu de biais significatifs sont à constater. MAR-MIR présente des températures maximales trop chaudes en été. MAR-CMCC simule trop de jours en vigilance canicule et de vagues de chaleur de 15 jours tout comme MAR-IPSL. Néanmoins, concernant les vagues de chaleur de 10 et 15 jours, MAR-ERA ne simule aucune vague de chaleur pour un nombre non négligeable de pixels sur la période 1981-2010. La variabilité interannuelle des observations vaut donc 0 pour ces pixels, empêchant dès lors le calcul d'un biais standardisé. Seuls les pixels pour lesquels MAR-ERA prédit au moins une vague de chaleur sur la période de référence sont pris en compte dans le calcul du biais absolu standardisé moyenné sur la Wallonie. Néanmoins, pour ces derniers, le nombre de vagues de

chaleur de 10 et 15 jours restent très faibles, rendant dès lors le calcul des biais standardisés très sensibles aux différences entre MAR-ERA et les différents MAR-ESM. Il en est de même pour le nombre de jours en vigilance canicule où la même problématique intervient.

3.2.2. Indicateurs relatifs aux précipitations

Le tableau 7 contient les biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs aux précipitations. MAR-CMCC ne génère pas assez de précipitations durant l'été. Cela impacte donc le nombre maximum de jours secs consécutifs ainsi que le nombre de jours de précipitations en été, conduisant donc à trois indicateurs biaisés significativement en été. MAR-EC3 présente également un manque de précipitations en été bien que moins important en comparaison avec MAR-CMCC mais résultant tout de même en un biais significatif pour le nombre de jours de précipitations. A l'instar des deux précédents modèles, MAR-NOR est également trop sec en été, générant trop de jours secs durant cette saison. MAR-IPSL se démarque des modèles précédents en ayant trop de jours de précipitations en automne mais pas assez de jours de fortes précipitations en été.

En résumé, à l'exception de MAR-IPSL, les modèles présentant des biais sont trop secs en été mais à des intensités différentes.

		MAR-CMCC	MAR-EC3	MAR-MIR	MAR-MPI	MAR-NOR	MAR-IPSL
Somme précip	Année	0,31	0,17	0,42	0,47	0,32	0,66
	Hiver	0,68	0,44	0,83	0,73	0,64	0,68
	Printemps	0,48	0,26	0,32	0,34	0,52	0,52
	Eté	1,38	0,95	0,63	0,51	0,88	0,62
	Automne	0,38	0,12	0,26	0,38	0,22	0,89
Max j secs	Hiver	0,67	0,52	0,58	0,51	0,51	0,45
	Printemps	0,10	0,52	0,29	0,34	0,23	0,43
	Eté	1,22	0,69	0,29	0,29	1,18	0,47
	Automne	0,30	0,15	0,12	0,14	0,17	0,42
Max cumul 5j	Hiver	0,23	0,20	0,34	0,09	0,30	0,15
	Printemps	0,61	0,31	0,42	0,11	0,50	0,38
	Eté	0,25	0,27	0,22	0,35	0,33	0,52
	Automne	0,42	0,32	0,21	0,16	0,18	0,27
Jours précip	Hiver	0,51	0,66	0,48	0,82	0,39	0,77
	Printemps	0,10	0,23	0,21	0,56	0,38	0,98
	Eté	1,56	1,04	0,31	0,10	1,04	0,19
	Automne	0,34	0,19	0,24	0,50	0,28	1,17
Jours fortes précip	Hiver	0,88	0,22	0,88	0,48	0,98	0,37
	Printemps	0,83	0,24	0,25	0,15	0,37	0,25
	Eté	0,49	0,43	0,69	0,59	0,47	1,19
	Automne	0,78	0,17	0,23	0,34	0,19	0,33
Jours très fortes précip	Hiver	0,29	0,23	0,28	0,23	0,55	0,16
	Printemps	0,79	0,17	0,34	0,19	0,37	0,26
	Eté	0,22	0,23	0,22	0,19	0,16	0,29
	Automne	0,73	0,15	0,24	0,22	0,15	0,20
Cumul max	Hiver	0,43	0,24	0,23	0,16	0,48	0,14
	Printemps	0,67	0,20	0,43	0,19	0,52	0,33
	Eté	0,16	0,21	0,21	0,22	0,21	0,37
	Automne	0,43	0,19	0,21	0,23	0,14	0,17

Tableau 7 - Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs aux précipitations. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.

3.2.3. Indicateurs relatifs au vent

Seul MAR-EC3 est capable de représenter correctement la vitesse et l'écart type du vent, ce modèle ne présentant aucun biais significatif pour les différentes saisons. Pour ces deux mêmes indicateurs, MAR-MIR est le moins efficace en présentant des biais significatifs partout à l'exception de la vitesse du vent en hiver, sous-estimant en moyenne l'intensité du vent. L'analyse de MAR-NOR et MAR-IPSL montre un seul biais significatif pour la vitesse du vent au printemps, au contraire de MAR-MPI qui présente un biais significatif similaire en automne. MAR-CMCC présente un biais négatif légèrement significatif en été relatif à l'écart type du vent.

		MAR-CMCC	MAR-EC3	MAR-MIR	MAR-MPI	MAR-NOR	MAR-IPSL
Vitesse du vent à 10 m	Hiver	0,76	0,55	0,70	0,95	0,93	0,64
	Printemps	0,21	0,48	1,99	0,99	1,46	1,22
	Eté	0,78	0,32	1,97	0,31	0,24	0,40
	Automne	0,53	0,13	1,32	1,39	0,33	0,50
Ecart type du vent à 10 m	Hiver	0,39	0,09	1,02	0,36	0,25	0,13
	Printemps	0,12	0,32	1,51	0,37	0,58	0,23
	Eté	1,06	0,28	2,02	0,32	0,12	0,74
	Automne	0,31	0,37	1,56	0,55	0,26	0,19

Tableau 8 - Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs au vent. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.

3.2.4. Autres indicateurs

Le tableau 9 comprend les biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie des indicateurs ne rentrant pas dans les précédentes catégories. Pour l'évapotranspiration de référence, nous remarquons qu'hormis MAR-MPI, tous les modèles présentent des biais significatifs pour au moins un mois. MAR-MIR est le modèle le plus biaisé avec 5 mois sur 12 biaisés significativement. Cette présence de nombreux biais significatifs n'est pas surprenante car la formule utilisée pour calculer l'évapotranspiration de référence inclut plusieurs variables climatiques pour lesquelles les erreurs se cumulent. Sans rentrer dans les détails, 9 variables du MAR ont été utilisées dans ce cadre. Dès lors, les différents biais de ces variables s'accumulent lors du calcul de l'évapotranspiration de référence.

Concernant l'humidité spécifique, 4 modèles sur 6 sont significativement trop secs en été. Seuls MAR-EC3 et MAR-MPI ne présentent aucun biais.

Nous terminons avec l'analyse des biais de l'éclairement solaire à la surface. MAR-MIR et MAR-IPSL présentent des biais significatifs en été et en automne tandis que MAR-CMCC n'en présente qu'un seul en automne. Dans tous les cas, un biais significatif signifie une surestimation du rayonnement solaire à la surface.

		MAR- CMCC	MAR- EC3	MAR- MIR	MAR- MPI	MAR- NOR	MAR- IPSL
Evapotranspiration de référence	Janvier	0,52	0,41	1,00	0,21	0,42	0,25
	Février	0,76	0,39	0,37	0,57	0,90	0,30
	Mars	1,06	0,13	0,35	0,53	0,86	0,30
	Avril	0,13	0,25	0,08	0,61	0,19	0,09
	Mai	0,13	0,20	0,23	0,48	0,13	0,36
	Juin	0,09	0,65	1,34	0,07	0,16	0,84
	Juillet	0,83	0,37	1,32	0,06	0,38	1,63
	Août	0,74	0,39	1,01	0,12	0,84	1,59
	Septembre	1,10	1,04	1,15	0,55	1,21	1,18
	Octobre	1,17	0,16	0,79	0,18	0,45	0,81
	Novembre	0,91	0,38	0,55	0,24	1,43	0,43
	Décembre	0,84	0,53	0,44	0,33	0,79	0,47
Humidité spécifique	Hiver	0,05	0,25	0,27	0,18	0,40	0,05
	Printemps	0,64	0,07	0,67	0,04	0,63	0,73
	Eté	1,38	0,89	1,11	0,29	1,14	2,02
	Automne	0,82	0,08	0,79	0,27	0,95	0,80
Eclairement solaire à la surface	Hiver	0,64	0,56	0,41	0,73	0,50	0,53
	Printemps	0,15	0,24	0,30	0,94	0,18	0,37
	Eté	0,58	0,71	1,79	0,06	0,51	2,18
	Automne	1,11	0,71	1,47	0,09	0,97	1,39

Tableau 9 - Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour l'évapotranspiration de référence, l'humidité spécifique et l'éclairement solaire à la surface. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.

3.3. Projections climatiques

Ce chapitre est le plus important de ce rapport car nous allons y présenter les changements des indicateurs en fonction des degrés de réchauffement. Dans un premier temps, nous discuterons des périodes de 20 ou 30 ans atteignant les différents degrés de réchauffement. Ensuite, les résultats concernant les indicateurs seront présentés. Nous discuterons essentiellement des moyennes de l'ensemble des modèles sans analyser modèle par modèle les résultats.

3.3.1. Identification des périodes d'étude

Dans le tableau 10 figurent les périodes durant lesquelles un certain degré de réchauffement est atteint. Nous remarquons que les modèles IPSL et EC3 se réchauffent plus vite que les autres. Cela est tout à fait cohérent avec leur sensibilité climatique qui est supérieure à 4°C (cf. section 2.2). A l'inverse, MIR et NOR ont des sensibilités climatiques bien plus faibles se traduisant par un réchauffement plus tardif dans le siècle.

Modèle	2° sur 30 ans (SSP3-7.0)	3° sur 30 ans (SSP3-7.0)	4° sur 20 ans (SSP5-8.5)
EC3	2017-2046	2043-2072	2058-2077
IPSL	2020-2049	2042-2071	2057-2076
CMCC	2024-2053	2048-2077	2060-2079
MPI	2036-2065	2066-2095	2081-2100
MIR	2045-2074	2071-2100	2081-2100
NOR	2048-2077	2071-2100	2081-2100
Moyenne	2032-2061	2057-2086	2070-2089

Tableau 10 - Périodes d'étude pour les projections futures.

3.3.2. Indicateurs relatifs à la température

A. Température moyenne, maximale et minimale

Les résultats sont présentés dans le tableau 11. Nous y avons listé les valeurs moyennes des changements pour l'ensemble des modèles ainsi que les écarts-types correspondants. Lorsque la case est grisée, cela signifie que le changement est inférieur à la variabilité interannuelle (çàd l'écart-type) calculée sur la période de référence. En d'autres termes, cela signifie que le changement n'est pas statistiquement significatif.

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
Température moyenne journalière	Année	9,50 +/- 0,76	1,35 +/- 0,83	2,27 +/- 0,75	3,50 +/- 0,72
	Hiver	2,39 +/- 1,37	1,22 +/- 1,41	2,10 +/- 1,15	2,98 +/- 1,17
	Printemps	8,34 +/- 1,23	1,10 +/- 1,29	1,81 +/- 1,25	2,70 +/- 1,19
	Été	17,27 +/- 1,28	1,73 +/- 1,32	2,93 +/- 1,37	4,72 +/- 1,14
	Automne	9,83 +/- 0,97	1,37 +/- 1,09	2,24 +/- 1,13	3,60 +/- 1,01
Température maximale journalière	Hiver	4,15 +/- 1,29	1,21 +/- 1,33	2,05 +/- 1,12	2,90 +/- 1,14
	Printemps	11,32 +/- 1,43	1,12 +/- 1,50	1,86 +/- 1,46	2,78 +/- 1,40
	Été	21,20 +/- 1,73	1,98 +/- 1,71	3,33 +/- 1,80	5,47 +/- 1,50
	Automne	12,36 +/- 1,12	1,51 +/- 1,33	2,39 +/- 1,36	3,95 +/- 1,27
Température minimale journalière	Hiver	0,57 +/- 1,49	1,28 +/- 1,51	2,24 +/- 1,21	3,15 +/- 1,22
	Printemps	5,42 +/- 1,09	1,12 +/- 1,15	1,80 +/- 1,08	2,67 +/- 1,04
	Été	13,44 +/- 0,95	1,48 +/- 1,04	2,55 +/- 1,04	4,00 +/- 1,00
	Automne	7,45 +/- 0,93	1,27 +/- 1,00	2,16 +/- 1,03	3,36 +/- 0,94

Tableau 11 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs de base de la température (changement +/- écart-type). En rouge : plus chaud que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.

L'analyse du tableau ci-dessus montre que tous les changements en Belgique sont significatifs (par rapport à 1981-2010) dès que le réchauffement global vaut au minimum 3°C (par rapport à 1850-1900). Néanmoins, même dans un monde où le réchauffement global est limité à +2°C, le changement est significatif en été et en hiver pour les trois types de température. En outre, nous remarquons que l'été est la saison qui se réchauffe le plus qu'importe l'indicateur. La principale raison est que les étés vont devenir plus secs et ensoleillés par rapport aux autres saisons ce qui va emballer la hausse des températures pendant cette saison. Cette hausse de température plus importante en été qu'à l'échelle annuelle en Europe de l'Ouest est aussi suggérée par l'ensemble des ESMs utilisé dans le dernier rapport du GIEC. Dans un monde à +4°C (par rapport à 1850-1900), les jours d'été devraient voir leur température maximale augmenter de plus de 5°C (par rapport à 1981-2010) sachant que la période 1981-2010 est +1.3°C plus chaude en Belgique que 1850-1900. A l'inverse, la saison qui se réchauffe le moins est systématiquement le printemps. La différence entre le printemps et l'été est particulièrement remarquable si on regarde le changement de la température maximale dans un monde à +4°C, où un facteur 2 divise les changements respectifs.

La figure 5 montre le changement de la température moyenne annuelle en Belgique. On peut y constater un léger gradient de température nord-sud. Au plus on s'éloigne de la côte, au plus le changement est important. En conséquence, le sud de la province du Luxembourg sera le plus affecté par le réchauffement climatique car le plus éloigné de la Mer du Nord qui joue un rôle de tampon dans la hausse des températures.

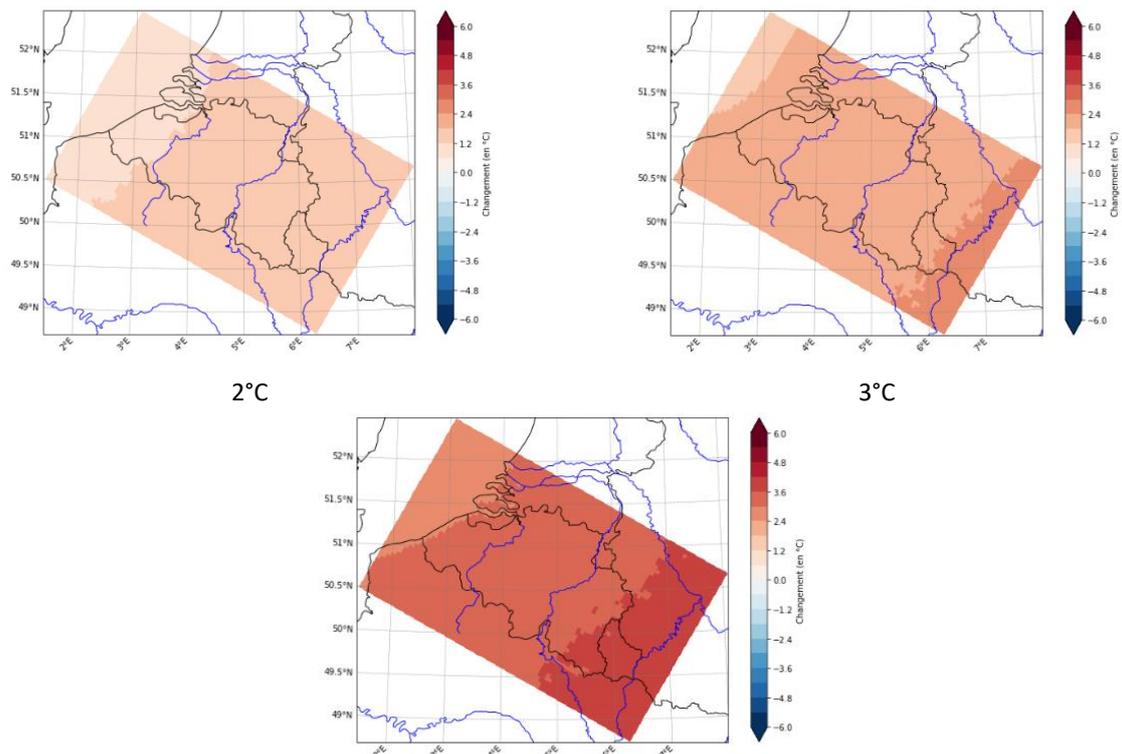


Figure 6 - Changement de la température moyenne annuelle en fonction des degrés de réchauffement mondiaux.

La Figure 6 montre un gradient similaire pour le changement de la température maximale en été. Si le réchauffement climatique global venait à atteindre les 4°C (par rapport à 1850-1900), le sud de la Belgique verrait sa température maximale augmenter de pratiquement 6°C en été (par rapport à 1981-2010).

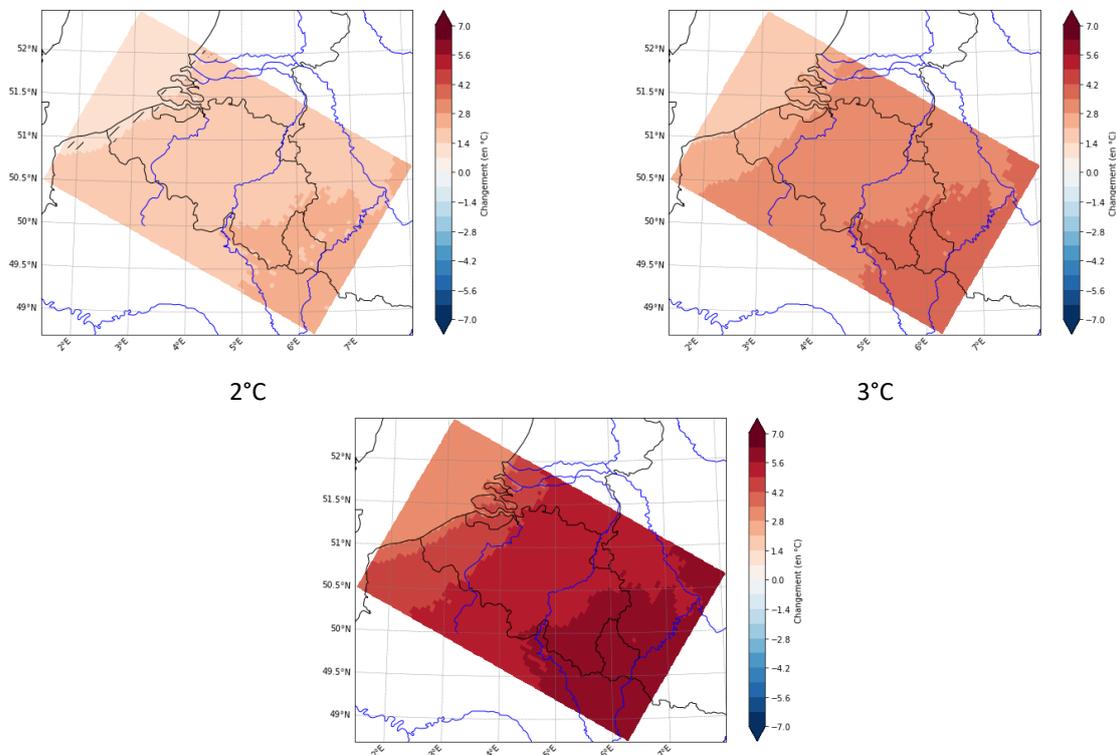


Figure 7 - Changement de la température maximale estivale en fonction des degrés de réchauffement mondiaux.

B. Nombre de jours de gel, d’été, degrés-jours et période de croissance végétative

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
J-été	Année	25,20 +/- 11,83	15,39 +/- 14,93	26,47 +/- 16,65	46,72 +/- 15,47
	J-gel	49,06 +/- 16,83	-15,04 +/- 14,97	-24,93 +/- 11,23	-32,95 +/- 10,20
	Mars	7,87 +/- 5,60	-2,87 +/- 4,89	-4,07 +/- 4,05	-5,61 +/- 3,27
	Avril	2,18 +/- 2,69	-1,37 +/- 1,56	-1,82 +/- 0,85	-2,04 +/- 0,66
Deg-jour	Année	2921,54	-361,63	-594,02	-855,91
		+/- 231,54	+/- 232,68	+/- 189,42	+/- 200,34
PCV	Année	262,24 +/- 32,56	26,30 +/- 33,59	42,57 +/- 29,85	59,77 +/- 26,65

Tableau 12 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs au nombre de jours d’été et de gel, le nombre de degrés-jours et la période de croissance végétative (changement +/- écart-type). En rouge : plus chaud que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.

Le changement pour le nombre de jours d’été est significatif pour tous les degrés de réchauffement global. Si ce dernier atteint les 3°C, nous aurons en moyenne presque qu’un mois en plus de jours d’été en comparaison avec la période de référence 1981-2010.

Néanmoins, pour le nombre de jours de gel annuel, le changement ne devient significatif qu’à partir d’un réchauffement global de 3°C. Pour le nombre de jours de gel en mars, il ne le devient qu’à partir

de 4°C et ne l'est jamais si on s'intéresse au mois d'avril. Cela s'explique par l'importante variabilité interannuelle pendant la période de référence du nombre de jours de gel en mars et avril, rendant dès lors les changements non significatifs. Néanmoins, bien que les changements ne soient pas nécessairement significatifs, tous vont dans le sens d'une décroissance du nombre de jours de gel. Les gelées dites « tardives » devraient se faire plus rares mais devraient toutefois persister augmentant ainsi le risque de dommage sur la végétation et les cultures qui démarreront elles plus tôt.

Nous constatons également une décroissance à chaque fois significative pour l'indicateur relatif aux degrés-jours. Cela traduit une diminution du nombre de jours avec une température moyenne journalière inférieure ou égale à 17°C ainsi qu'une augmentation de la température moyenne journalière pour les jours qui respectent toujours la condition.

La période de croissance végétative s'accroît significativement dans un monde à +3°C et +4°C. Dans le cas d'un réchauffement global de 4°C, la période de croissance végétative sera en moyenne plus longue de 2 mois. Celle-ci commencera plus tôt dans l'année où des températures plus douces arriveront plus vite en hiver, et se terminera plus tard dans l'année sachant toutefois que le risque de gelée tardive persistera.

La figure 7 montre que le nombre de jours d'été des régions situées plus en altitude sera logiquement moins impacté par le réchauffement climatique. Le nord du sillon Sambre-et-Meuse ainsi que le sud de la Province du Luxembourg seront en revanche les régions où les changements seront le plus importants. A l'inverse, la figure 8 montre que ce sont les points culminants belges qui verront la plus grande diminution du nombre de jours de gel, qu'importe le degré de réchauffement. En outre, pour l'est de la Wallonie, on constate que le changement devient déjà significatif dans un monde à +2°C.

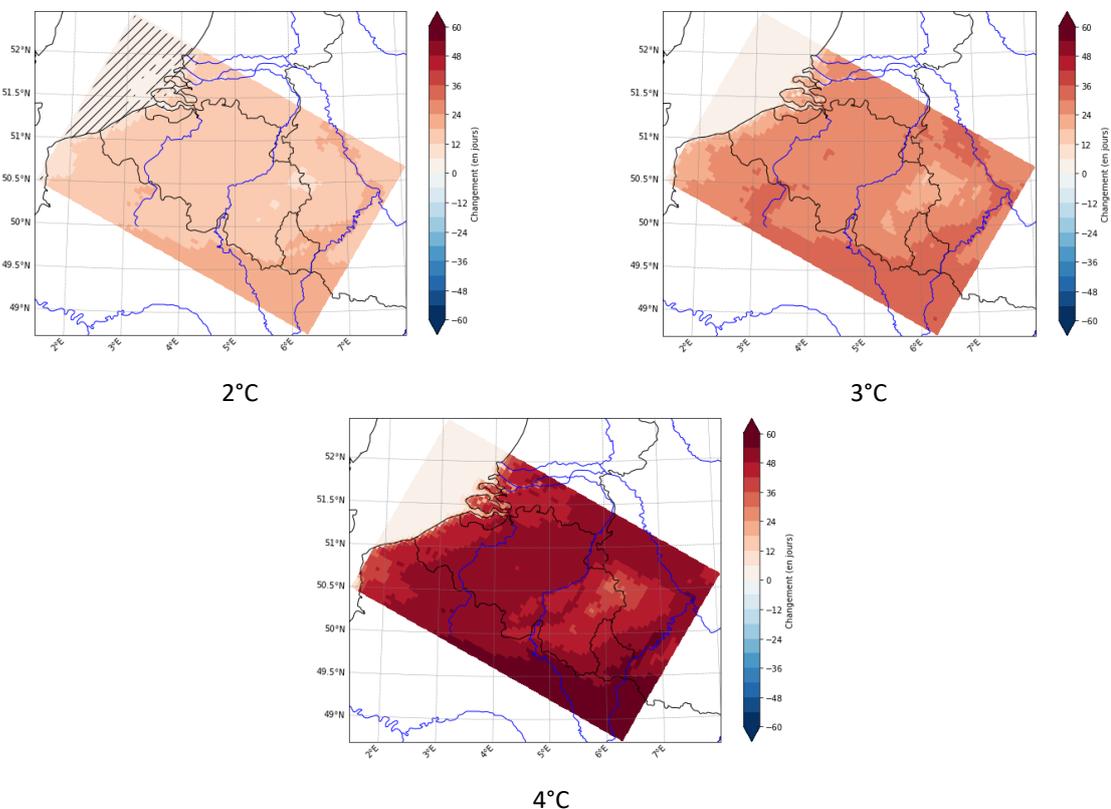


Figure 8 - Changement du nombre de jours d'été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

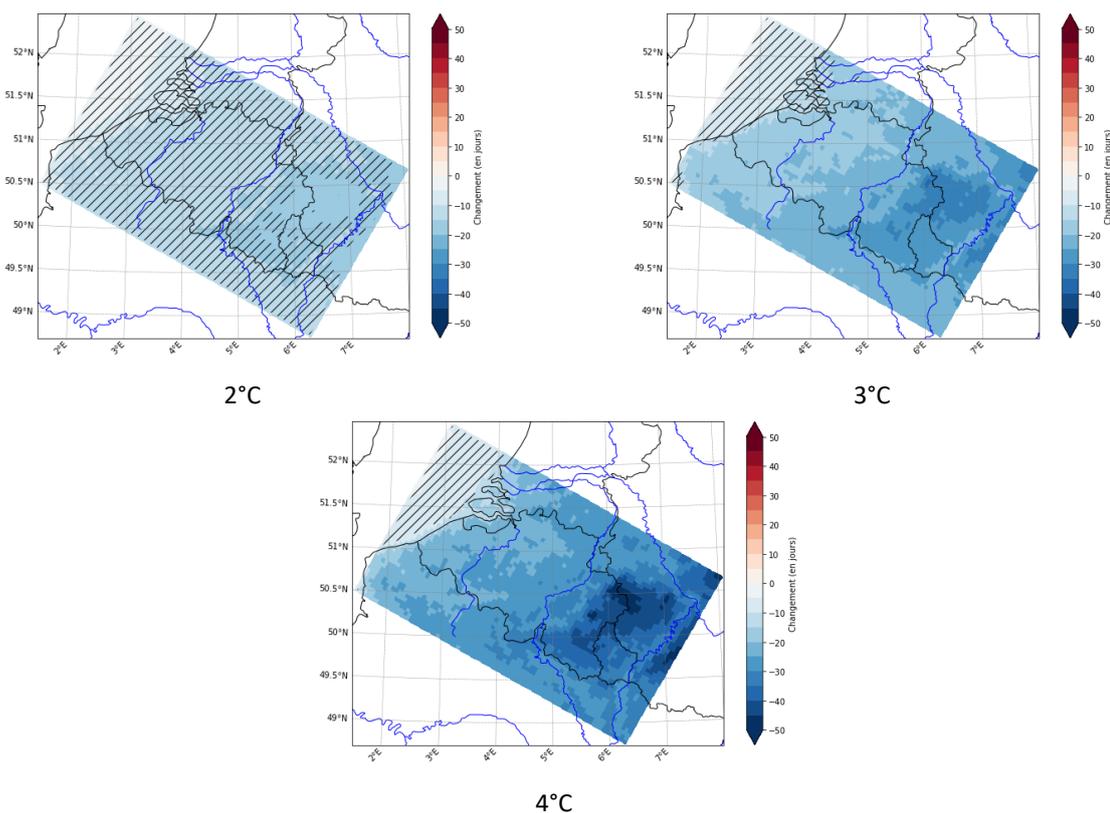


Figure 9 - Changement du nombre de jours de gel en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

C. Nombre de vagues de chaleur et nombre de jours en vigilance canicule

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
J-canicule	Année	0,16 +/- 0,70	0,90 +/- 1,86	2,32 +/- 3,63	6,31 +/- 5,89
Vague chaleur5	Année	2,38 +/- 4,02	5,04 +/- 8,09	11,10 +/- 12,01	24,29 +/- 13,84
Vague chaleur7	Année	1,66 +/- 3,25	3,84 +/- 6,88	9,08 +/- 10,63	20,94 +/- 13,84
Vague chaleur10	Année	0,91 +/- 2,22	2,23 +/- 6,88	6,29 +/- 8,59	15,84 +/- 12,44
Vague chaleur15	Année	0,23 +/- 0,99	0,92 +/- 2,92	3,41 +/- 5,95	9,37 +/- 10,18

Tableau 13 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs aux vagues de chaleur et au nombre de jours en vigilance canicule (changement +/- écart-type). En rouge : plus chaud que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.

Le tableau 13 montre des changements significatifs partout à l'exception du changement concernant le nombre de vagues de chaleur de 15 jours si le réchauffement global est limité à +2°C. Hormis cette exception, nous devrions subir un nombre significativement plus élevé de vagues de chaleur quel que soit le scénario. Dans un monde à +4°C, 20 vagues de chaleur d'une semaine se produiront en plus chaque année par rapport à la période de référence. Il est bon toutefois de rappeler que nous n'aurons pas 20 semaines de vagues de chaleur mais 20 occurrences (potentiellement successives) de 7 jours avec une vague de chaleur (ex: une vague de chaleur de 8 jours compte pour 2 vagues de chaleur de 7 jours). En outre, même les vagues de chaleur de 10 et 15 jours se feront bien plus fréquentes.

En conséquence de l'augmentation significative de la température minimale et maximale en été telle que présentée dans la section 3.3.2.1, le nombre de jours en vigilance canicule croît également significativement pour tous les degrés de réchauffement. Pour le degré de réchauffement

intermédiaire, plus de 2 jours en plus par rapport à la période de référence seront chaque été en vigilance canicule.

Les figures 9 et 10 montrent que la variabilité spatiale du changement du nombre de vagues de chaleur de 5 jours et du nombre de jours en vigilance canicule est pratiquement identique. Tout comme nous l'avons remarqué pour l'évolution du nombre de jours d'été, les hauts plateaux et points culminants belges seront moins impactés (en absolu) par le réchauffement climatique pour ces deux indicateurs. En outre, dans un monde à +2°C, le changement du nombre de jours en vigilance canicule n'est pas significatif dans le sud-est de la Belgique. Bien que non inclus ici, les changements pour les vagues de chaleur de durées plus longues présentent une variabilité spatiale très similaire à celle illustrée sur la figure 10.

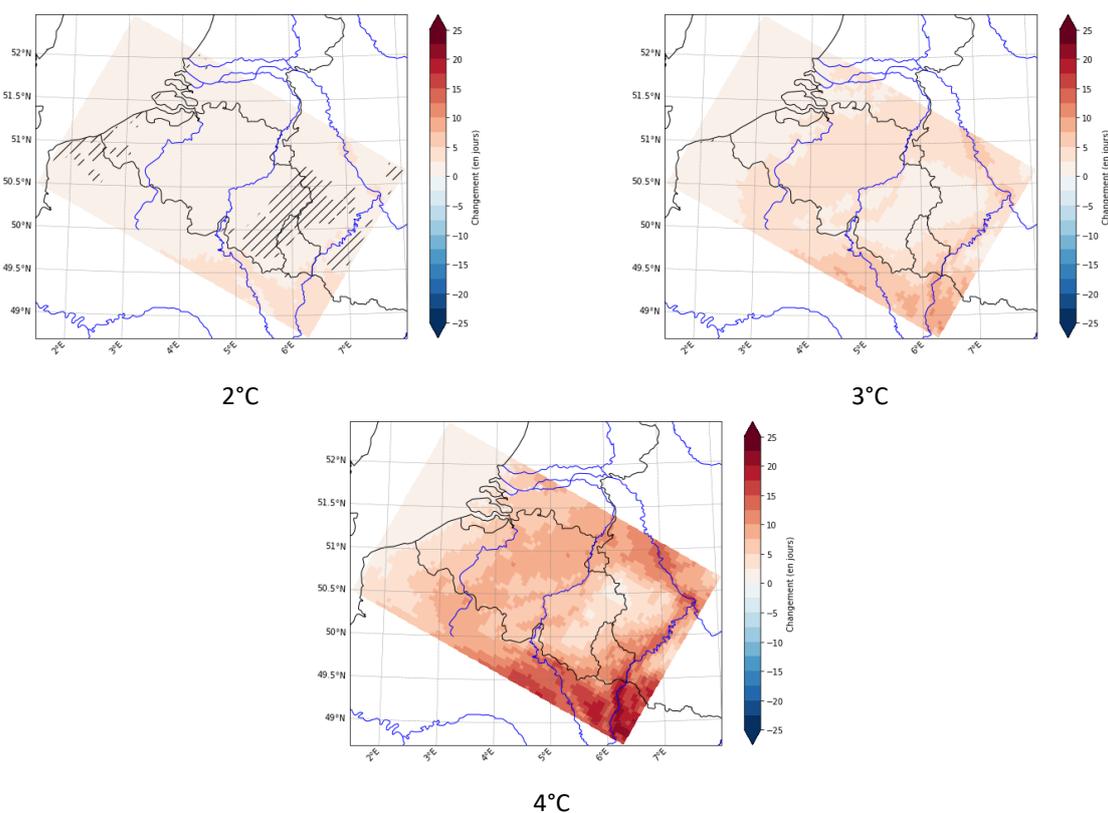


Figure 10 - Changement du nombre de jours en vigilance canicule en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

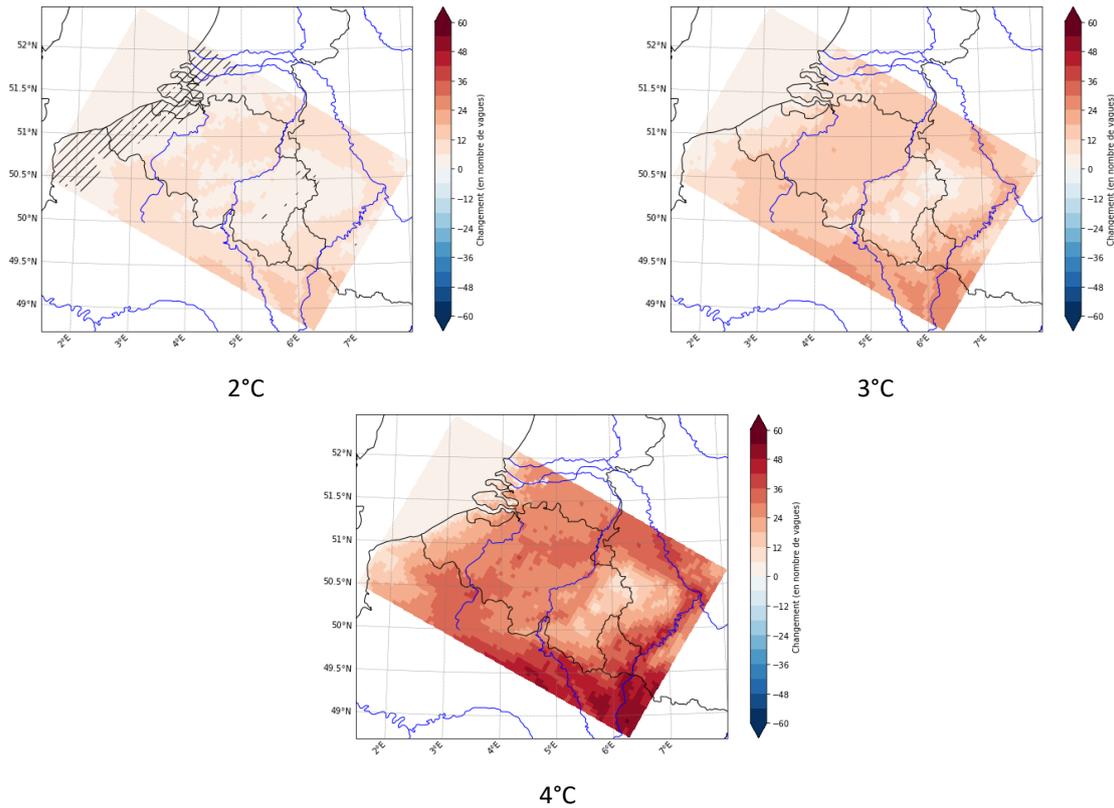


Figure 11 - Changement du nombre de vagues de chaleur de 5 jours en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

3.3.3. Indicateurs relatifs aux précipitations

A. Sommes des précipitations

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
Somme précip	Année	916,18 +/- 121,93	36,35 +/- 139,97	42,65 +/- 137,76	53,72 +/- 141,83
	Hiver	240,54 +/- 63,10	22,74 +/- 65,77	37,04 +/- 68,69	60,59 +/- 64,79
	Printemps	204,31 +/- 49,40	14,63 +/- 55,66	11,46 +/- 49,33	15,50 +/- 64,02
	Été	234,52 +/- 59,21	-13,94 +/- 70,77	-23,01 +/- 68,59	-40,45 +/- 76,15
	Automne	236,39 +/- 55,67	13,15 +/- 69,85	16,09 +/- 70,27	17,58 +/- 69,27

Tableau 14 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour l'indicateur relatif à la somme des précipitations (changement +/- écart-type). En rouge/bleu : plus sec/humide que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.

Le tableau 14 montre les changements de la somme des précipitations annuelle et saisonnière. Aucun changement n'est significatif, même si le réchauffement global atteint les 4°C.

A l'échelle annuelle, on constate une légère croissance (non significative) des précipitations qui augmente avec l'intensité du réchauffement planétaire. Toutes les saisons montrent également une

croissance pour tous les degrés de réchauffement, à l'exception de l'été qui présente une décroissance. Les changements pour l'été (diminution) et l'hiver (augmentation) dépendent du degré de réchauffement, leur amplitude croît avec ce dernier. En revanche, le printemps et l'automne ne montrent pas une claire augmentation ou diminution si le réchauffement planétaire s'accroît.

En outre, nous constatons que la variabilité interannuelle est en valeur absolue bien plus grande que le changement moyen pour tous les degrés de réchauffement et périodes, illustrant la grande incertitude relative aux changements de la somme des précipitations sachant que la Belgique est à la frontière entre deux tendances en Europe de l'Ouest avec une augmentation des précipitations au nord de la Belgique et une diminution significative au sud de la Belgique selon le dernier rapport du GIEC (2021).

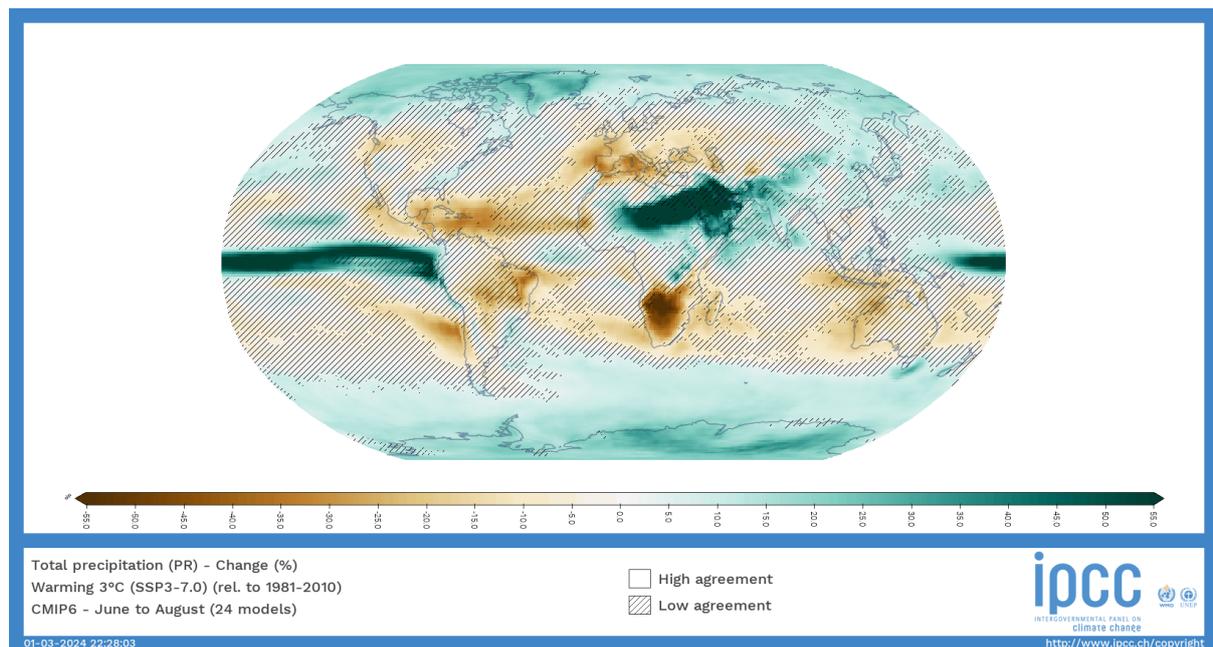


Figure 12 - Changements des précipitations en été prévus par les ESMs utilisés dans le dernier rapport du GIEC.

Les figures 12 et 13 montrent le changement relatif (exprimé en pourcentage) par rapport à la période de référence 1981-2010 pour l'hiver et l'été. On constate qu'en hiver, le changement devient localement significatif en particulier dans le Hainaut, dans le Brabant Wallon et dans le sud de la Wallonie si le réchauffement planétaire atteint les 4°C. Les précipitations augmenteront de plus de 30% durant cette même saison dans certaines régions wallonnes. En outre, nous remarquons clairement que le changement est moins important dans le sud-est de la Wallonie.

Pour terminer, il est important de souligner que l'absence de changements significatifs en moyenne n'exclut pas que, par exemple, certains étés soient significativement plus secs par rapport à la période de référence 1981-2010. En effet, ces derniers peuvent être compensés par des étés très humides comme celui de juillet 2021 impliquant dès lors des changements moyens non significatifs. A titre d'illustration, dans un monde plus chaud de 2°C, une analyse plus poussée montre qu'un été sur trois sera significativement plus sec mais il subsistera quelques étés humides comme celui de juillet 2021.

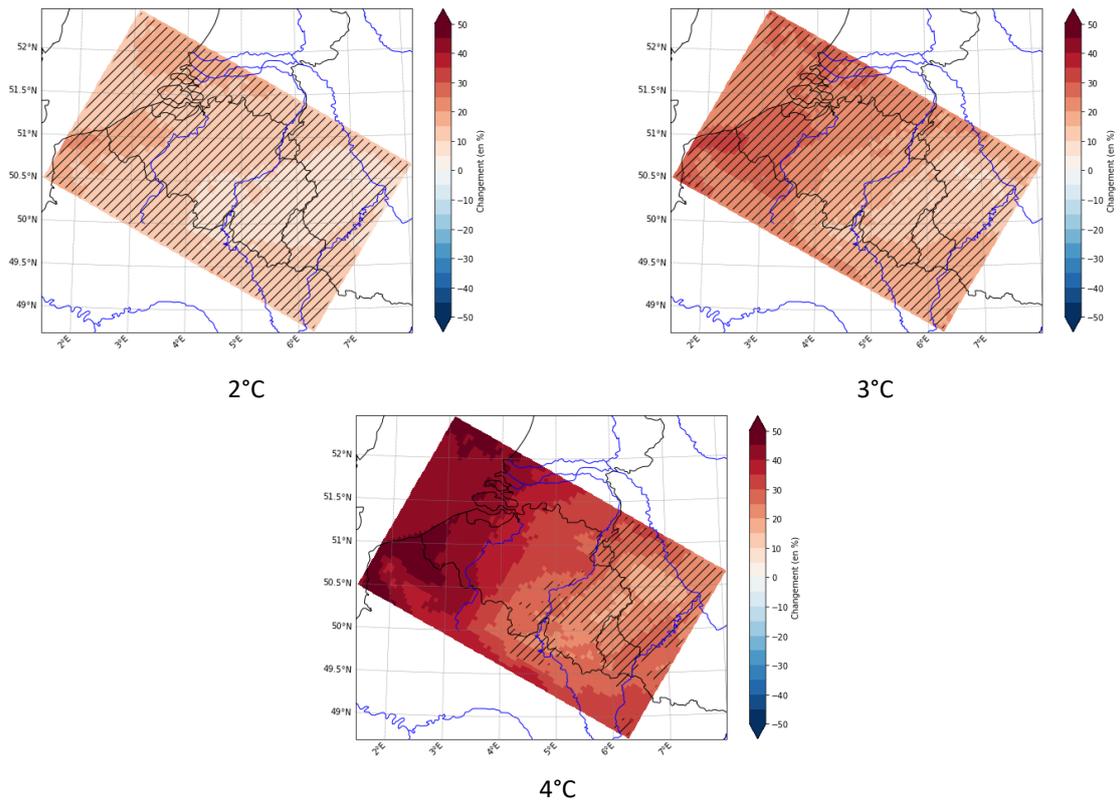


Figure 13 - Changement de la somme des précipitations en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

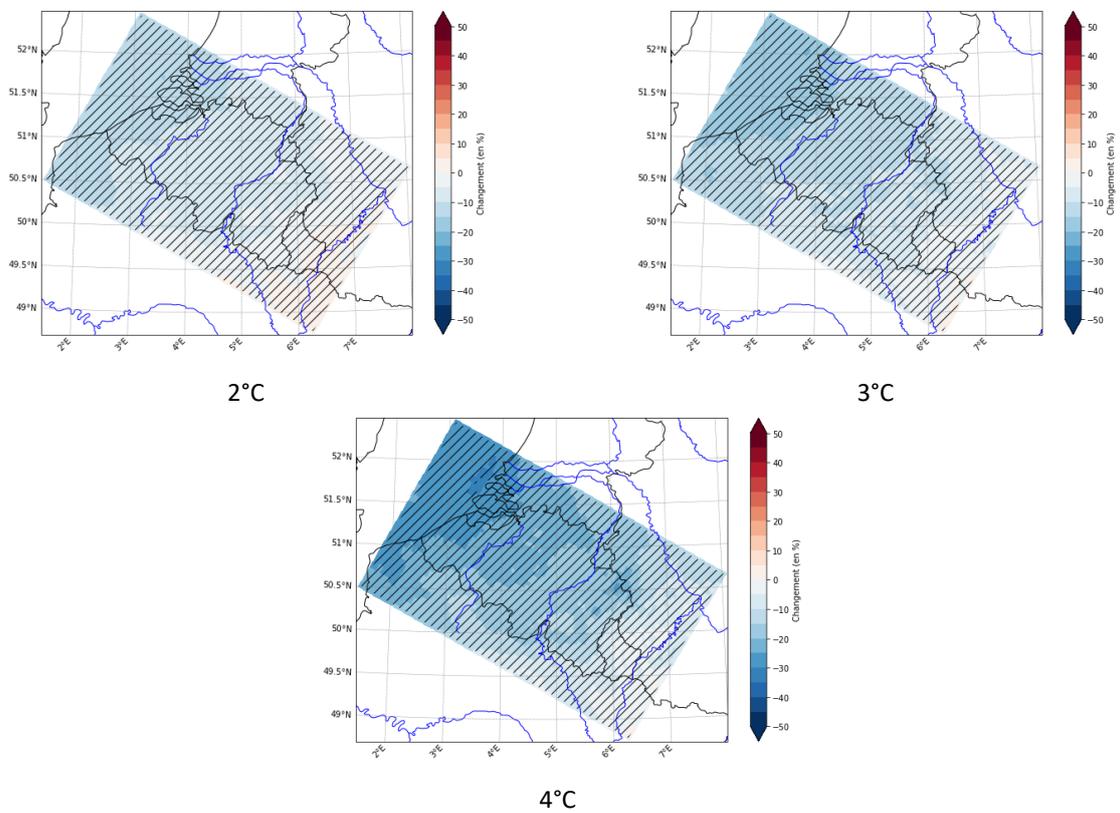


Figure 14 - Changement de la somme des précipitations en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

		MAR-CMCC	MAR-EC3	MAR-MIR	MAR-MPI	MAR-NOR	MAR-IPSL
Somme précip	Année						
	Hiver						
	Printemps						
	Été						
	Automne						

Tableau 15 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour la somme des précipitations dans un monde à +3°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent pour l'indicateur et la période considérée.

		MAR-CMCC	MAR-EC3	MAR-MIR	MAR-MPI	MAR-NOR	MAR-IPSL
Somme précip	Année						
	Hiver						
	Printemps						
	Été						
	Automne						

Tableau 16 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour la somme des précipitations dans un monde à +4°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent pour l'indicateur et la période considérée.

Le tableau 14 montre les résultats moyens de l'ensemble des modèles (régionalisés avec MAR). Les tableaux 15 et 16 montrent la tendance pour chaque modèle MAR-ESM pour un réchauffement global de 3°C et 4°C respectivement.

Pour l'hiver et le printemps, l'ensemble des modèles s'accordent dans les deux cas sur une augmentation des précipitations pour ces deux saisons. En automne, MAR-MPI, meilleur modèle sur le climat présent, va à contresens des autres modèles en prévoyant des automnes plus secs. En été, 5 modèles sur six prévoient des étés moins pluvieux.

Le seul changement de tendance intervient pour la somme des précipitations annuelle où MAR-MPI, qui prévoit des années plus sèches dans un monde à +3°C, prédit le contraire dans un monde à +4°C. Bien que faible et pas statistiquement significative, il semble en conséquence plus probable d'avoir des années plus humides dans un monde à +4°C.

B. Nombre de jours de précipitations, de fortes précipitations et de très fortes précipitations

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
Jours précip	Hiver	43,91 +/- 8,45	1,52 +/- 7,97	2,45 +/- 7,98	4,28 +/- 7,54
	Printemps	42,76 +/- 8,26	1,32 +/- 8,19	0,04 +/- 7,73	-0,79 +/- 8,48
	Eté	46,46 +/- 9,17	-4,24 +/- 9,34	-5,95 +/- 8,95	-8,73 +/- 10,13
	Automne	42,20 +/- 7,92	-0,65 +/- 8,21	-0,60 +/- 7,93	-1,42 +/- 8,13
Jours fortes précip	Hiver	5,33 +/- 2,78	1,02 +/- 3,06	1,70 +/- 3,09	2,73 +/- 3,12
	Printemps	3,36 +/- 2,05	0,53 +/- 2,25	0,53 +/- 2,10	0,99 +/- 2,59
	Eté	3,48 +/- 2,23	0,02 +/- 2,48	-0,11 +/- 2,55	-0,63 +/- 2,42
	Automne	5,27 +/- 2,52	0,81 +/- 3,07	1,04 +/- 3,06	1,23 +/- 2,95
Jours très fortes précip	Hiver	0,67 +/- 0,85	0,23 +/- 0,96	0,40 +/- 1,11	0,69 +/- 1,17
	Printemps	0,43 +/- 0,69	0,06 +/- 0,73	0,10 +/- 0,70	0,23 +/- 0,88
	Eté	0,50 +/- 0,75	0,04 +/- 0,83	0,09 +/- 0,83	-0,05 +/- 0,74
	Automne	0,81 +/- 0,94	0,34 +/- 1,17	0,34 +/- 1,17	0,49 +/- 1,17

Tableau 17 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs au nombre de jours (fortes/très fortes) précipitations (changement +/- écart-type). En rouge/bleu : plus sec/humide que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.

Similairement à la somme des précipitations, le tableau 17 montre qu'aucun indicateur ne présente de changements significatifs qu'importe la période et le degré de réchauffement.

Bien que ces changements ne soient pas statistiquement significatifs, tous les modèles prévoient plus de jours de précipitations en hiver (cf. tableaux 18 et 19). On observe également une augmentation du changement avec le degré de réchauffement. Le nombre de jours de précipitations devrait également augmenter durant le printemps sauf si nous atteignons les 4°C de réchauffement planétaire. Néanmoins, comme montré dans tableau 19, les différents MAR-ESM se contredisent. En effet, trois d'entre eux prévoient une augmentation tandis que les trois autres une diminution. En automne, les modèles se contredisent également bien qu'en moyenne, on obtient une diminution du nombre de jours de précipitations en automne. Cependant, les modèles prédisent sans exception une diminution du nombre de jours de précipitations en été dans un monde à +3°C et +4°C.¹² Cette saison est d'ailleurs la plus impactée. En outre, la figure 14 montre un changement localement significatif pour le nord de la Wallonie dans un monde à +4°C.

Concernant le nombre de jours de fortes précipitations, on constate une croissance partout sauf en été dans un monde plus chaud de 3°C et 4°C. Cette décroissance est respectivement simulée par 4 et 5 modèles sur 6 comme montré dans les tableaux 18 et 19. En hiver et au printemps, toutes les

¹² Dans un monde à +2°C, MAR-EC3 est le seul modèle à prévoir une augmentation.

modélisations simulent une croissance et seule une modélisation sur 6 prévoit une décroissance dans un monde à +3°C et +4°C en automne. Contrairement au nombre de jours de précipitations, l'hiver est ici la saison la plus impactée. La figure 15 l'illustre bien en montrant également des changements localement significatifs principalement dans le sud de la Wallonie dans un monde à +4°C.

Enfin, les conclusions relatives au nombre de jours de très fortes précipitations sont relativement identiques à celles du nombre de jours de fortes précipitations. Dans un monde à +3°C, à l'exception de MAR-CMCC, les modèles prévoient une augmentation du nombre de jours de très fortes précipitations. Dans un monde à +4°C, les modèles se contredisent uniquement en été. La moyenne des modèles prédit d'ailleurs pour cette saison la seule diminution relative à cet indicateur. Pour conclure, bien que non incluses dans ce rapport, les figures relatives au nombre de jours de très fortes précipitations montrent également en hiver des changements localement significatifs dans le sud de la Belgique.

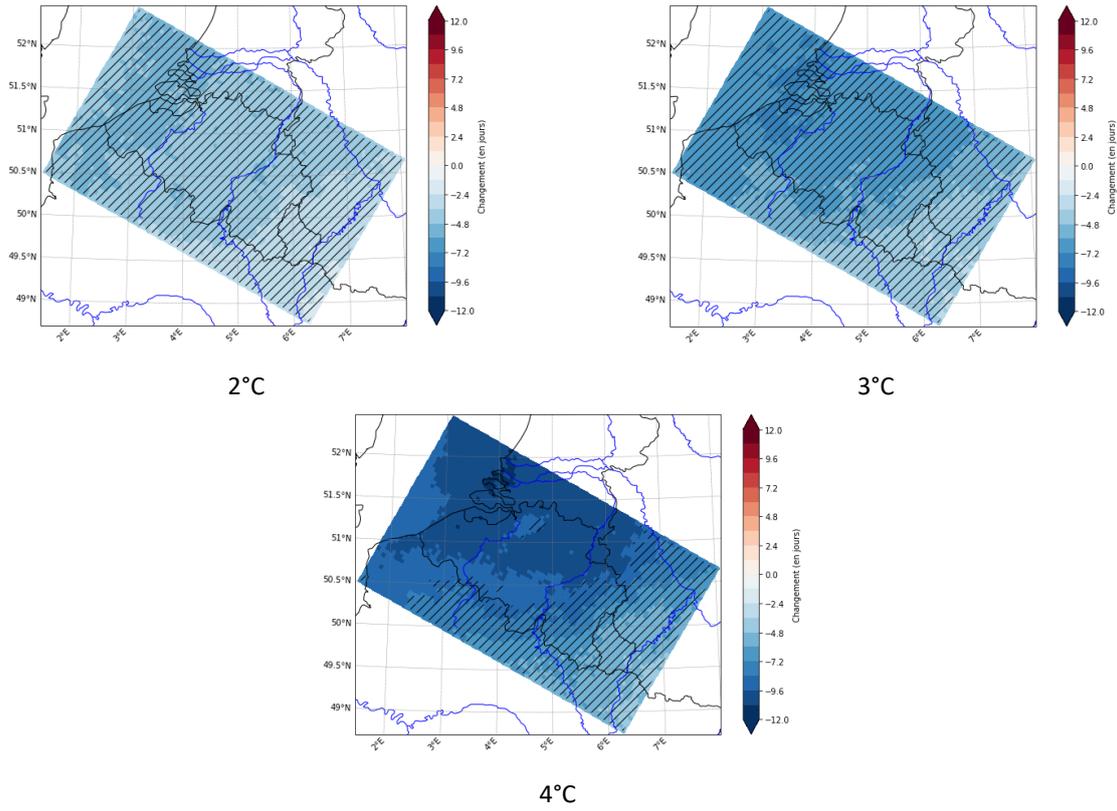


Figure 15 - Changement du nombre de jours de précipitations en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

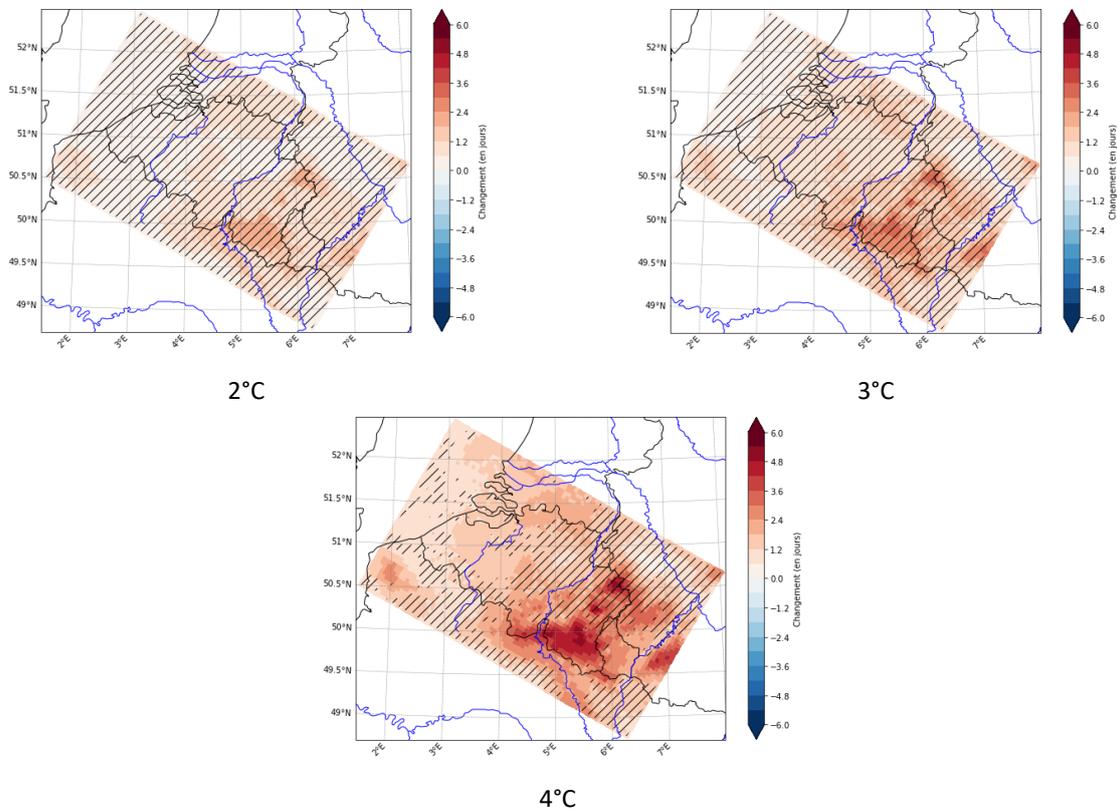


Figure 16 - Changement du nombre de jours de fortes précipitations en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

		MAR-CMCC	MAR-EC3	MAR-MIR	MAR-MPI	MAR-NOR	MAR-IPSL
Jours précip	Hiver						
	Printemps						
	Eté						
	Automne						
Jours fortes précip	Hiver						
	Printemps						
	Eté						
	Automne						
Jours très fortes précip	Hiver						
	Printemps						
	Eté						
	Automne						

Tableau 18 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour le nombre de jours de (fortes / très fortes) précipitations dans un monde à +3°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent pour l'indicateur et la période considérée.

		MAR-CMCC	MAR-EC3	MAR-MIR	MAR-MPI	MAR-NOR	MAR-IPSL
Jours précip	Hiver						
	Printemps						
	Eté						
	Automne						
Jours fortes précip	Hiver						
	Printemps						
	Eté						
	Automne						
Jours très fortes précip	Hiver						
	Printemps						
	Eté						
	Automne						

Tableau 19 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour le nombre de jours de (fortes / très fortes) précipitations dans un monde à +4°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent pour l'indicateur et la période considérée.

C. Nombre maximum de jours secs consécutifs, maximum du cumul des précipitations sur 5 jours et cumul journalier maximum des précipitations

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
Max j secs	Hiver	10,78 +/- 4,46	-0,53 +/- 4,00	-1,06 +/- 4,35	-1,61 +/- 3,92
	Printemps	11,28 +/- 4,47	-0,49 +/- 4,25	-0,30 +/- 4,31	-0,07 +/- 3,99
	Eté	9,91 +/- 4,18	1,38 +/- 4,76	1,60 +/- 4,77	3,19 +/- 6,55
	Automne	11,16 +/- 4,54	0,27 +/- 4,78	0,09 +/- 4,33	0,76 +/- 5,20
Max cumul 5j	Hiver	44,26 +/- 13,16	3,34 +/- 12,56	5,99 +/- 15,02	9,27 +/- 13,46
	Printemps	39,09 +/- 12,53	1,99 +/- 14,77	3,04 +/- 13,07	3,36 +/- 13,94
	Eté	43,75 +/- 15,80	0,07 +/- 16,66	0,06 +/- 17,25	-3,45 +/- 16,15
	Automne	45,74 +/- 13,43	6,01 +/- 19,72	5,62 +/- 17,58	7,33 +/- 18,92
Cumul max	Hiver	19,29 +/- 6,44	1,27 +/- 6,15	2,71 +/- 7,53	4,71 +/- 8,35
	Printemps	17,95 +/- 6,78	1,12 +/- 8,30	1,84 +/- 8,16	2,14 +/- 8,01
	Eté	19,33 +/- 9,33	0,32 +/- 10,44	1,01 +/- 10,72	-0,69 +/- 10,54
	Automne	21,45 +/- 7,89	3,13 +/- 10,48	2,98 +/- 10,21	3,99 +/- 10,76

Tableau 20 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs au nombre maximum de jours secs consécutifs, au cumul maximum sur 5 jours et au cumul maximum journalier (changement +/- écart-type). En rouge/bleu : plus sec/humide que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.

Tout comme nous l'avions constaté dans les deux précédentes sections, aucun des indicateurs présents dans le tableau 20 ne montre de changements significatifs. En outre, l'analyse par points de grille n'a relevé que très peu de changements localement significatifs.

Le nombre maximum de jours secs consécutifs devrait diminuer en hiver et au printemps. Cette diminution est en revanche très faible pour le printemps dans un monde à +4°C. En outre, les tableaux 21 et 22 montrent des contradictions entre les modèles pour cette même saison, même dans un réchauffement global limité à +3°C. Ces mêmes tableaux montrent également une absence de certitude pour l'automne, bien que la moyenne des modèles soit pour cette saison positive. En revanche, les modèles prédisent tous une augmentation en été qui est la saison la plus impactée par les changements (ici diminutions) de précipitations. La figure 16 montre cette augmentation sur le territoire belge.

Le cumul maximum sur 5 jours devrait augmenter sauf en été si on atteint les 4 degrés de réchauffement planétaire. Néanmoins, les tableaux 21 et 22 montrent une nouvelle fois que les modèles se contredisent en été. Pour les autres saisons, excepté MAR-CMCC en automne, tous prévoient une augmentation du cumul maximum des précipitations sur 5 jours. L'hiver et l'automne sont pour cet indicateur les saisons les plus impactées. En outre, le changement en hiver montre une claire croissance avec le degré de réchauffement. La figure 17 montre le changement en hiver pour les différents degrés de réchauffement planétaire.

Concernant le cumul maximum journalier, l'analyse des changements conduit à une conclusion en tout point similaire à celle relative au cumul maximum sur 5 jours.

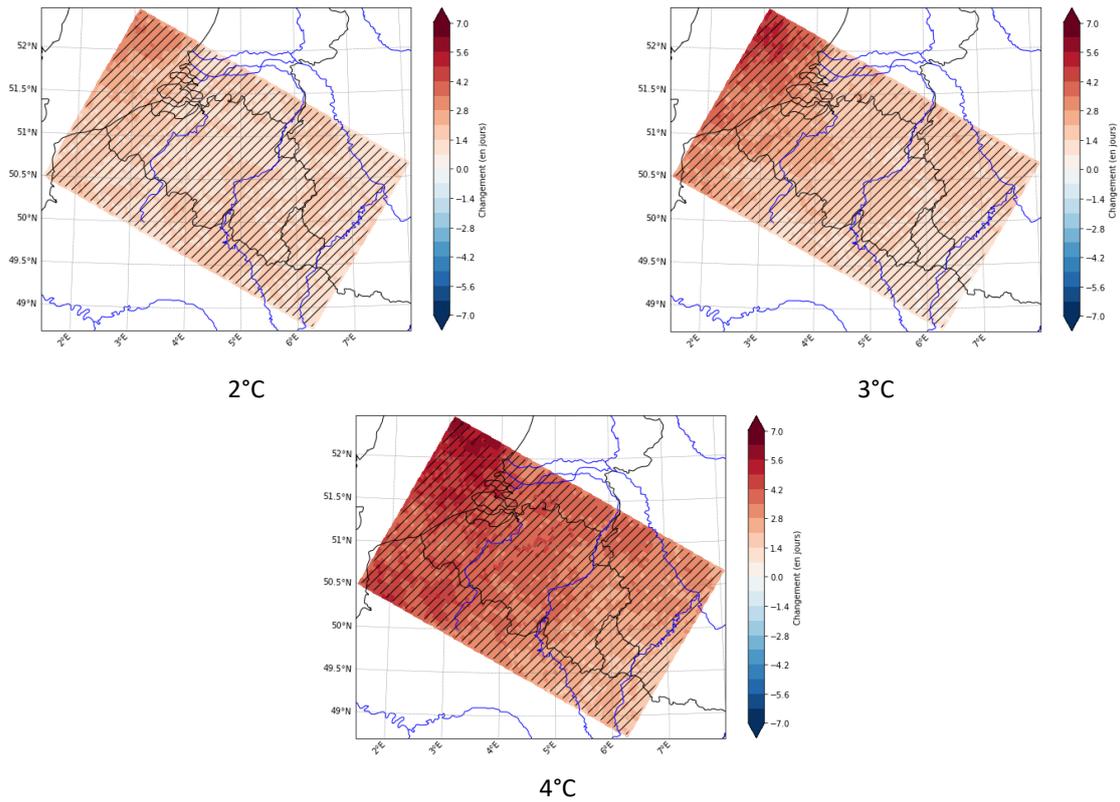


Figure 17 - Changement du nombre maximum de jours secs consécutifs en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

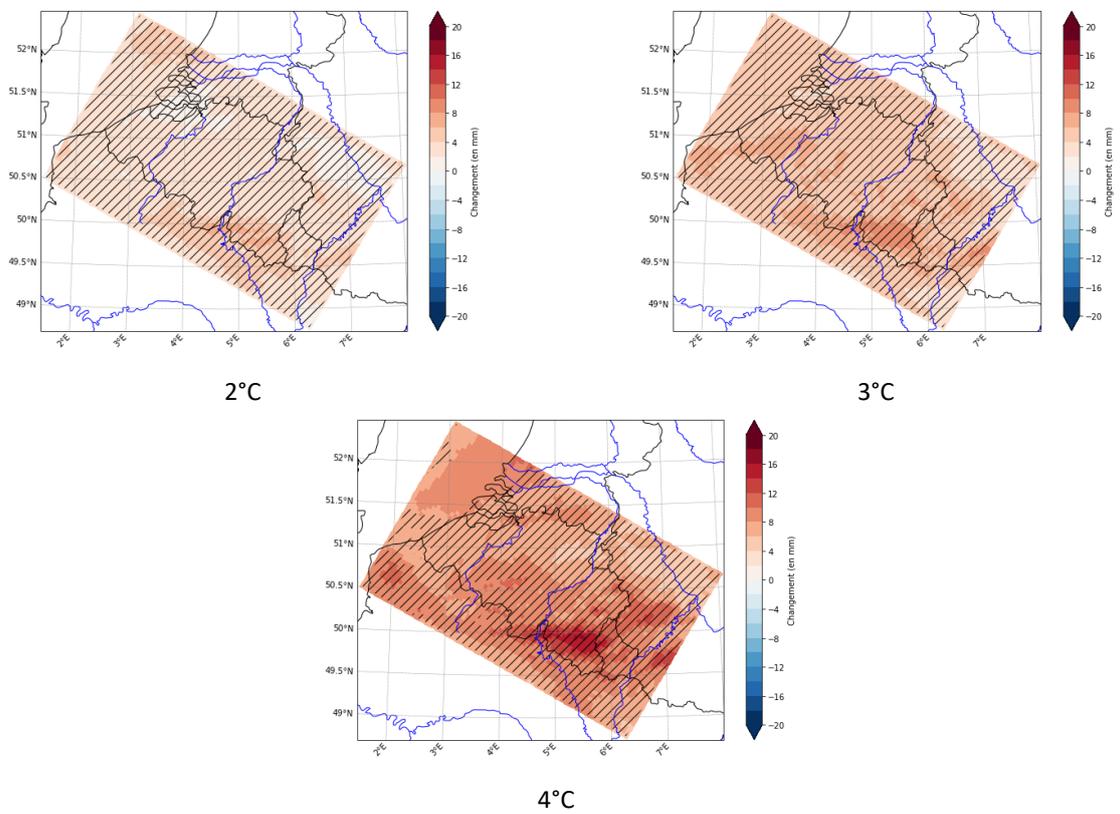


Figure 18 - Changement du cumul maximum sur 5 jours en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

		MAR-CMCC	MAR-EC3	MAR-MIR	MAR-MPI	MAR-NOR	MAR-IPSL
Max j secs	Hiver						
	Printemps						
	Été						
	Automne						
Max cumul 5j	Hiver						
	Printemps						
	Été						
	Automne						
Cumul max	Hiver						
	Printemps						
	Été						
	Automne						

Tableau 21 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour les indicateurs relatifs au nombre maximum de jours secs consécutifs, au cumul maximum sur 5 jours et au cumul maximum journalier dans un monde à +3°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent.

		MAR-CMCC	MAR-EC3	MAR-MIR	MAR-MPI	MAR-NOR	MAR-IPSL
Max j secs	Hiver						
	Printemps						
	Été						
	Automne						
Max cumul 5j	Hiver						
	Printemps						
	Été						
	Automne						
Cumul max	Hiver						
	Printemps						
	Été						
	Automne						

Tableau 22 - Tendances de chaque couple MAR-ESM pour les indicateurs relatifs au nombre maximum de jours secs consécutifs, au cumul maximum sur 5 jours et au cumul maximum journalier dans un monde à +4°C. Rouge/bleu : plus sec/humide par rapport à la période de référence 1981-2010. Case barrée : modèle biaisé sur le climat présent.

3.3.4. Autres indicateurs

A. Indicateurs relatifs au vent

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
Vitesse du vent à 10 mètres (en m/s)	Hiver	5,04 +/- 0,55	0,06 +/- 0,52	0,07 +/- 0,52	0,18 +/- 0,52
	Printemps	4,02 +/- 0,36	-0,03 +/- 0,29	-0,02 +/- 0,29	0,03 +/- 0,29
	Été	3,39 +/- 0,24	-0,08 +/- 0,16	-0,11 +/- 0,18	-0,18 +/- 0,19
	Automne	4,18 +/- 0,42	-0,05 +/- 0,35	-0,14 +/- 0,36	-0,14 +/- 0,37
Ecart type du vent à 10 mètres (en m/s)	Hiver	2 +/- 0,24	0,03 +/- 0,22	0,004 +/- 0,21	0,04 +/- 0,22
	Printemps	1,54 +/- 0,22	-0,01 +/- 0,18	-0,01 +/- 0,19	0,01 +/- 0,19
	Été	1,12 +/- 0,18	-0,07 +/- 0,12	-0,09 +/- 0,14	-0,15 +/- 0,12
	Automne	1,73 +/- 0,22	-0,01 +/- 0,21	-0,02 +/- 0,23	-0,01 +/- 0,24
Vitesse du vent à 10 mètres (en %)	Hiver		1,21 +/- 10,31	1,47 +/- 10,31	3,56 +/- 10,22
	Printemps		-0,71 +/- 7,30	-0,52 +/- 7,16	0,69 +/- 7,31
	Été		-2,31 +/- 4,82	-3,10 +/- 5,36	-5,20 +/- 5,58
	Automne		-1,27 +/- 8,49	-3,35 +/- 8,52	-3,27 +/- 8,89
Ecart type du vent à 10 mètres (en %)	Hiver		1,61 +/- 10,92	0,18 +/- 10,69	1,93 +/- 10,94
	Printemps		-0,53 +/- 12,03	-0,51 +/- 12,39	0,86 +/- 12,06
	Été		-6,47 +/- 11,11	-8,03 +/- 12,20	-13,38 +/- 11,11
	Automne		-0,77 +/- 12,07	-1,31 +/- 13,42	-0,72 +/- 13,82

Tableau 23 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs au vent (changement +/- écart-type). En rouge/bleu : augmentation/diminution par rapport à la période de référence. Case grisée : changement non significatif.

Le tableau 23 présente les changements absolus et les changements relatifs par rapport à la période de référence pour les indicateurs relatifs au vent. Tout comme pour les indicateurs relatifs aux précipitations, nous ne remarquons aucun changement significatif.

La vitesse du vent à 10 mètres d'hauteur augmentera légèrement en hiver. Cette augmentation s'accroît avec le degré de réchauffement, en particulier lorsqu'on passe de 3°C à 4°C de réchauffement. Parallèlement, l'écart type du vent à 10 mètres pour cette même saison augmentera très légèrement. Le vent sera donc en moyenne un peu plus fort en hiver mais également un peu plus variable. Le printemps est la saison pour laquelle le vent semble être le moins impacté par le changement climatique. Aussi bien pour la vitesse que pour l'écart type, les changements relatifs sont inférieurs à 1% en valeur absolue. En revanche, les changements sont plus importants en été où la vitesse du vent devrait décroître ainsi que sa variabilité. La figure 18 montre le changement absolu de la vitesse du vent en été en fonction des degrés de réchauffement. Ces diminutions croissent avec le degré de réchauffement. Nous observons d'ailleurs une diminution de plus de 13% pour l'écart type du vent dans le cas où nous atteindrions les 4 degrés de réchauffement global. La vitesse et l'écart type du vent devrait également diminuer en automne, mais les changements sont moins importants qu'en été. Enfin, à l'échelle annuelle, comme confirmé par le dernier rapport du GIEC se basant exclusivement sur des ESMs, la vitesse du vent devrait diminuer à nos latitudes et cela en relation avec la diminution du contraste thermique Pôles-Equateur. Tel un courant d'air entre l'intérieur et l'extérieur d'une maison, plus la différence de température entre les régions polaires et équatoriales est importante, plus le vent général sur terre sera fort. Or le pôle Nord se réchauffe 4 fois plus vite que l'équateur, ce qui fait diminuer le vent dominant.

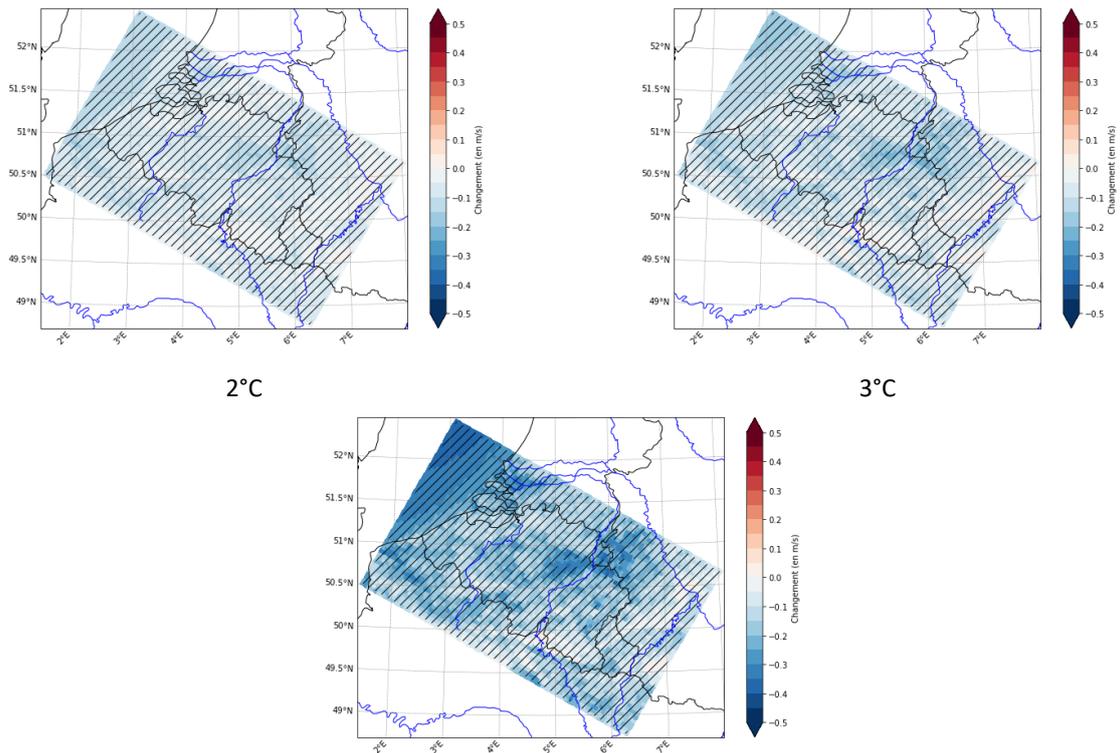


Figure 19 - Changement de la vitesse du vent en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

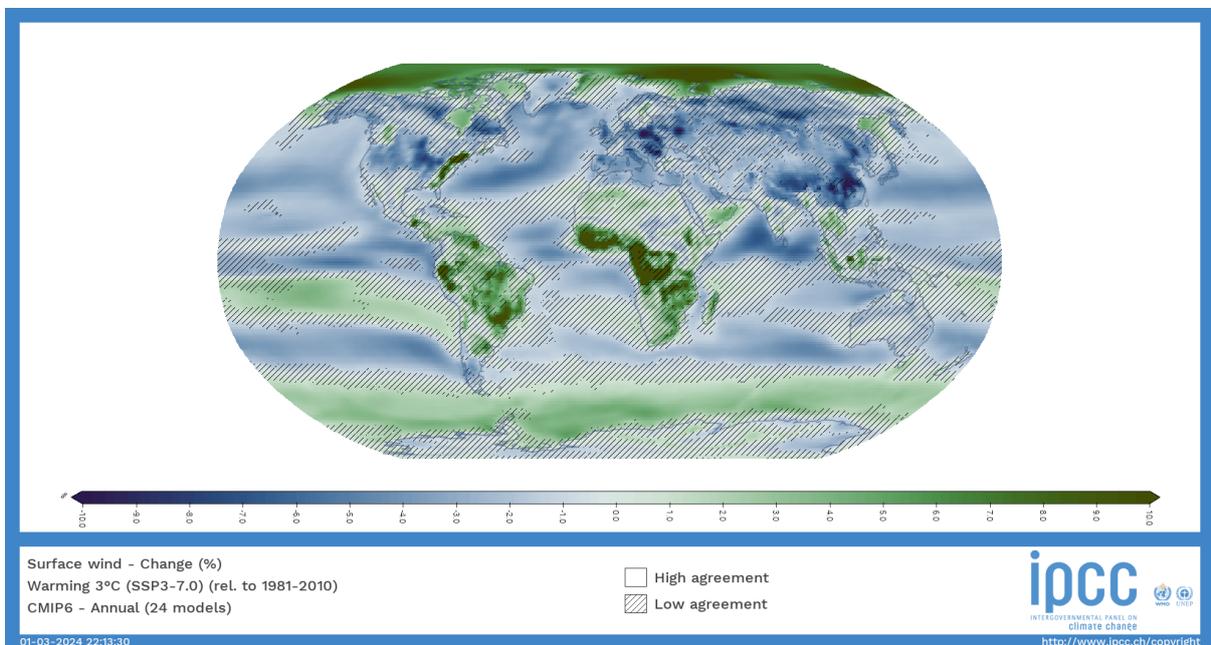


Figure 20 - Changements de la vitesse du vent en surface annuelle prévus par les ESMs utilisés dans le dernier rapport du GIEC.

B. Humidité spécifique

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
Humidité spécifique (changement absolu en g/kg)	Hiver	4,48 +/- 0,33	0,38 +/- 0,43	0,67 +/- 0,39	1,01 +/- 0,42
	Printemps	6,07 +/- 0,26	0,48 +/- 0,50	0,77 +/- 0,48	1,13 +/- 0,5
	Été	9,32 +/- 0,52	0,89 +/- 0,71	1,53 +/- 0,72	2,46 +/- 0,8
	Automne	7 +/- 0,32	0,57 +/- 0,5	1,02 +/- 0,52	1,61 +/- 0,55
Humidité spécifique (changement relatif en %)	Hiver		8,26 +/- 9,51	14,8 +/- 8,7	22,15 +/- 9,31
	Printemps		7,83 +/- 8,27	12,39 +/- 7,95	18,28 +/- 8,32
	Été		9,14 +/- 7,64	15,6 +/- 7,76	25,1 +/- 8,62
	Automne		8,03 +/- 7,21	14,33 +/- 7,47	22,76 +/- 7,87

Tableau 24 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour les indicateurs relatifs à l'humidité spécifique (changement +/- écart-type). En bleu : plus humide par rapport à la période de référence. Case grisée : changement non significatif.

Concernant l'humidité spécifique, la relation de Clausius-Clapeyron nous dit que la capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau augmente de 7% par degré Celsius. Les résultats obtenus dans le tableau 24 sont donc cohérents avec cette relation où nous constatons une augmentation de l'humidité spécifique de l'air. Comme nous l'avons vu dans la section 3.3.2.1, l'été est la saison qui se réchauffe (et s'assèche) le plus. Il est donc logique que le changement d'humidité spécifique soit le plus important en été. À l'inverse, le printemps, saison qui se réchauffe le moins, voit une évolution de l'humidité spécifique plus faible. En divisant le tableau 24 par les changements de la température moyenne présents dans le tableau 11, nous obtenons une augmentation de l'humidité spécifique comprise entre 5,5 et 7,5% par degré de réchauffement.

Les figures 20 et 21 montrent qu'au plus on s'éloigne de la côte, au plus l'augmentation de l'humidité spécifique est importante. Nous avons vu que les régions plus proches de la mer se réchauffent moins que les régions à l'intérieur des terres. Ce gradient nord-sud de l'humidité spécifique n'est donc qu'une conséquence du même gradient nord-sud que nous avons observé pour la température.

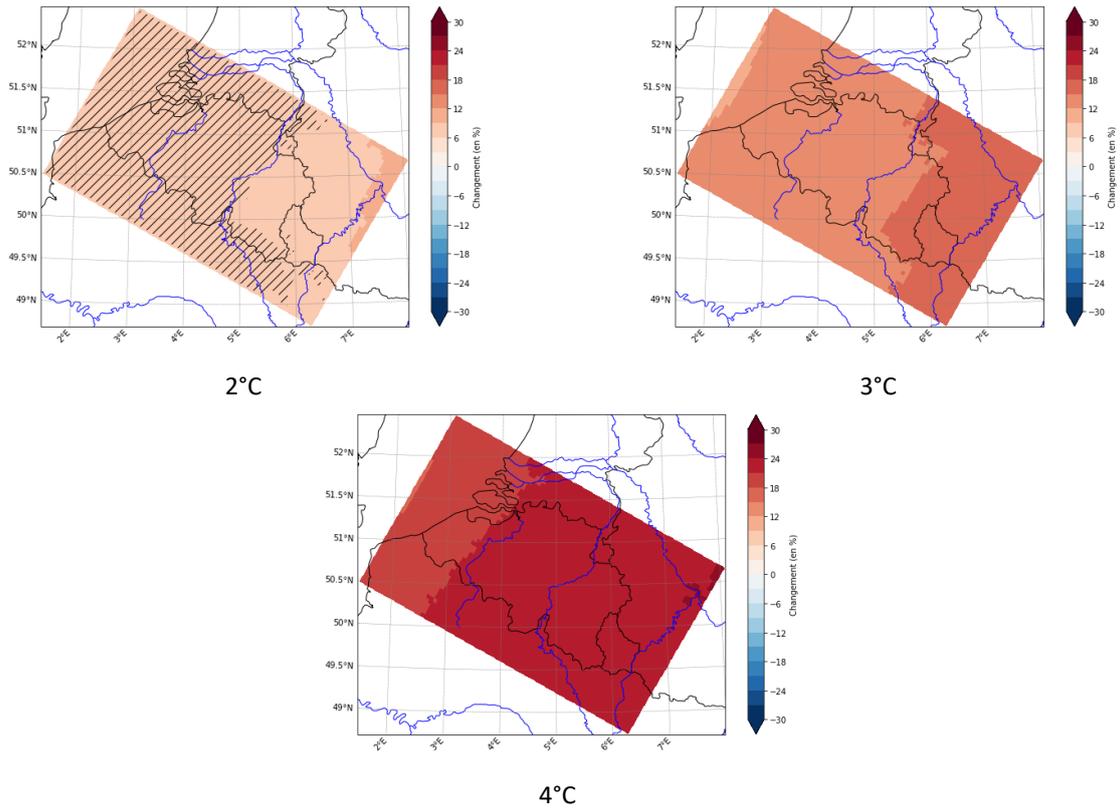


Figure 21 - Changement de l'humidité spécifique en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

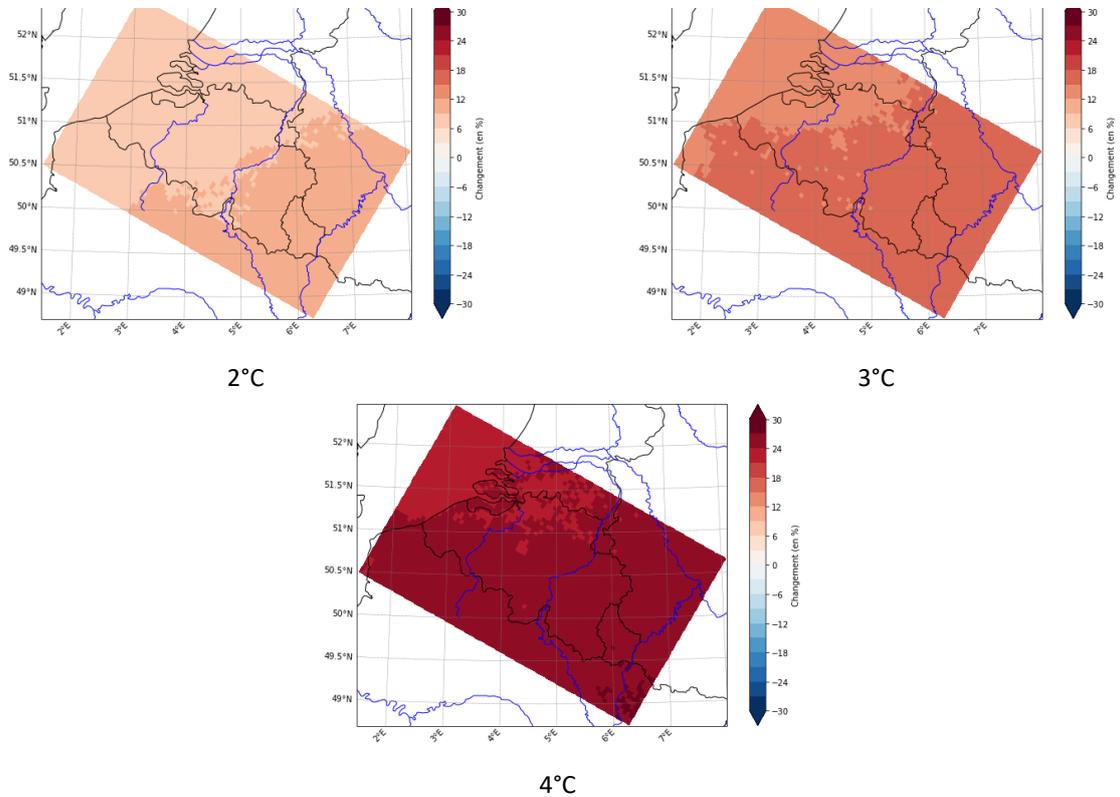


Figure 22 - Changement de l'humidité spécifique en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

C. Eclairement solaire à la surface

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
Eclairement solaire à la surface (changement absolu en W/m²)	Hiver	69663 +/- 10066	-1300 +/- 9228	-2830 +/- 9321	-5055 +/- 8877
	Printemps	320641 +/- 36950	-546 +/- 33435	2181 +/- 32431	5623 +/- 34977
	Été	484868 +/- 51038	19233 +/- 39863	27388 +/- 40329	48843 +/- 34706
	Automne	178117 +/- 20668	3675 +/- 21226	3247 +/- 20748	10614 +/- 20012
Eclairement solaire à la surface (changement relatif en %)	Hiver		-1,87 +/- 13,25	-4,06 +/- 13,38	-7,26 +/- 12,74
	Printemps		-0,17 +/- 10,43	0,68 +/- 10,11	1,75 +/- 10,91
	Été		3,97 +/- 8,22	5,65 +/- 8,32	10,07 +/- 7,16
	Automne		2,06 +/- 11,92	1,82 +/- 11,65	5,96 +/- 11,24

Tableau 25 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour l'éclairement solaire à la surface (changement +/- écart-type). En bleu : plus humide par rapport à la période de référence. Case grisée : changement non significatif.

Le tableau 25 montre les changements prévus par les modèles pour l'éclairement solaire à la surface. Cette variable présente une grande variabilité interannuelle durant la période de référence 1981-2010. Il n'est donc pas surprenant qu'aucun changement soit statistiquement significatif.

Le printemps est la saison la moins impactée où le changement relatif n'atteint pas les 2% dans un monde à +4°C. Le rayonnement solaire à la surface devrait légèrement augmenter en automne et ce pour tous les degrés de réchauffement. Dans un monde plus chaud de 4°C, une augmentation de 6% du rayonnement solaire est prévue en moyenne par les différents modèles durant cette même saison.

En hiver, l'éclairement solaire devrait diminuer dans tous les cas. Néanmoins, cette diminution est d'autant plus importante si le réchauffement planétaire s'accroît. Dans la section 3.3.3, nous avons vu que tous les changements des indicateurs relatifs aux précipitations vont dans le sens d'hiver plus pluvieux. Cela sous-entend une augmentation de la couverture nuageuse qui s'exprime clairement ici en réduisant la quantité d'énergie solaire reçue à la surface.

A l'inverse, les modèles prévoient des étés moins pluvieux, donc avec une couverture nuage moindre. En conséquence, le rayonnement solaire augmente. Cette saison est d'ailleurs la plus impactée. Dans un monde à +3°C et +4°C, la surface devrait recevoir 5,65% et 10,07% d'énergie solaire en plus respectivement, ce qui explique l'emballement de la hausse des températures en été par rapport aux autres saisons.

Les figures 22 et 23 montrent les changements durant l'hiver et l'été respectivement. Dans le sud et sud-est de la Wallonie, on constate des changements localement significatifs en été dans un monde à +4°C.

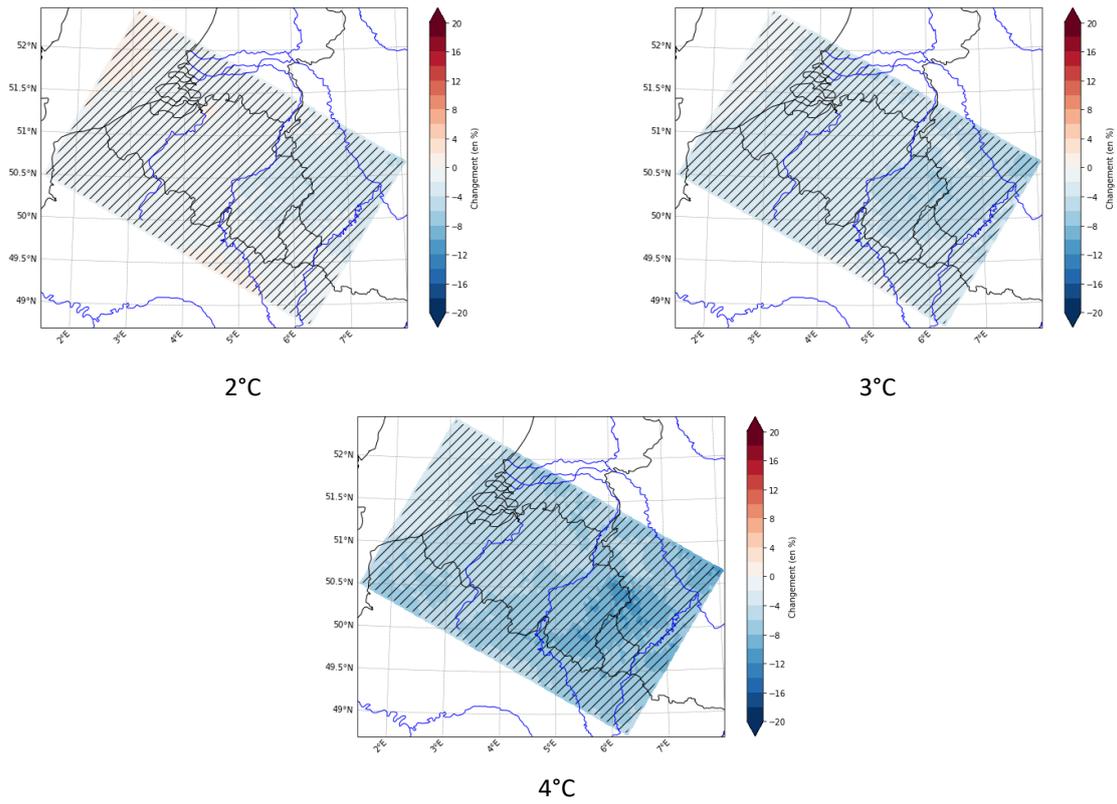


Figure 23 - Changement de l'éclairement solaire à la surface en hiver en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

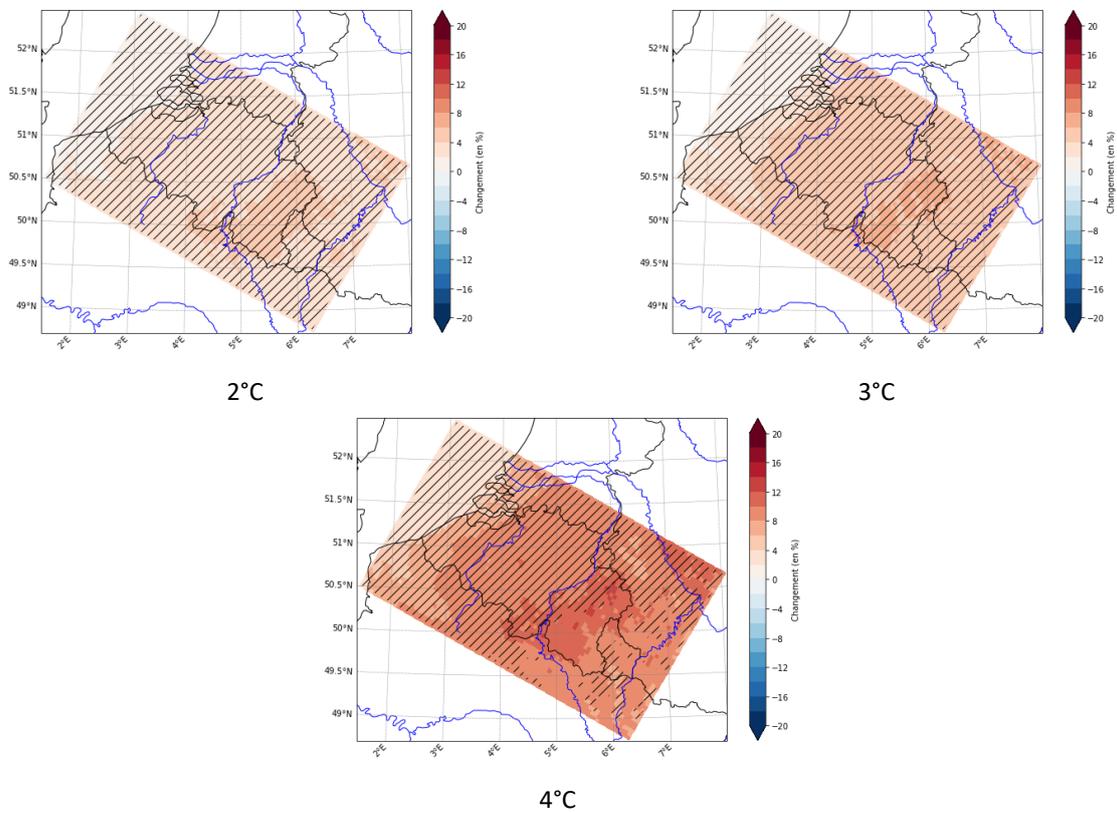


Figure 24 - Changement de l'éclairement solaire à la surface en été en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

D. Evapotranspiration de référence

		1981-2010	+2°C	+3°C	+4°C
Evapotranspiration potentielle (en mm/j)	Janvier	0,06 +/- 0,05	0 +/- 0,05	0 +/- 0,05	0,01 +/- 0,06
	Février	0,23 +/- 0,07	0,01 +/- 0,08	0 +/- 0,07	0,01 +/- 0,08
	Mars	0,65 +/- 0,17	0,04 +/- 0,19	0,06 +/- 0,19	0,06 +/- 0,20
	Avril	1,40 +/- 0,36	0,07 +/- 0,39	0,10 +/- 0,36	0,19 +/- 0,39
	Mai	2,21 +/- 0,52	0,11 +/- 0,52	0,26 +/- 0,52	0,46 +/- 0,60
	Juin	2,93 +/- 0,62	0,29 +/- 0,66	0,43 +/- 0,69	0,89 +/- 0,64
	Juillet	3,35 +/- 0,72	0,33 +/- 0,60	0,52 +/- 0,59	0,88 +/- 0,60
	Août	2,70 +/- 0,51	0,32 +/- 0,47	0,57 +/- 0,51	0,84 +/- 0,46
	Septembre	1,57 +/- 0,36	0,19 +/- 0,44	0,24 +/- 0,43	0,48 +/- 0,39
	Octobre	0,53 +/- 0,15	0,07 +/- 0,17	0,09 +/- 0,17	0,19 +/- 0,24
	Novembre	0,10 +/- 0,06	0,01 +/- 0,06	0,02 +/- 0,06	0,03 +/- 0,07
	Décembre	0,03 +/- 0,05	0 +/- 0,05	0,00 +/- 0,10	-0,01 +/- 0,05

Tableau 26 - Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement pour l'évapotranspiration de référence (changement +/- écart-type). En bleu/rouge : augmentation/diminution par rapport à la période de référence. Case grisée : changement non significatif.

Le tableau 26 présente les résultats pour l'évapotranspiration de référence. Nous constatons que cette dernière augmente pour pratiquement tous les mois et pour les trois degrés de réchauffement. L'évapotranspiration atteint ses valeurs minimales en hiver et ses valeurs maximales en été. Cela explique pourquoi les changements absolus sont bien plus importants en été qu'en hiver.

Dans un monde à +2°C, aucun changement n'est significatif. A l'inverse, dans un monde à +4°C, les trois mois de l'été et les deux premiers de l'automne présentent des changements significatifs. Ces changements moyens valent presque 1 mm/jour en été.

Les figures 24 et 25 montrent le changement pour l'évapotranspiration de référence en juillet et en août. On y voit qu'en juillet, dans un monde plus chaud de 3°C, aucun point de grille ne présente un changement significatif. Tout comme nous l'avons constaté pour la température et l'humidité spécifique, un certain gradient nord-sud est visible. Les provinces de Liège et de Luxembourg devraient être les plus impactées.

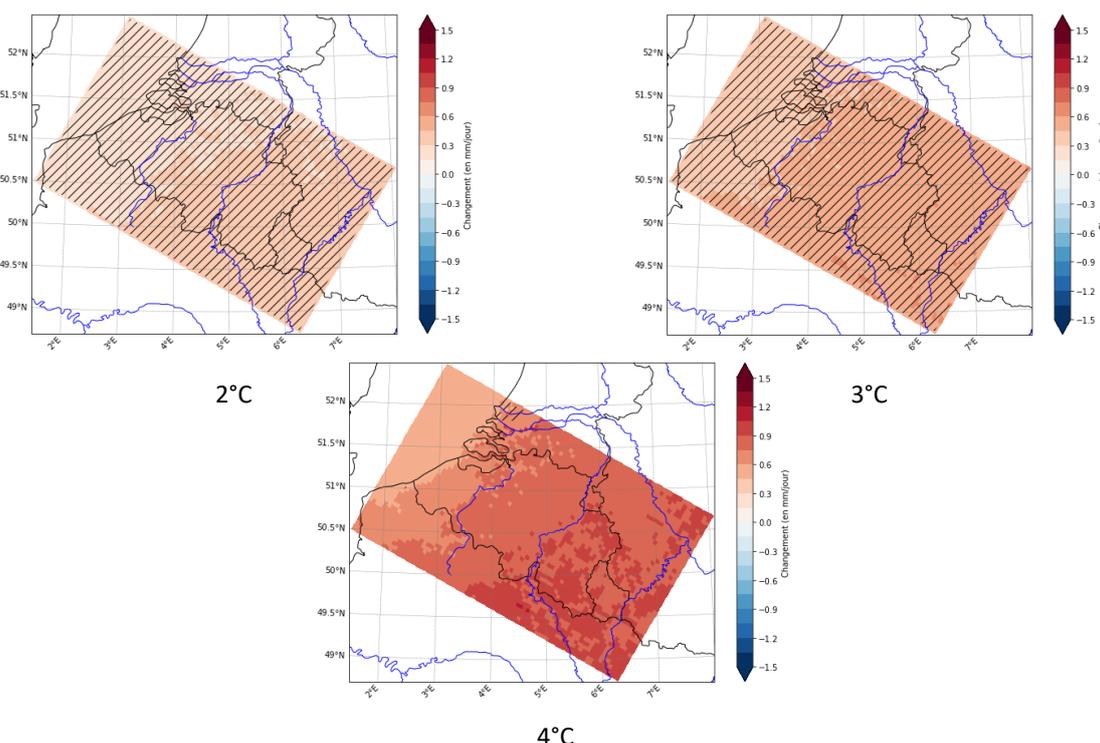


Figure 25 - Changement de l'évapotranspiration de référence en juillet en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

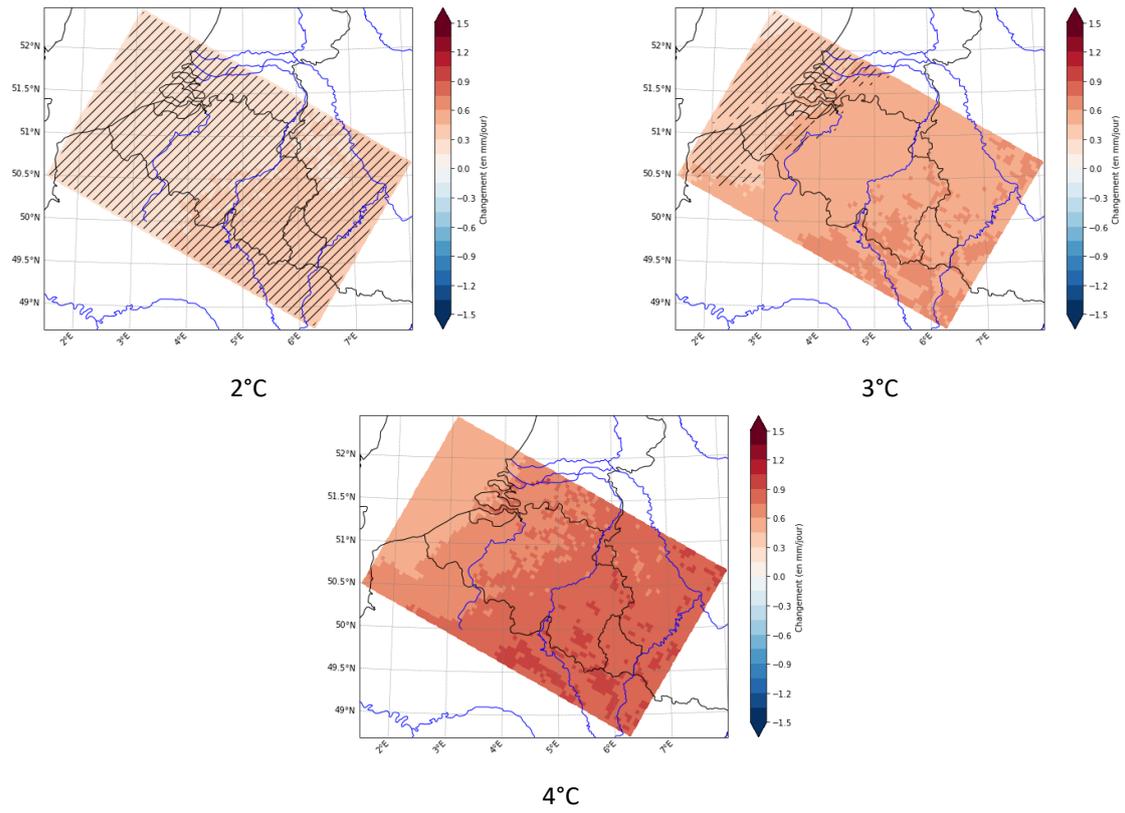


Figure 26 - Changement de l'évapotranspiration de référence en août en fonction des degrés de réchauffement. Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

4. Conclusion

Dans un premier temps, nous avons montré dans ce rapport que le modèle MAR forcé par les réanalyses ERA5 était très performant pour représenter le climat présent. La validation du modèle faite à partir des données de l'IRM a juste mis en évidence des biais localement significatifs pour la température minimale en été.

Dans un deuxième temps, en étudiant les biais des couples MAR-ESM sur le climat présent en les comparant avec MAR-ERA, nous n'avons relevé que très peu de biais significatifs pour les indicateurs relatifs aux températures et précipitations. En revanche, un plus grand nombre de biais ont été constatés pour les indicateurs relatifs au vent, à l'éclairement solaire à la surface et pour l'évapotranspiration de référence. En outre, les modèles sous-estiment souvent l'humidité spécifique en été. Néanmoins, rien ne prouve qu'un modèle biaisé sur le climat présent est moins efficace que les autres pour estimer les changements. La plupart du temps, les projections futures d'un modèle biaisé ne vont pas à contre-courant des autres modèles. Par ailleurs, il est tout à fait possible qu'un modèle non biaisé sur le climat présent se démarque de la moyenne des autres modèles dans le futur.

Dans un troisième temps, nous avons étudié les changements des différents indicateurs par degré de réchauffement. Les changements des indicateurs relatifs à la température sont toujours significatifs, sauf pour le nombre de jours de gel où le changement n'est significatif que si le réchauffement global vaut au minimum 3°C. Néanmoins, un réchauffement global de 2°C est suffisant pour provoquer plusieurs changements significatifs. L'été est la saison qui va se réchauffer le plus car les étés vont devenir plus secs et ensoleillés ce qui va emballer la hausse des températures. Le nombre de jours d'été, de vagues de chaleur, de jours en vigilance canicule va significativement augmenter qu'importe le degré de réchauffement. Pour le nombre de jours de gel annuel et la durée de la période de croissance végétative, un réchauffement de 3°C est nécessaire pour avoir des changements significatifs. Enfin, seul un réchauffement global de 4°C permet une diminution statistiquement significative du nombre de jours de gel en mars.

L'humidité spécifique de l'air, très dépendante à la température, augmente de manière significative pour toutes les saisons et degrés de réchauffement. En moyenne, si la température moyenne journalière augmente de 1°C, l'humidité spécifique augmente de 5,5 à 7,5 %.

Les changements des indicateurs relatifs aux précipitations ne sont jamais significatifs en moyenne sur la Wallonie. Néanmoins, nous avons pu identifier certains changements localement significatifs lorsque le réchauffement global vaut 4°C. Bien que ces changements ne soient pas significatifs, les hivers devraient être plus pluvieux. A l'inverse, les étés devraient être plus secs. Le printemps et l'automne sont souvent moins impactés. Nous avons également remarqué que dans certains cas, les différents modèles se contredisent. Cela témoigne de la grande incertitude liée aux précipitations même si en moyenne, nos projections sont en accord avec la moyenne d'ensemble présentée dans le dernier rapport du GIEC (à savoir pas de changement significatif à l'échelle annuelle mais une diminution des précipitations en été).

L'impact du réchauffement climatique sur le vent à 10m sera relativement limité bien qu'on va vers une diminution du vent. Aucun changement significatif n'a été mis en évidence. Néanmoins, l'été sera la saison la plus impactée par une diminution de la vitesse du vent ainsi que sa variabilité interannuelle. La vitesse du vent sera donc plus faible, en particulier si nous atteignons les 4°C de réchauffement. Les changements, bien que moins importants, sont similaires pour l'automne à ceux de l'été. En hiver,

l'inverse se produit dans une moindre mesure avec une légère augmentation de la vitesse de vent. Enfin, le vent durant le printemps devrait être relativement épargné par le changement climatique.

L'éclairement solaire à la surface ne subira pas de changements significatifs même dans un monde à +4°C sauf localement en été où il fera plus ensoleillé. A l'inverse, il diminue pendant l'hiver et ne varie que très peu pendant le printemps. Des changements localement significatifs ont été mis en évidence dans le sud de la Belgique durant l'été si la planète se réchauffe de 4°C.

Enfin, l'évapotranspiration augmente pour presque tous les mois, et ce quel que soit le degré de réchauffement. Les changements les plus importants sont durant l'été et ceux-ci deviennent significatifs pour plusieurs mois à partir du moment où nous vivons dans un monde plus chaud de 4°C.

5. Référence

5.1. Références générales

[1] Wyard, C., Scholzen, C., Fettweis, X., Van Campenhout, J. and François, L. (2017), Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959–2010 using the regional climate model MAR. *Int. J. Climatol.*, 37: 2782-2796. <https://doi.org/10.1002/joc.4879>

[2] Doutreloup S, Wyard C, Amory C, Kittel C, Ericum M, Fettweis X. Sensitivity to Convective Schemes on Precipitation Simulated by the Regional Climate Model MAR over Belgium (1987–2017). *Atmosphere*. 2019; 10(1):34. <https://doi.org/10.3390/atmos10010034>

[3] 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>

[4] 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 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

[5] Les scénarios SSP | Carbone 4. (s. d.). <https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>

[6] <https://zenodo.org/records/7673400>

[7] IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

5.2. Références ESM

Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., Bekki, S., Bonnet, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Chéruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., D'Andrea, F., . . . Vuichard, N. (2020). Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. *Journal Of Advances In Modeling Earth Systems*, 12(7). <https://doi.org/10.1029/2019ms002010>

Cherchi, A., Fogli, P. G., Lovato, T., Peano, D., Iovino, D., Gualdi, S., Masina, S., Scoccimarro, E., Materia, S., Bellucci, A., & Navarra, A. (2019). Global mean climate and main patterns of variability in the CMCC-CM2 coupled model. *Journal Of Advances In Modeling Earth Systems*, 11(1), 185-209. <https://doi.org/10.1029/2018ms001369>

Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arsouze, T., Bergman, T., Bernardello, R., Boussetta, S., Caron, L., Carver, G. D., Castrillo, M., Catalano, F., Cvijanović, I., Davini, P., Dekker, E., Doblas-Reyes, F. J., Docquier, D., Echevarría, P., Fladrich, U., . . . Zhang, Q. (2022). The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geoscientific Model Development*, 15(7), 2973-3020. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>

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>

Seland, Ø., Bentsen, M., Seland Graff, L., Olivié, 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 theCMIP6 DECK and historical simulations [Preprint]. *Climate and Earth System Modeling*. <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-378>

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>



Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable asbl

Boulevard Frère Orban 4
B-5000 NAMUR
00 32 81 25 04 80
www.icedd.be
icedd@icedd.be

N° registre de commerce : sans objet
N° TVA : BE0407.573.214
Représenté par : Gauthier Keutgen, Secrétaire Général
N° de compte bancaire : BE59 5230 4208 3426 / BIC TRIOBEBB