

Mémoire

Auteur : Cariat, Denis

Promoteur(s) : Doutreloup, Sébastien; Ghilain, Nicolas

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21511>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté des sciences
Département de géographie

Charleroi Métropole face au réchauffement climatique

Modélisation des changements climatiques d'un micro-territoire
à l'aide du modèle MAR

Mémoire présenté par : **Denis CARIAT**
pour l'obtention du titre de
Master en sciences géographiques,
orientation Global Change,
à finalité approfondie

Année académique : 2023-2024
Date de défense : septembre 2024

Membres du jury :
Promoteur : Sébastien DOUTRELOUP
Co-promoteur : Nicolas GHILAIN
Lecteur : Xavier FETTWEIS
Lecteur : François JONARD

REMERCIEMENTS

Depuis mes études d'ingénieur de gestion (2013), j'ai toujours eu cette impression indescriptible que les modèles économiques et financiers, souvent bien trop simplistes, n'étaient pas suffisants pour appréhender la complexité socio-économique et environnementale. Après 11 ans d'expérience professionnelle, 4 ans dans le privé et 7 ans dans la sphère publique à la mise en place de politiques de développement économique, je ne me reconvertis pas vers la géographie, j'aborde enfin les enjeux socio-économiques et environnementaux dans leur globalité. En étudiant le changement climatique ces dernières années, je peux enfin mettre des mots sur cette impression. Qu'on le veuille ou non, notre monde est rempli de limites physiques, chimiques et biologiques qu'aucune loi ou réglementation ne pourra dévier. Aux côtés de la littérature qui s'empile sur le sujet, j'espère que la présente étude sur Charleroi Métropole contribuera localement à une prise de conscience et au passage à l'action rapide pour l'adaptation de nos territoires aux changements climatiques. Comme l'explique Valérie Masson-Delmotte (2024), un de mes objectifs est désormais « *de produire de nouvelles connaissances, mais aussi de jouer un rôle de passeuse de connaissances pour stimuler leur appropriation largement dans la société* ».

Comment ne pas remercier ma famille, mes parents Maria et Alain, et mon frère Nicolas pour leur soutien inconditionnel dans toutes mes initiatives. Ces quelques mots ne suffisent pas.

Merci à mes ami.e.s et famille que je ne vois plus assez. Ce master m'a pris beaucoup de temps et du temps libéré vous reviendra. Merci à Sébastien et Nicolas (promoteur et co-promoteur) pour leurs conseils avec un travailleur/étudiant occupé. Merci à François Gemenne qui, pendant la pandémie de 2021, a pris le temps de répondre à mon « email à la mer » à la recherche de formations sur le dérèglement climatique. Sans cette réponse, ma trajectoire aurait été bien différente. Merci à toutes ces personnes actives sur les enjeux climatiques et sociaux, principalement dans les réseaux *Shifters Belgium* et la *Fresque du Climat*, qui sont une source de motivation et d'admiration inépuisable. Merci à Alice, Anne, Delphine, Mélanie, Nicolas, Alain et Maria pour leur relecture partielle ou globale.

Même s'ils n'en sont pas encore conscients, je dédie ce mémoire à mes filleul.e.s Paul et Salomé. Je leur souhaite de pouvoir garder leur insouciance dans ce monde au climat qui change beaucoup trop vite, qu'ils auront la sagesse de pardonner les générations précédentes et que la leur sera porteuse de changements positifs et de renouveau.

J'ai également une pensée pour Paul Furlan, ancien président de Charleroi Métropole, qui nous a quitté beaucoup trop tôt et qui portait le développement de Charleroi Métropole dans son cœur.

RÉSUMÉ

Alors que les mesures d'atténuation annoncées par les États nous dirigent actuellement vers un réchauffement global évalué à +3°C d'ici la fin du siècle, les changements climatiques induits et leurs impacts à l'échelle locale sont aujourd'hui encore trop peu compris et analysés. Répondre à ce besoin est indispensable pour la mise en place de mesures d'adaptation pertinentes et efficaces pour les populations, les entreprises et les infrastructures d'un territoire donné. C'est un des objectifs que s'est donné le Centre Climat belge et les organisations partenaires à travers les futurs résultats de l'initiative CORDEX.be Il actuellement en cours. Dans ce contexte, le présent mémoire constitue un exemple de service climatique pour les territoires, qui pourrait être généralisé et affiné à l'avenir. Avec le territoire de Charleroi Métropole (Belgique) comme zone d'expérimentation, des simulations climatiques à haute résolution (5 km) ont été réalisées à l'aide du modèle régional MAR v3.14 développé par l'Université de Liège (Belgique), et forcé par cinq modèles climatiques globaux (ESM). L'analyse de 53 variables climatiques annuelles et saisonnières liées aux températures et aux précipitations montre une tendance au réchauffement statistiquement significative pour toutes les variables de température, tandis que les précipitations présentent des tendances généralement non significatives, à la hausse ou à la baisse selon les saisons. Ces résultats confirment l'importance du développement de services climatiques à l'échelle locale pour l'adaptation des territoires.

Mots-clés : réchauffement climatique, changements climatiques, modélisation climatique régionale, MAR, températures, précipitations, adaptation, service climatique, Charleroi Métropole, résilience

ABSTRACT

As current mitigation measures announced by states are leading us towards a projected global warming of +3°C by the end of the century, the induced climate changes and their impacts at the local scale remain poorly understood and insufficiently analyzed. Addressing this need is crucial for implementing relevant and effective adaptation measures for populations, businesses, and infrastructure in a given territory. This is one of the objectives set by the Belgian Climate Center and its partner organizations through the ongoing CORDEX.be II initiative. In this context, this thesis serves as an example of a climate service for territories, which could be generalized and refined in the future. With Charleroi Metropole (Belgium) serving as the experimental area, high-resolution climate simulations (5 km) were performed using the regional MAR v3.14 model developed by the University of Liège (Belgium), forced by five global climate models (ESM). The analysis of 53 annual and seasonal climate variables related to temperature and precipitation shows a statistically significant warming trend for all temperature variables, while precipitation trends are generally non-significant, either increasing or decreasing depending on the season. These results highlight the importance of localized climate services for territorial adaptation.

Keywords: global warming, climate change, regional climate modeling, MAR, temperatures, precipitation, adaptation, climate service, Charleroi Metropole, resilience

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	16
1. MODÉLISATIONS CLIMATIQUES : ÉTATS DES LIEUX	22
1.1. Modélisation à l'échelle globale.....	22
1.2. Modélisation à l'échelle régionale	24
1.3. Pertinence des modélisations.....	26
1.4. Initiatives à l'échelle nationale et régionale	30
1.4.1. CORDEX.be	30
1.4.2. Le Centre Climat	32
1.4.3. CORDEX.be II	33
1.4.4. Étude de vulnérabilités et d'adaptation en Région wallonne	34
1.5. Domaine de l'attribution	35
1.6. Réchauffement actuel et projections climatiques à différentes échelles	37
1.6.1. Niveaux de réchauffement actuels à différentes échelles	38
1.6.2. Projections pour les températures et précipitations à différentes échelles	39
2. MÉTHODOLOGIE	43
2.1. Modèle MAR et validation.....	43
2.2. Sélection des ESM et validation des couples MAR-ESM	47
2.3. Choix des scénarii et des niveaux de réchauffement.....	50
2.3.1. Scénarii et niveaux de réchauffement : explications.....	50
2.3.2. Scénarii et niveaux de réchauffement : sélection	54
2.4. Période de référence et période d'étude	56
2.5. Choix et description de la zone d'étude	57
2.5.1. Description de Charleroi Métropole.....	57
2.5.2. Caractéristiques du territoire et définition des sous-zones d'étude	60
2.6. Variables et indices analysés.....	64
2.6.1. Extraction des variables d'intérêt	64
2.6.2. Sélection des variables d'intérêt	65
2.6.3. Tableau des indicateurs et indices analysés	66
2.6.4. Traitement des données et hypothèses	69
2.6.5. Zoom sur les indices de chaleur	72
2.7. Méthodologie : tableau récapitulatif	76
3. RÉSULTATS et DISCUSSIONS.....	78

3.1.	Comment lire les analyses du catalogue de variables ?	79
3.2.	Indicateurs et indices liés à la température	81
3.2.1.	Températures moyennes, maximales et minimales.....	81
3.2.2.	Jours d'été et jours de gel	83
3.2.3.	Jours de vigilance canicule et vagues de chaleur de 5, 7, 10 et 15 jours.....	84
3.2.4.	Indices d'inconfort thermique	86
3.3.	Indicateurs et indices liés aux précipitations	88
3.3.1.	Cumul de précipitations annuel et saisonnier	89
3.3.2.	Jours de précipitations, fortes précipitations et très fortes précipitations	91
3.3.3.	Cumul maximal sur 1 jour et sur 5 jours.....	93
3.3.4.	Maximum de jours secs consécutifs	94
3.4.	Limites de l'étude	95
4.	<i>RISQUES ET IMPACTS : vers l'adaptation</i>	97
4.1.	Risques et impacts pour le territoire de Charleroi Métropole.....	97
4.2.	Zoom sur l'impact des vagues de chaleur	100
5.	<i>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS : vers la résilience du territoire</i> ..	103
6.	<i>ANNEXES</i>	106
	Annexe 1 – Échelles de modélisation climatique sur la Belgique	106
	Annexe 2 – Validation de MAR-ERA par rapport aux observations sur la Wallonie	106
	Annexe 3 – Validation des MAR-ESM vs MAR-ERA sur la Wallonie (températures).....	107
	Annexe 4 – Validation des MAR-ESM vs MAR-ERA sur la Wallonie (précipitations)....	108
	Annexe 5 – Humidex : tableau des valeurs et échelle d'inconfort thermique	109
	Annexe 6 – Heat Index : tableau des valeurs et échelle d'inconfort thermique	110
	Annexe 7 – Wet Bulb Temperature : graphique des valeurs humidité vs température	111
	Annexe 8 – Population (2021) par commune de Charleroi Métropole	112
	Annexe 9 – Carte des communes de Charleroi Métropole	113
7.	<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	114
7.1.	Littérature scientifique	114
7.2.	Ressources clés non publiées.....	117
7.3.	Autres ressources	117
8.	<i>CATALOGUE DES VARIABLES</i>	122

Analyse de l'évolution de la température moyenne annuelle.....	125
Analyse de l'évolution de la température moyenne en été.....	126
Analyse de l'évolution de la température moyenne en hiver	127
Analyse de l'évolution de la température moyenne au printemps.....	128
Analyse de l'évolution de la température moyenne en automne	129
Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne en été.....	130
Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne en hiver	131
Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne au printemps.....	132
Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne en automne	133
Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne en été	134
Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne en hiver	135
Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne au printemps.....	136
Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne en automne.....	137
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours de gel	138
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours d'été	139
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours de vigilance canicule	140
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 5 jours.....	141
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 7 jours.....	142
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 10 jours.....	143
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 15 jours.....	144
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours où l'Humidex ≥ 30	145
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours où l'Humidex ≥ 40	146
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours où le Heat Index ≥ 27	147
Analyse de l'évolution où le Wet Bulb Temperature ≥ 19	148
Analyse de l'évolution du cumul annuel de précipitations.....	149
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations en été.....	150
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations en hiver	151
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations au printemps.....	152
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations en automne	153

Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations en été	154
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations en hiver	155
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations au printemps	156
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations en automne.....	157
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations en été.....	158
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations en hiver	159
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations au printemps.....	160
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations en automne	161
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations en été	162
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations en hiver	163
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations au printemps	164
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations en automne.....	165
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier en été.....	166
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier en hiver	167
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier au printemps.....	168
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier en automne	169
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours en été.....	170
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours en hiver	171
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours au printemps.....	172
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours en automne	173
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs en été.....	174
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs en hiver	175
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs au printemps.....	176
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs en automne	177

LISTE DES FIGURES

Figure 1 (IPCC, 2021, FAQ 4.3) - Les changements régionaux des températures (gauche) et des précipitations (droite) ne sont pas uniformes et s'amplifient avec le réchauffement global	17
Figure 2 (IRM, 2020) – Les normales des températures moyennes annuelles en Belgique montrent des disparités importantes entre le Nord et le Sud du pays.	18
Figure 3 (IRM, s.d. b) – Représentation des principales échelles de modélisations climatiques et l'ordre de grandeur de leur résolution géographique respective	22
Figure 4 (Hayhoe, 2017) – Ligne du temps des modélisations climatiques et intégration progressive des composantes climatiques.....	23
Figure 5 (IPCC, 2014, figure 1.14) – Illustration de la topographie européenne à une résolution de (haut) 87,5 x 87,5 km et (bas) de 30,0 x 30,0 km.....	25
Figure 6 (IPCC, 2021, figure 10.3) – Diagramme décrivant les composantes climatiques et leur résolution spatiale et temporelle, intégrées dans les modélisations.	25
Figure 7 (IPCC, 2007, FAQ 8.1) – Évolution de la température mondiale au cours du siècle dernier vs projections climatiques. Observations (en noir), les simulations obtenues à partir de 58 simulations produites par 14 modèles climatiques différents (en jaune), la moyenne des simulations (en rouge). Les anomalies de température sont présentées par rapport à la moyenne 1901-1950. Les lignes grises indiquent des éruptions volcaniques majeures.	27
Figure 8 (IPCC, 2021) – Corrélations entre 3 générations de modélisations (CMIP3,5 et 6) et les observations pour 3 variables : la température de l'air, les précipitations et la pression au niveau des mers et océans.....	28
Figure 9 (Carbon Brief, 2019) - Réchauffement CMIP5 et CMIP6 entre 1880-1900 et 2090-2100 pour les scénarii RCP et SSP. La fourchette reflète le réchauffement le plus faible et le plus élevé parmi les modèles pour chaque scénario, tandis que les points marqués indiquent la moyenne multi-modèles (Wagner, 2024)	28
Figure 10 (Fettweis, 2024) – Deux phénomènes météorologiques différents touchent l'Europe de l'Ouest et la Belgique : un anticyclone bloqué sur l'Europe en 2023 (à gauche) vs une dépression bloquée sur l'Europe en 2024 (à droite) à la même période (12 mai – 12 juin), à cause du ralentissement de la dynamique atmosphérique.....	30
Figure 11 (IRM, 2020) – Piliers pour le développement et la fourniture de services climatiques tels que décrits par L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).	31
Figure 12 (Termonia et al., 2018) – Schéma de synthèse de l'initiative CORDEX.be et de ses objectifs (Targets).....	32
Figure 13 (Centre Climat, s.d.) – Schéma des interactions entre les différentes parties prenantes.	33
Figure 14 (Carbon Brief, 2022) – Carte interactive des 504 événements extrêmes qui ont fait l'objet d'une étude d'attribution.....	36
Figure 15 (C3S, 2024) – Record de température globale journalière mesuré le 27/7/2024.....	37

Figure 16 (C3S, 2023) – Anomalies moyennes de température de l'air en 2023 en Europe (°C) par rapport à 1850-1900.	38
Figure 17 (IRM, 2020, figure 1.26) – Changements observés (en °C par décennie) dans les températures annuelles moyennes maximales (gauche) et minimales (droite) sur la période 1954-2019, d'après les tendances linéaires.	39
Figure 18 (IPCC, 2021, Fact Sheet Europe) – Découpage régional pour les modélisations régionales et l'élaboration des facts sheets. Découpage à l'échelle du monde (gauche) et de l'Europe (droite).	40
Figure 19 (IPCC, 2021, Fact Sheet Europe) – Évolution des températures (gauche) et des précipitations (droite) pour l'hiver (DJF) et l'été (JJA), par rapport à la période 1995-2014.	41
Figure 20 (Van Schaeybroeck et al., 2021) – Évolution des températures moyennes en Belgique, en 2085 et en été pour un scénario de réchauffement moyen (centre) et élevé (droite).	41
Figure 21 (Fettweis et al., 2023) – Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement global pour les indicateurs relatifs aux vagues de chaleur et au nombre de jours de vigilance canicule (changement +/- écart-type). En rouge, plus chaud que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.	42
Figure 22 (Doutreloup, 2022) - Fonctionnement du modèle MAR. Le modèle MAR (cadre noir) doit être forcé par des réanalyses ou un modèle global (case orange supérieure) et par des données statiques (case orange inférieure). Le résultat de la simulation MAR donne des variables météorologiques en deux ou trois dimensions (cadre jaune).	44
Figure 23 (IPCC, 2021, FAQ 7.3) – Comparaison de la sensibilité climatique (gauche) et des projections de long terme de réchauffement global (droite) pour les modèles de la génération actuelle (CMIP6) et de la génération précédente (CMIP5). La dernière évaluation du GIEC est également représentée (AR6). Les lignes horizontales épaisses représentent la moyenne multimodèle et les lignes horizontales fines représentent les résultats des modèles individuels.	48
Figure 24 (IPCC, 2021, SPM.10) – Relation quasi-linéaire entre les émissions cumulées de CO ₂ et l'augmentation de la température mondiale à la surface. Panneau supérieur : les données historiques (fine ligne noire) montrent l'augmentation observée de la température de surface mondiale en °C depuis 1850-1900 en fonction des émissions historiques cumulées de dioxyde de carbone (CO ₂) en GtCO ₂ de 1850 à 2019. La plage grise avec sa ligne centrale montre une estimation correspondante du réchauffement historique de la surface d'origine humaine. Les zones colorées montrent la plage très probable évaluée des projections de températures de surface mondiales, et les lignes centrales colorées épaisses montrent l'estimation médiane en fonction des émissions cumulées de CO ₂ de 2020 à 2050 pour l'ensemble de scénarii (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5)	51
Figure 25 (Carbone 4, 2022). Les scénarii SSP et les émissions de GES correspondantes (gauche) sont intégrés dans les modèles climatiques (centre) qui génèrent des projections climatiques (droite). Figure adaptée: gauche-droite (IPCC, 2021) ; centre (IPSL, s.d.)	52
Figure 26 (adaptée à partir de Termonia et al., 2024) – Illustration des scénarii SSP et des moments auxquels ils atteignent un niveau de réchauffement global de +2°C, +3°C et +4°C. Graphique original à partir de IPCC (2021).	53

Figure 27 (Climate Action Tracker, 2023) – Projections du réchauffement climatique en fonction du niveau de respect des engagements. Pour chaque scénario, les boîtes de couleurs fournissent un minimum et un maximum ainsi que la valeur médiane.....	54
Figure 28 : Carte des 581 communes belges et des 30 communes de Charleroi Métropole (en bleu). Carte générée via QGIS	58
Figure 29 – Carte topographique des 30 communes de Charleroi Métropole (à gauche). Carte satellite des 30 communes de Charleroi Métropole (à droite). Cartes générées via QGIS.....	63
Figure 30 – Délimitations des 4 zones d'étude correspondant aux zones définies dans le tableau 5 (en rouge à gauche). Positionnement des pixels de 5 km de côté issus du modèle MAR par rapport aux zones définies à gauche, les points rouges représentent le centre des pixels (à droite). Cartes générées via QGIS.	63
Figure 31 – Schéma récapitulatif de la méthodologie développée au chapitre 2. Schéma adapté de (IRM, s.d. b).	78
Figure 32 – Guide de lecture pour interpréter les résultats par zone et par variable.	79
Figure 33 – Comparaison des zones pour gwI3 vs période historique et interprétations des résultats	79
Figure 34 – Évolution du nombre de jours d'été annuel en zone 2 ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$)	83
Figure 35 – Évolution du nombre de jours de gel annuel sur la zone 4 de Charleroi Métropole (zone agricole et forestière).	84
Figure 36 – Évolution du nombre de jours par an où l'Humidex dépasse la valeur de 40 en zone 2.....	87
Figure 37 (Fettweis et al., 2023, figure 13) – Changement dans le cumul des précipitations en hiver pour un réchauffement global de $+3^{\circ}\text{C}$ (gauche) et $+4^{\circ}\text{C}$ (droite). Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.	89
Figure 38 – Évolution du cumul des précipitations en été sur la zone 4 pour les différents niveaux de réchauffement global.....	90
Figure 39 (IRM, 2020, figure 4.7) – Répartition spatiale de l'îlot de chaleur urbain moyen sur 30 ans (1981-2010) pour la Région de Bruxelles-Capitale pendant la nuit (UHI_N = a, c) et le jour (UHI_D = b, d). Les chiffres du haut montrent (a, b) l'îlot de chaleur urbain dans des conditions climatiques moyennes, et les chiffres du bas (c, d) montrent l'îlot de chaleur urbain pendant les vagues de chaleur (HW).	102
Figure 40 (Willems, 2024) – Échelles de modélisation climatique sur la Belgique.....	106
Figure 41 – HUMIDEX : tableau des valeurs et échelle d'inconfort thermique.....	109
Figure 42 – Heat Index : tableau des valeurs et échelle d'inconfort thermique.....	110
Figure 43 – Wet Bulb Temperature : combinaison température-humidité relative menant à un inconfort thermique.	111
Figure 44 – Carte des 30 communes de Charleroi Métropole.	113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Sélection des ESM – Référence – Sensibilité climatique (Scafetta, 2021) – Critère de sélection (Termonia et al., 2024) – abréviation et pays d'origine.....	49
Tableau 2 – Scenarii d'émission (SSP) et de degrés de réchauffement globaux retenus.....	50
Tableau 3 (Carbone 4, 2022) – Réchauffement global estimé par période (court, moyen et long terme) et par scénario SSP	52
Tableau 4 (sur la base de Hauser et al., 2022) – Période correspondant au GWL par ESM. « Non atteint » signifie que l'ESM n'atteint pas ce niveau de réchauffement.	56
Tableau 5 – Critères climatiques pour les zones d'étude.	62
Tableau 6 – Nombre de fichiers utilisés par zone. Les mêmes fichiers pour SSP3 sont utilisés pour les GWL +2°C et +3°C. Tableau adapté à partir du tableau 4. * La véritable période est 2081-2100 mais l'année 2100 n'est pas disponible dans les données produites.	65
Tableau 7 – Variables extraites des modélisations du modèle MAR pour cette étude.....	65
Tableau 8 – Variables et indices sélectionnés liés à la température.	67
Tableau 9 – Variables et indices sélectionnés liés aux précipitations.	68
Tableau 10 – Détermination des saisons selon le calendrier météorologique.....	69
Tableau 11 – Seuil d'inconfort thermique sélectionné par indice.....	75
Tableau 12 – Récapitulatif méthodologique.....	77
Tableau 13 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour la température moyenne journalière, à l'échelle annuelle et saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives.	81
Tableau 14 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour la température maximale journalière, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives	82
Tableau 15 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour la température minimale journalière, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives	82
Tableau 16 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour le nombre de jours d'été annuel et le nombre de jours de gel annuel. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives	83
Tableau 17 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour le nombre de jours de canicule et pour le nombre de vagues de chaleur de 5, 7, 10 et 15 jours. Comparaison de la variation par	

niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives.	85
Tableau 18 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour le nombre de jours où le seuil d'inconfort thermique léger est dépassé (3 indices). Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives.	86
Tableau 19 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour le nombre de jours où le seuil Humidex de 40 est dépassé, correspondant à un inconfort thermique important. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives.	87
Tableau 20 – Moyenne des variables pour le cumul annuel de précipitations pour la période historique (1995-2014) pour les 4 zones de Charleroi Métropole.	88
Tableau 21 – Moyenne des variables sur la zone 4 de Charleroi Métropole pour les précipitations annuelles et saisonnières. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives / Plus humide / Plus sec.....	89
Tableau 22 – Moyenne des variables sur la zone 4 de Charleroi Métropole pour les jours de précipitations, fortes précipitations et très fortes précipitations, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives / Plus humide / Plus sec.....	91
Tableau 23 - Synthèse des tendances par saison dans un monde à +4°C pour les jours de précipitations, fortes précipitations et très fortes précipitations. Valeurs significatives (!)	93
Tableau 24 – Moyenne des variables sur la zone 4 de Charleroi Métropole pour le cumul journalier sur un jour et sur cinq jours, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives / Plus humide / Plus sec.....	93
Tableau 25 – Moyenne des variables sur la zone 4 de Charleroi Métropole pour le maximum de jours secs consécutifs, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives / Plus humide / Plus sec.....	94
Tableau 26 – Fettweis et al. (2023, 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.	106
Tableau 27 – Fettweis et al. (2023, Tableau 6) – Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs aux températures. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.	107
Tableau 28 – Fettweis et al. (2023, Tableau 7) – Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs aux précipitations. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.	108
Tableau 29 – Population par commune (2021).	112

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Signification
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ANOVA	Analysis of Variance
AwAC	Agence wallonne de l'Air et du Climat
BELSPO	Belgian Science Policy Office
BEP	Bureau économique de la province de Namur
C3S	Copernicus Climate Change Service
CDO	Climate Data Operator
CLM	Climate Limited-Area modeling
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
EBM	Energy Balance Model
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EEA	European Environment Agency - Agence Européenne pour l'Environnement
ERA	ECMWF Re-Analysis
ESM	Earth System Model
FAQ	Foire aux Questions
GCM	Global Circulation Model
GES	Gaz à Effet de Serre
GFCS	Global Framework for Climate Services
GIEC (IPCC)	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Intergovernmental Panel on Climate Change)
GWL	Global Warming Level
HPC	High Performance Computing
H-RES	High Resolution
IGRETEC	Intercommunale pour la Gestion et la Réalisation d'Études Techniques et Économiques de Charleroi
IRM	Institut Royal Météorologique
LIM	Local Impact Models
MAR	Modèle Atmosphérique Régional
NCO	netCDF Operators
NWS	National Weather Services
OCARA	Operational Climate Adaptation and Resilience Assessment
OMM (WMO)	Organisation Météorologique Mondiale (World Meteorological Organization)
PACE	Plan Air Climat Energie wallon
PAEDC	Plan d'Action en faveur de l'Énergie Durable et du Climat
PNEC	Plan National Energie Climat
POLLEC	Politique Locale Énergie Climat
QGIS	Quantum Geographic Information System
RCP	Representative Concentration Pathways
RE (AR)	Rapport d'Évaluation (du GIEC) - (IPCC) Assessment Report
SPW	Service Public de Wallonie
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
WBGT	Wet Bulb Globe Temperature
WBT	Wet Bulb Temperature
WCE	Western & Central Europe
WCRP	World Climate Research Programme
WWA	World Weather Attribution

INTRODUCTION

Après plusieurs décennies de recherche, le consensus scientifique est aujourd’hui limpide et résumé comme suit dans le dernier rapport du *Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat*, publié en 2023 (GIEC – IPCC en anglais) : « **les activités humaines, principalement par le biais des émissions de gaz à effet de serre (GES), ont sans équivoque provoqué le réchauffement de la planète, la température à la surface du globe en 2011-2020 atteignant 1,1°C de plus qu’entre 1850 et 1900** » (IPCC, 2023, A.1). Les impacts de ces changements climatiques génèrent déjà des pertes et des dommages connexes pour la biodiversité et les populations, et ces **impacts s’intensifieront tant que les émissions de GES continueront** (IPCC, 2023). Selon le même rapport, ce réchauffement pourrait atteindre jusqu’à +5°C d’ici la fin du siècle et les impacts sont divers et réels dès aujourd’hui, sur des secteurs qui doivent réduire leurs impacts sur le climat tout en s’adaptant à sa nouvelle réalité. Les secteurs sont nombreux, tels que la santé humaine, l’agriculture ou encore le secteur des transports et de l’énergie. En réponse à ces changements, il y a donc lieu de distinguer deux types de mesure :

1. les **mesures d’atténuation**, qui visent à réduire les émissions de GES et *in fine* l’amplitude du réchauffement climatique. Le réchauffement climatique a en effet une relation quasi-linéaire avec les émissions de GES (figure 24). Bien que centrales dans la lutte contre le changement climatique, ces mesures ne seront pas abordées dans la présente étude, car elles sont déjà largement documentées et déjà très présentes dans le débat public ;
2. les **mesures d’adaptation**, qui visent à s’adapter aux changements climatiques actuels et futurs, en fonction de différents scénarii d’émissions de GES, sont quant à elles beaucoup moins présentes dans le débat public. Ces mesures consistent par exemple à adapter les centres urbains ou les cultures agricoles à des niveaux de températures ou de précipitations différents. Le point de départ de cette étude tient au besoin de comprendre l’évolution du climat à l’échelle locale¹ et ses impacts sur les populations, les entreprises et les infrastructures, pour définir ensuite des mesures d’adaptation pertinentes à cette échelle.

En termes d’adaptation des territoires, il est crucial de bien comprendre que les niveaux de réchauffement et leurs impacts présentent une grande disparité géographique : les continents se réchauffent plus rapidement que les océans et toutes les régions du monde ne se réchauffent pas à la même vitesse ni avec la même amplitude. « *On identifie plutôt des structures régionales distinctes de changements de la température et des précipitations* » (IPCC, 2021, FAQ 4.3) comme l’illustre la figure 1, qui montre les modifications non uniformes des températures et

¹ Dans le contexte de cette étude, « régional » concerne l’échelle continentale et sous-continentale tandis que « local » concerne l’échelle régionale, communale et supracommunale à l’échelle belge.

des précipitations selon les régions du monde, selon deux scénarii de réchauffement au niveau global (+1,5°C et +3°C). Les **mesures d'adaptation nécessaires ne sont donc pas uniformes à travers le monde et doivent être identifiées et calibrées aux réalités locales**, que ce soit en termes d'impacts sur les infrastructures ou sur les populations : « *Le monde est physiquement et culturellement diversifié, et les défis posés par le changement climatique varient selon les régions et les lieux. Les utilisateurs des informations climatiques peuvent être très divers, allant de professionnels dans des domaines comme la santé humaine, l'agriculture ou la gestion de l'eau, à des communautés humaines au sens large qui subissent les effets du changement climatique* » (IPCC, 2021, FAQ 10.1).

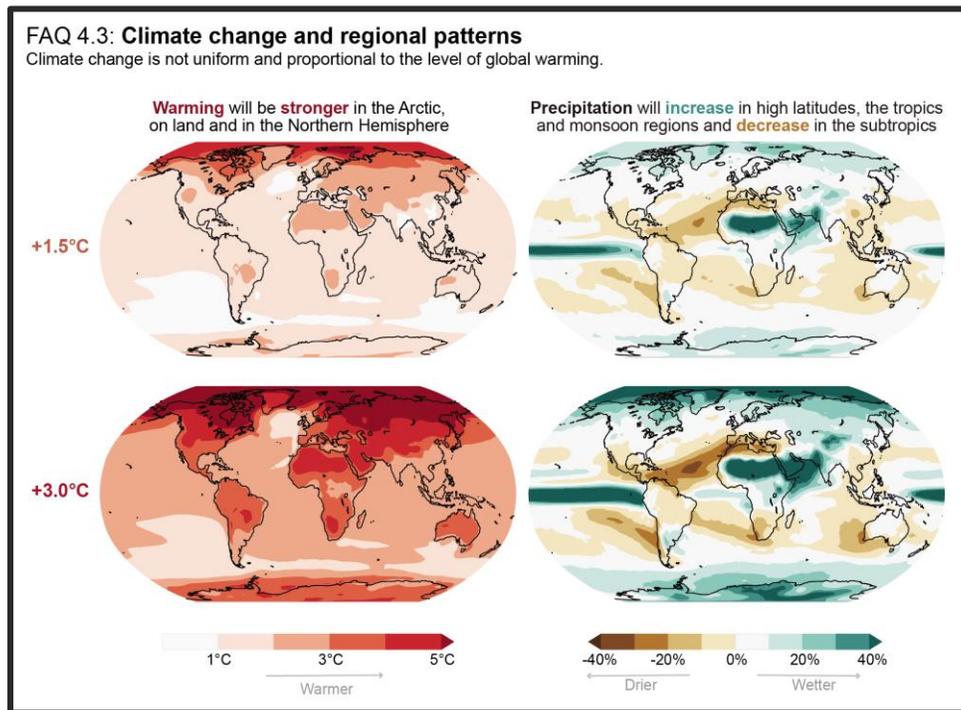


Figure 1 (IPCC, 2021, FAQ 4.3) - Les changements régionaux des températures (gauche) et des précipitations (droite) ne sont pas uniformes et s'amplifient avec le réchauffement global

À titre d'exemple, en Belgique, le climat de la ville d'Ostende est fortement influencé par l'inertie thermique de la Mer du Nord alors que le climat de la ville d'Arlon est plutôt continental (Doutreloup, 2022), comme l'indique la figure 2.

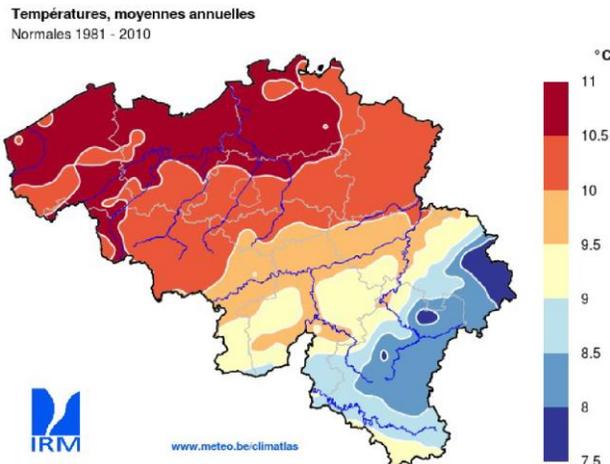


Figure 2 (IRM, 2020) – Les normales des températures moyennes annuelles en Belgique montrent des disparités importantes entre le Nord et le Sud du pays.

Étant donné ce besoin de connaissances de l'évolution du climat à l'échelle locale, **la question de recherche du présent mémoire est la suivante : « Comment le climat de Charleroi Métropole évoluera-t-il localement en fonction de l'évolution des températures à l'échelle mondiale ? »**. Le choix de ce territoire de Belgique est purement arbitraire, puisqu'il s'agit de ma région natale et de mon lieu de résidence. Au-delà de l'attachement personnel à cette région de Belgique, cette échelle est pertinente, car :

- peu investiguée aujourd'hui, les efforts de recherche ayant été concentrés jusqu'ici sur les échelles plus globales (monde, Europe) et régionales (Belgique, Wallonie), où les impacts et les recommandations sont généraux et peu adaptés à la spécificité de chaque territoire ;
- le territoire de Charleroi Métropole possède un territoire diversifié, mêlant zones urbaines, rurales et forestières qui seront impactées différemment par les changements climatiques. Il possède également une gouvernance regroupant 30 communes sur des sujets de portée supracommunale.

Dans ce contexte, ce travail a une double ambition : **(i) faire le lien entre la science du climat et les acteurs locaux de la société civile** (citoyens, entreprises, organisations publiques et politiques) pour tirer le débat public vers ces enjeux cruciaux de l'adaptation ; **(ii) amplifier les politiques d'adaptation et faciliter la prise de décision, grâce à une meilleure connaissance des outils disponibles et au développement de services climatiques² à l'échelle locale**. C'est un des objectifs que s'est donné le Centre Climat belge et les organisations partenaires à travers les futurs résultats de l'initiative CORDEX.be Il actuellement en cours. Ce mémoire

² Les **services climatiques** sont « basés sur des informations climatiques qui aident les individus et les organismes de la société dans leur prise de décision via la collecte, la génération et la fourniture de données pour le climat passé, actuel et futur, ainsi que le développement de produits tels que des cartes, des résultats d'analyses de risques et de vulnérabilité » (IRM, 2020).

constitue donc un exemple de service climatique pour les territoires qui pourrait être standardisé et affiné à l'avenir.

Au-delà de la question de recherche, la présente étude nous permettra d'apporter une réponse (à tout le moins partielle) à des questions très concrètes et parlantes relatives à l'évolution du climat. Ainsi, de manière non exhaustive : le nombre de jours de fortes chaleurs va-t-il augmenter ? Les précipitations vont-elles augmenter ou diminuer, et à quelle saison ? Les températures évoluent-elles de la même manière selon les saisons ? L'inconfort thermique va-t-il augmenter en été ?

Ces questions et les réponses qui y seront données charrient également de nombreuses questions et défis tout aussi concrets et fondamentaux pour les décideurs locaux (liste non exhaustive) : quelle nouvelle politique d'aménagement du territoire privilégier ? Quelle agriculture est adaptée à ces changements de climat ? Quelles informations climatiques sont nécessaires à la mise en place de mesures d'adaptation pertinentes sur un territoire donné ? Ces informations sont-elles disponibles ? Si oui, comment se les procurer et comment peuvent-elles être interprétées ? Si non, quels outils et quelles études doivent être développés ?

Ce besoin de projections climatiques à l'échelle locale est confirmé par l'*European Environment Agency (EEA)* dans son outil CLIMATE-ADAPT (EEA, 2024) : « **Les risques liés au changement climatique dans une ville doivent être caractérisés du point de vue de plusieurs aspects: la menace climatique (conditions climatiques projetées) ; le contexte de la situation géographique (par exemple, zone côtière, région de montagne, etc.); les secteurs et systèmes touchés (par exemple, la santé humaine, les infrastructures, les transports, les ports, l'énergie, l'eau, le bien-être social, etc.), y compris les incidences sur les groupes les plus vulnérables (par exemple, les personnes âgées, les sans-abri, les personnes exposées au risque de pauvreté, etc.)** ».

Des rencontres avec des coordinateurs et coordinatrices POLLEC (*Politique Locale Énergie Climat*) de plusieurs communes belges ont également permis de **valider l'intérêt d'une connaissance plus précise de l'évolution des variables climatiques à l'échelle locale**. Celle-ci permettrait :

- d'anticiper et de préciser les impacts des extrêmes climatiques sur les populations locales lors d'inondations ou de canicules ;
- d'accélérer la sensibilisation des élus, citoyens et entreprises, et d'amplifier la mise en place de politiques d'adaptation et d'atténuation ; celles-ci seraient alors davantage considérées comme un investissement de long terme, et non comme une dépense courante ;

- de rééquilibrer les moyens humains et financiers alloués à l'atténuation et à l'adaptation, les deux piliers des politiques liées aux changements climatiques.

Dans ce contexte, et en se concentrant sur les variables de températures et de précipitations, le présent mémoire suit la structure suivante :

- le premier chapitre parcourt succinctement la riche littérature scientifique qui décrit les avancées majeures des modélisations climatiques pour : **(i)** évaluer la maturité des modélisations climatiques à l'échelle globale et régionale, **(ii)** présenter les initiatives récentes de modélisations climatiques à l'échelle belge et wallonne, **(iii)** résumer les projections climatiques existantes des températures et précipitations, simulées aux échelles mondiale, européenne, belge et wallonne ;
- le deuxième chapitre décrit la méthodologie développée dans le cadre du présent mémoire, pour réaliser des modélisations climatiques à haute résolution sur le territoire de Charleroi Métropole (5 km), à l'aide du modèle régional MAR v3.14 (*Modèle Atmosphérique Régional*) développé par l'Université de Liège, et forcé par cinq modèles globaux. En utilisant la période de référence 1995-2014, trois scénarii de réchauffement mondial sont envisagés d'ici 2100, par rapport à la période préindustrielle (1850-1900) : +2°C (scénario optimiste au regard des politiques et des niveaux d'émissions de GES actuels), +3°C (scénario réaliste) et +4°C (scénario pessimiste). Ce chapitre décrit également la zone d'étude et les variables de températures et de précipitations mesurées (ex : évolution cumul annuel de précipitations, évolution des températures maximales moyennes annuelles, évolution du nombre de vagues de chaleur, évolution d'indices de confort thermique...). Un zoom sera effectué sur trois indices de chaleur : l'Humidex, Heat Index et le Wet Bulb Temperature. **Appliquer cette méthodologie à l'échelle d'un territoire comme Charleroi Métropole constitue l'originalité de cette étude et permettra de tester la pertinence des modélisations à cette échelle ;**
- le troisième chapitre, le plus important en termes de contenu, résume et analyse les données générées par les modélisations climatiques à l'échelle de Charleroi Métropole, sur la base des variables de températures et de précipitations sélectionnées au deuxième chapitre. Ce chapitre repose sur un **catalogue de variables climatiques** disponible à la fin de ce document et analyse l'évolution de **53 variables liées aux températures et aux précipitations**. Les résultats sont discutés et les limites de l'étude sont énumérées ;
- en lien avec l'évolution modélisée des variables climatiques, le quatrième chapitre se focalise succinctement sur quelques impacts pour le territoire. Cet exercice est réalisé sur la base de la littérature scientifique généraliste et non d'études spécifiques à Charleroi Métropole (ex : impacts sur la santé, sécheresses agricoles). Un bref focus est mis sur les impacts sanitaires liés aux vagues de chaleur pour les populations ;

- finalement, sur la base des chapitres précédents, le cinquième chapitre résume les informations clés et propose quelques recommandations à l'intention des décideurs locaux pour la mise en œuvre de politiques d'adaptation ambitieuses à l'échelle locale.

Pour conclure cette introduction, le dernier rapport du GIEC souligne les bénéfices d'une action de court terme en termes d'atténuation et d'adaptation : « *Des mesures d'atténuation profondes, rapides et durables et une **mise en œuvre accélérée des mesures d'adaptation au cours de cette décennie réduiraient les pertes et les dommages prévus pour les humains et les écosystèmes (degré de confiance très élevé)** et apporteraient de nombreux **avantages connexes**, en particulier pour la qualité de l'air et la santé (degré de confiance élevé). Des mesures d'atténuation et d'adaptation retardées verrouilleraient les infrastructures à fortes émissions [de GES], augmenteraient l'escalade des coûts, réduiraient la faisabilité et augmenteraient les pertes et les dommages (degré de confiance élevé). Les mesures à court terme impliquent des investissements initiaux élevés et des **changements potentiellement perturbateurs qui peuvent être atténués par une série de politiques habilitantes (degré de confiance élevé)** » (IPCC, 2023, C.2).*

1. MODÉLISATIONS CLIMATIQUES : ÉTATS DES LIEUX

Les modèles climatiques sont définis par le GIEC comme « *des représentations mathématiques du système climatique, exprimées sous forme de codes informatiques et exécutées sur des ordinateurs puissants* » (IPCC, 2007, FAQ 8.1).

Il existe des modèles globaux travaillant à des résolutions d'environ 100 km et des modèles régionaux permettant de zoomer jusqu'à l'échelle locale, à savoir quelques kilomètres (figure 3). Les développements scientifiques concernant ces modélisations sont succinctement résumés dans ce chapitre.

« *Depuis le milieu des années 70, en raison de la nature cumulative de la science, la science du climat est aujourd'hui une synthèse interdisciplinaire d'innombrables processus et principes physiques testés et éprouvés, minutieusement compilés et vérifiés au cours de plusieurs siècles de mesures détaillées en laboratoire, d'expériences d'observation et d'analyses théoriques. Elle est aujourd'hui beaucoup plus vaste et physiquement plus complète qu'il y a seulement quelques décennies.* » (IPCC, 2007, section 1.2).

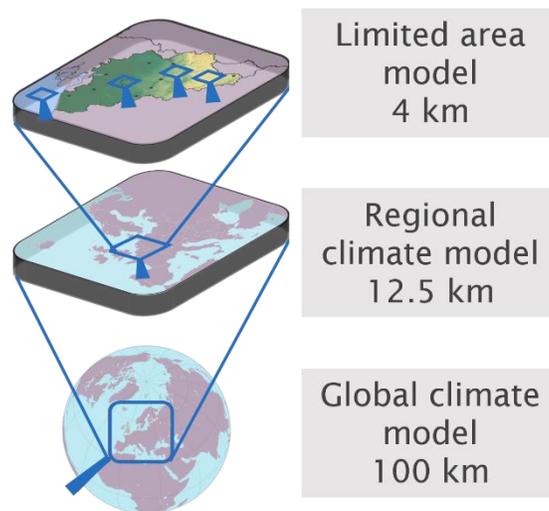


Figure 3 (IRM, s.d. b) – Représentation des principales échelles de modélisations climatiques et l'ordre de grandeur de leur résolution géographique respective

1.1. Modélisation à l'échelle globale

Différents modèles globaux existent : les EBM, les GCM et les ESM (IPCC, 2021) :

- les **EBM** (Energy Balance Model) sont des modèles climatiques simplifiés qui calculent l'équilibre énergétique de la Terre en considérant les entrées (radiation solaire) et les sorties (radiation thermique infrarouge) d'énergie ;

- les **GCM** (Global Circulation Model) sont des modèles climatiques qui simulent les processus physiques de l'atmosphère, de l'océan, de la surface terrestre et de la cryosphère. Ils utilisent des équations mathématiques pour décrire la dynamique et la thermodynamique du climat, en ce compris les interactions entre les différentes composantes du système climatique ;
- les **ESM** (Earth System Model) sont des modèles climatiques avancés qui intègrent non seulement les composantes atmosphériques et océaniques des GCM, mais aussi les cycles biogéochimiques, comme le cycle du carbone, et les interactions entre les écosystèmes terrestres et marins. Ils visent à fournir une représentation complète du système terrestre en incluant les interactions entre la biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère.

Ces modèles fournissent une résolution d'environ 100 km (figure 3). La figure 4 illustre l'évolution des modèles climatiques globaux, intégrant de plus en plus de processus au cours du temps.

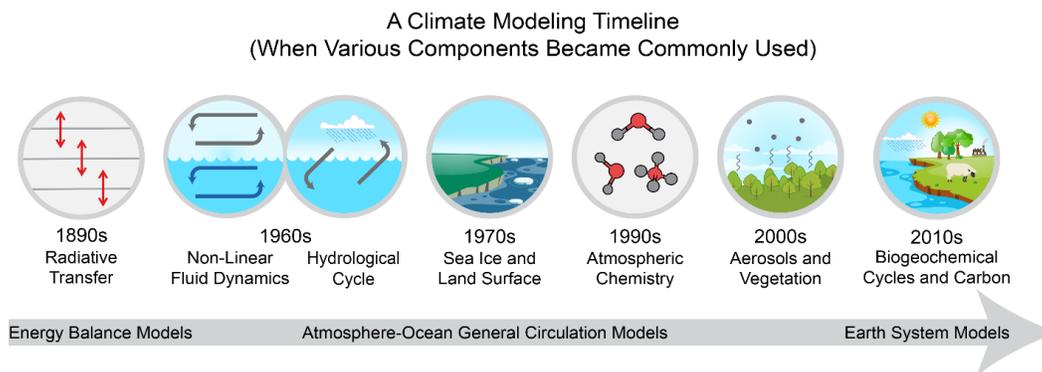


Figure 4 (Hayhoe, 2017) – Ligne du temps des modélisations climatiques et intégration progressive des composantes climatiques

Afin de coordonner la recherche sur la modélisation climatique à l'échelle mondiale, l'initiative collaborative *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) a été initiée en 1995 par le *World Climate Research Programme* (WCRP). « L'objectif est de mieux comprendre les changements climatiques passés, présents et futurs. Cette compréhension comprend des évaluations des performances des modèles climatiques au cours de la période historique et des quantifications des causes de la variabilité dans les projections futures. En plus de ces réponses à longue échelle de temps, des expériences sont réalisées pour étudier la prévisibilité du système climatique à diverses échelles de temps et d'espace, ainsi que pour faire des prévisions à partir des données climatiques observées » (WCRP, 2024). Les données produites sont utilisées comme base scientifique lors de la rédaction des rapports du GIEC. L'initiative en est aujourd'hui à son sixième cycle (CMIP6), aligné avec le sixième rapport du GIEC (AR6).

Dans la suite de cette étude, le terme ESM sera utilisé pour regrouper les termes GCM et ESM sous le même vocable.

1.2. Modélisation à l'échelle régionale

Comme mentionné plus haut, un ESM peut fournir des informations climatiques à une résolution d'environ 100 km, couvrant des paysages très différents (montagnes, plaines, zones côtières) avec un potentiel très variable d'aléas climatiques (inondations, sécheresses...). **Cependant, les impacts du changement climatique et les stratégies d'adaptation nécessaires pour y faire face se produiront à des échelles régionales et locales. C'est là que la modélisation à l'échelle régionale (*regional downscaling*) a un rôle important à jouer en fournissant des projections beaucoup plus détaillées et une représentation plus précise des événements extrêmes locaux** (CORDEX, s.d.). Ces travaux à l'échelle régionale sont regroupés dans l'initiative *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX). La coordination se concentre sur différentes régions du monde, y compris l'Europe dans la partie spécifique EURO-CORDEX du projet.

Cette initiative permet une compréhension des événements locaux et permet également d'affiner les travaux du CMIP (Giorgi et al., 2009), notamment pour la simulation des événements extrêmes et les simulations dans les zones à topographie complexe comme les zones côtières (rapport technique dans IPCC, 2021). L'initiative CORDEX permet principalement (Termonia et al., 2018a) :

- d'évaluer et d'améliorer les modèles climatiques régionaux ;
- de coordonner la **production de projections climatiques régionales** et de traduire ces informations en **impacts locaux** ;
- de favoriser l'échange de connaissances avec les utilisateurs des services climatiques.

Ces modèles régionaux sont généralement **forcés toutes les 6 heures à leurs frontières par des modèles globaux fournissant certaines variables météorologiques comme la température, le vent, l'humidité et la pression** (Fettweis et al., 2023). Ils incluent les mêmes processus physiques qu'un modèle global mais sont plus détaillés (Termonia et al., 2018a), ce qui permet de réaliser des simulations avec une résolution spatiale plus élevée. Par exemple, **en prenant en compte la topographie de manière plus fine, on peut produire des informations climatiques plus détaillées pour une zone spécifique** (figure 5). La figure 6 décrit les composantes climatiques intégrées dans les différents niveaux de modélisation, en fonction des échelles temporelle et géographique.

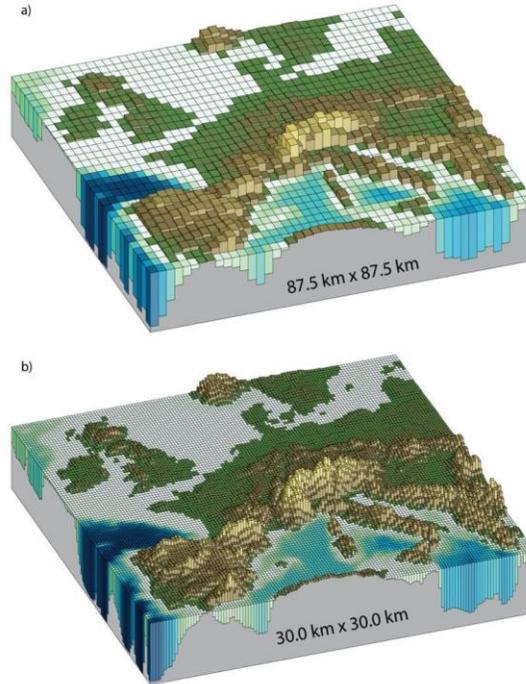


Figure 5 (IPCC, 2014, figure 1.14) – Illustration de la topographie européenne à une résolution de (haut) 87,5 x 87,5 km et (bas) de 30,0 x 30,0 km.

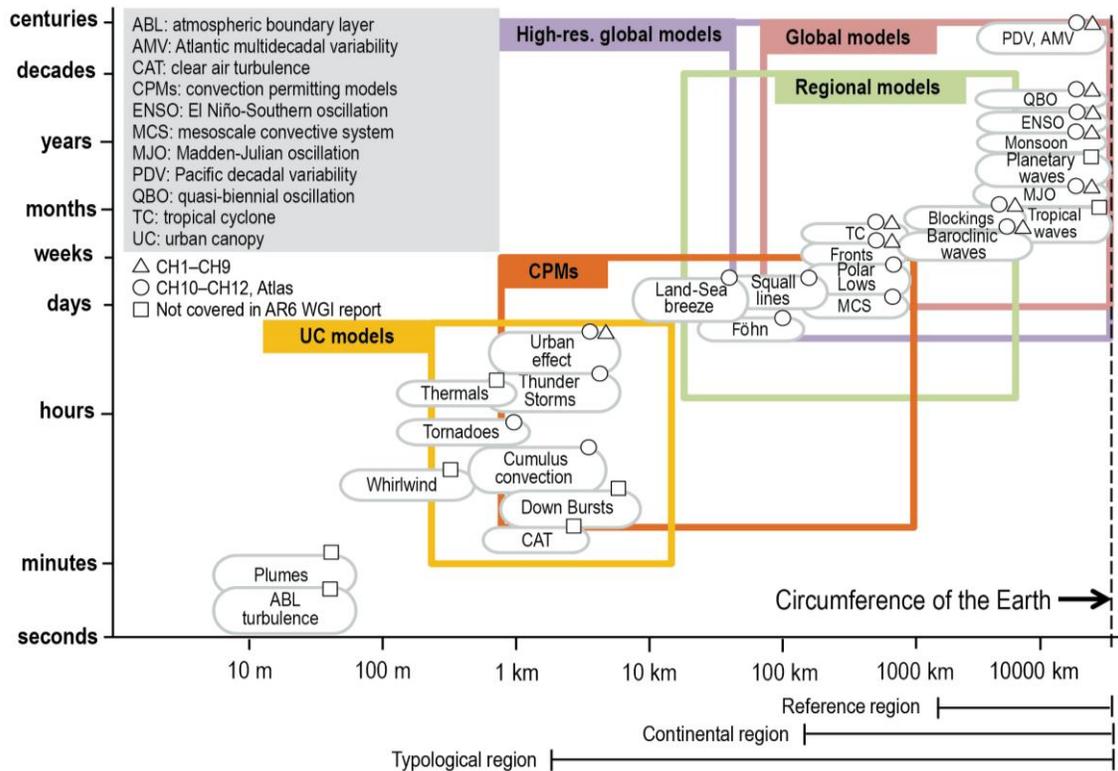


Figure 6 (IPCC, 2021, figure 10.3) – Diagramme décrivant les composantes climatiques et leur résolution spatiale et temporelle, intégrées dans les modélisations.

1.3. Pertinence des modélisations

Cette section décrit à la fois les éléments sur lesquels les modélisations ont atteint un niveau de confiance élevé mais également les incertitudes et pistes d'améliorations.

Il existe tout d'abord **plusieurs éléments en faveur de la robustesse** des modèles climatiques (IPCC, 2007, FAQ 8.1) :

- ils sont basés sur des **lois physiques établies** telles que la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement, ainsi que sur une multitude d'observations ;
- leur **capacité à simuler des aspects importants du climat actuel**. Les modèles sont régulièrement évalués en comparant leurs simulations avec des observations de l'atmosphère, de l'océan, de la cryosphère et de la surface terrestre. Des niveaux d'évaluation sans précédent ont eu lieu au cours de la dernière décennie sous la forme d'*intercomparisons* organisées aux échelles mondiales et régionales (CMIP, CORDEX). **Les modèles font preuve d'une capacité significative et croissante à représenter de nombreuses caractéristiques climatiques moyennes importantes** telles que les distributions à grande échelle de la température atmosphérique, des précipitations, du rayonnement et du vent, ainsi que des températures océaniques, des courants et de la couverture de glace marine. « *Les modèles peuvent également simuler des aspects essentiels de nombreux modèles de variabilité climatique observés sur diverses échelles de temps* » ;
- leur **capacité à reproduire les caractéristiques des climats et des changements climatiques passés** « *comme ceux survenus lors de l'Holocène il y a 6 000 ans ou lors du dernier maximum glaciaire il y a 21 000 ans* ».

Comme illustration de cette robustesse, la figure 7 illustre l'augmentation de la capacité des modèles globaux à reproduire les données moyennes observées. Ainsi, dans la Foire aux Questions (FAQ) du dernier rapport du GIEC, voici la réponse à la question « *les modèles climatiques s'améliorent-ils ?* » (IPCC, 2021, FAQ 3.3) : « *Oui, les modèles climatiques se sont améliorés et progressent encore, devenant plus aptes à saisir les processus complexes et de petite échelle et à simuler les conditions climatiques moyennes actuelles. **Cette amélioration peut être mesurée en comparant les simulations climatiques aux observations historiques.** Aussi bien les modèles actuels que ceux des générations précédentes montrent que l'augmentation des gaz à effet de serre entraîne le réchauffement planétaire* ».

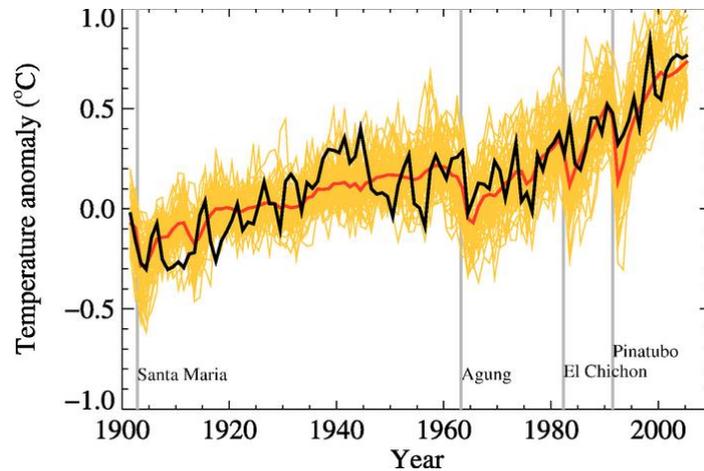


Figure 7 (IPCC, 2007, FAQ 8.1) – Évolution de la température mondiale au cours du siècle dernier vs projections climatiques. Observations (en noir), les simulations obtenues à partir de 58 simulations produites par 14 modèles climatiques différents (en jaune), la moyenne des simulations (en rouge). Les anomalies de température sont présentées par rapport à la moyenne 1901-1950. Les lignes grises indiquent des éruptions volcaniques majeures.

Dans son dernier rapport technique, **le GIEC confirme cette efficacité croissante**, mais souligne néanmoins quelques **sources importantes d'incertitudes**. En effet, certains processus sont de mieux en mieux simulés, comme l'augmentation de la température globale, l'augmentation de la température des océans ou l'élévation du niveau des mers, qui sont globalement cohérents avec les observations ultérieures, mais « certaines *différences persistent par rapport aux observations, par exemple vis-à-vis de la **structure régionale des précipitations*** » (IPCC, 2021).

En guise d'illustration, ces progrès et incertitudes dans les simulations climatiques pour les trois dernières générations les plus récentes de modèles (CMIP4 en 2008, CMIP5 en 2013 et CMIP6 en 2021) peuvent être résumés avec la figure 8. Cette figure permet de **comparer les simulations avec les observations** de trois variables climatiques et montre l'augmentation de la corrélation entre simulations et observations avec les nouvelles générations de simulations, où une valeur de 1 représente une concordance parfaite et où l'étendue verticale indique la fourchette de résultats des modèles pour chaque groupe. **Pour les températures, la moyenne des modèles se rapproche fortement d'une corrélation de 1.** « *La partie haute de la barre s'élève à chaque génération, ce qui indique une amélioration des résultats des modèles les plus performants d'une génération sur l'autre. Dans le cas des précipitations, les résultats des modèles les moins performants sont analogues pour les deux générations de modèles les plus récentes et la dernière génération produit des simulations plus performantes* ». **Pour la suite de cette étude, il est important de remarquer que :** « *la moyenne de nombreux modèles donne souvent de meilleurs résultats par rapport aux observations que n'importe quel modèle individuel, car les erreurs associées à la représentation de processus détaillés ont*

tendance à se neutraliser mutuellement dans les moyennes multimodèles » (IPCC, 2021). Cet élément est important pour les choix méthodologiques décrits dans le prochain chapitre. Comme les projections peuvent varier entre modèles, **plusieurs ESM sont utilisés pour fournir une incertitude** sur les résultats.

FAQ 3.3: Are Climate Models Improving?

Yes, climate models have improved with increasing computer power and better understanding of climate processes.

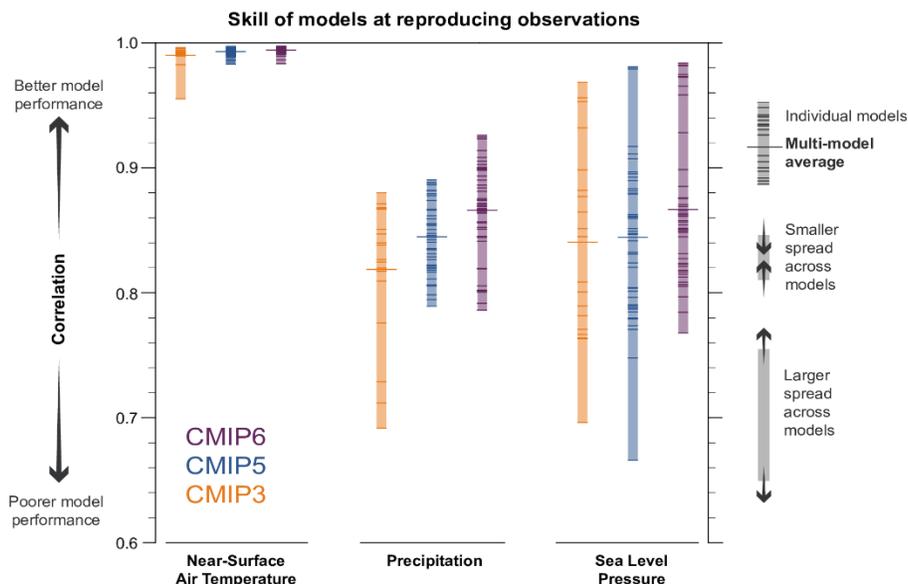


Figure 8 (IPCC, 2021) – Corrélations entre 3 générations de modélisations (CMIP3,5 et 6) et les observations pour 3 variables : la température de l'air, les précipitations et la pression au niveau des mers et océans.

Comparing CMIP5 and CMIP6 scenarios

For currently available runs, from 1880-1900 to 2090-2100.

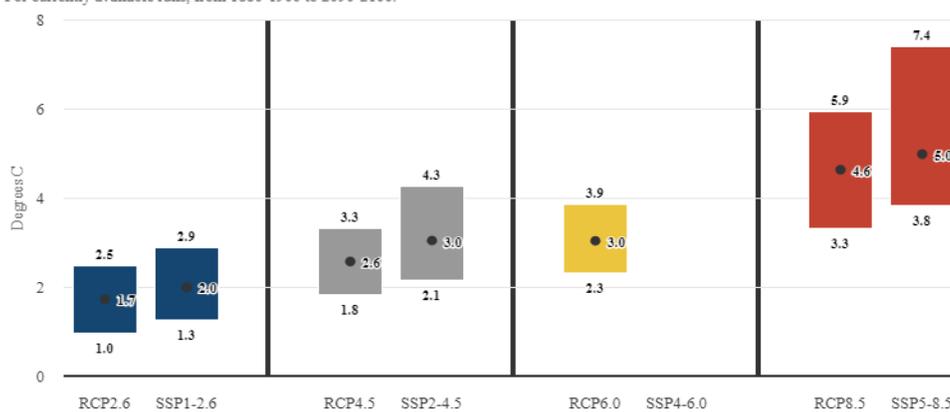


Figure 9 (Carbon Brief, 2019) - Réchauffement CMIP5 et CMIP6 entre 1880-1900 et 2090-2100 pour les scénarii RCP et SSP. La fourchette reflète le réchauffement le plus faible et le plus élevé parmi les modèles pour chaque scénario, tandis que les points marqués indiquent la moyenne multi-modèles (Wagner, 2024)

Au-delà des biais lors de la comparaison entre les observations et les simulations, une autre illustration de ces incertitudes concernent les projections futures. La figure 9 décrit la fourchette d'incertitudes sur l'évolution des températures produites par les différents modèles pour l'initiative CMIP5 et CMIP6, pour les différents scénarii d'émissions de GES (RCP³ et SSP⁴). La variabilité de l'ensemble des modèles reste élevée, notamment pour les scénarii à fortes émissions de GES.

Pour conclure, on peut lister les principales lacunes actuelles et les pistes d'amélioration des modélisations aux échelles mondiale et régionale de la manière suivante :

- la **modélisation des nuages et des processus qui en découlent** est un challenge important (Wagner, 2024) ;
- bien que des améliorations importantes aient été réalisées, notamment via les initiatives CMIP et CORDEX, il reste des incertitudes concernant **les simulations des événements extrêmes** (IPCC, 2021, chapitre 11), **à savoir principalement les extrêmes de chaleur et les précipitations en ce qui concerne la Belgique** ;
- les **ESM ne permettent pas de représenter correctement les modifications de circulation générale** (IPCC, 2021, chapitre 3) qui peuvent entraîner par exemple des blocages atmosphériques (anticyclones puissants), produisant de longs épisodes de chaleur sur cette zone et des dépressions de longue durée dans les régions voisines (figure 10). Ce phénomène est dû au « **ralentissement de la dynamique atmosphérique qui est censée chasser les systèmes météo après quelques jours. Avec le réchauffement global, le contraste thermique pôles-équateur diminue car les pôles se réchauffent 4 fois plus vite que l'équateur. Le courant d'air entre l'équateur et les pôles diminue, ce qui ralentit la dynamique atmosphérique (i.e. le Jet Stream). Ce ralentissement, voire cet arrêt, permet alors aux systèmes météo de rester plus longtemps sur place sans bouger** » (Fettweis, 2024). Sur ce sujet, dans son chapitre 8, le GIEC conclut (IPCC, 2021, chapitre 8) qu'« *aucune tendance robuste de blocage atmosphérique n'a été détectée dans les réanalyses modernes et dans les simulations historiques CMIP6 (confiance moyenne). L'absence de tendance s'explique par une forte variabilité interne et/ou les effets concurrents de l'amplification de basse altitude de l'Arctique et de l'amplification tropicale de haute altitude du gradient de température de l'équateur au pôle* ». Néanmoins, « *si les changements climatiques observés chez nous sont typiquement 10 ans en avance par rapport aux projections climatiques, c'est principalement parce que les modèles sous-estiment ce ralentissement de la dynamique atmosphérique* » (Fettweis, 2024).
- enfin, il existe également **des défis à relever en termes de puissance de calcul** (via des super-ordinateurs de type *High Performance Computing* – HPC), **d'optimisation des**

³ Les RCP, pour *Representative Concentration Pathways*, sont utilisés dans le 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC et définit des trajectoires de concentration de GES dans l'atmosphère selon plusieurs scénarii.

⁴ Les SSP, pour *Shared Socioeconomic Pathways*, sont utilisés dans le 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC et définissent des trajectoires d'émissions de GES en fonction de différents scénarii de développement socio-économique.

codes sources et de sobriété dans ce domaine de recherche très énergivore (Wagner, 2024).

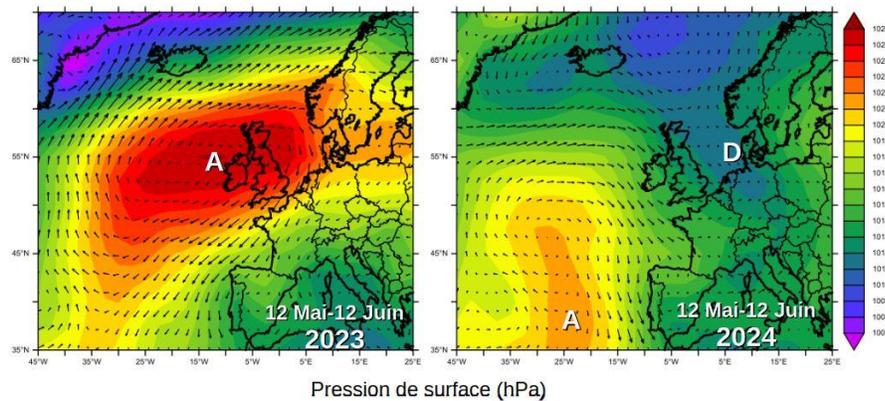


Figure 10 (Fettweis, 2024) – Deux phénomènes météorologiques différents touchent l'Europe de l'Ouest et la Belgique : un anticyclone bloqué sur l'Europe en 2023 (à gauche) vs une dépression bloquée sur l'Europe en 2024 (à droite) à la même période (12 mai – 12 juin), à cause du ralentissement de la dynamique atmosphérique.

1.4. Initiatives à l'échelle nationale et régionale

1.4.1. CORDEX.be

Financé à partir de 2015 par BELSPO (Belgian Science Policy Office), CORDEX.be a pour objectif principal de long terme de développer des services climatiques robustes pour la Belgique. « *Les services climatiques sont la production et l'utilisation de données, d'informations et de connaissances climatiques pour assister les processus de décision des individus et des organisations* » (WMO, s.d.). Les services climatiques reposent sur 3 piliers (Hewitt et al., 2012), représentés par la figure 11 :

1. **mettre en place des services d'observation et de monitoring du climat ;**
2. **développer la recherche scientifique sur la modélisation et les projections climatiques ;**
3. **mettre en place un système d'information pour les services climatiques et une interface utilisateur.**

Les services de l'IRM couvrant les observations et le monitoring, et la modélisation étant une précondition à la mise en place de services climatiques, il convenait de rassembler les activités des trois initiatives de recherche existantes de modélisation du climat en Belgique : le modèle MAR développé par l'Université de Liège (ULiège), le modèle COSMO-CLM codéveloppé par l'Université de Leuven (KUL) au sein du consortium CLM (Climate Limited-Area modeling), et le modèle ALARO-0 codéveloppé par l'Institut Royal Météorologique (IRM) et l'Université de Gand

au sein du consortium ALADIN. Plus d'informations sur ces modèles sont disponibles dans EURO-CORDEX (s.d.).

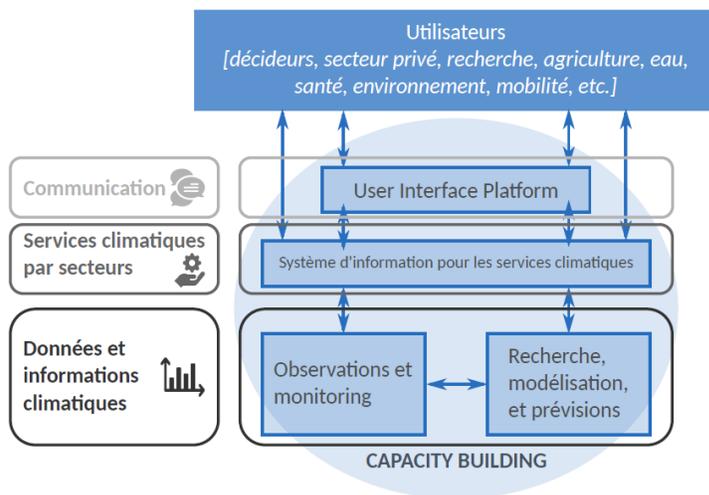


Figure 11 (IRM, 2020) – Piliers pour le développement et la fourniture de services climatiques tels que décrits par L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

Les cibles principales de CORDEX.be (basé sur l'initiative CMIP5 et EURO-CORDEX) sont les suivantes (Termonia et al., 2018a) :

- créer des **échanges réciproques avec les initiatives de recherche régionales et globales** décrites plus haut (EURO-CORDEX, CMIP) en suivant notamment leurs recommandations méthodologiques (*Target 1* sur la figure 12) ;
- sur la base des initiatives CMIP et EURO-CORDEX, **réaliser des modélisations climatiques à haute résolution (H-Res)** sur la Belgique à l'aide des trois modèles cités plus haut. Ces modélisations sont mentionnées dans le Plan d'adaptation belge 2017-2020 (IRM, 2020) comme la première étape pour atteindre les objectifs d'adaptation nationaux (*Target 2*) ;
- **intégrer les données générées dans différents modèles d'impacts locaux (LIM – Local Impact Models)** pertinents avec les risques liés au territoire belge. Dans CORDEX.be, sept modèles ont été utilisés permettant de simuler à haute résolution différents phénomènes (*Target 3*): trois modèles de climats urbains (*urban models*), un modèle agricole (*crop model*), un modèle pour les marées et tempêtes, un modèle pour la hauteur des vagues (*models for waves, tides and storm surges*) et un modèle pour les émissions biogéniques et l'impact sur l'ozone (*biogenic emissions model*) ;
- finalement, **interpréter les incertitudes des simulations à haute résolution (H-Res) définir des scénarii climatiques adaptés aux réalités des différentes parties prenantes** (*Target 4 et End Product*).

The CORDEX.be initiative

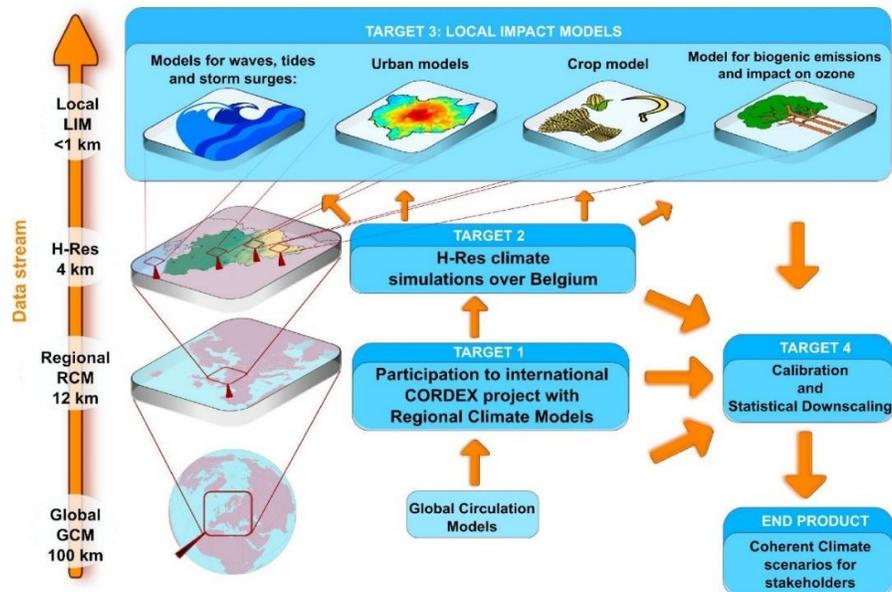


Figure 12 (Termonia et al., 2018) – Schéma de synthèse de l'initiative CORDEX.be et de ses objectifs (Targets)

L'initiative CORDEX.be a ainsi jeté les bases pour des services climatiques en Belgique et la création d'un Centre Climat belge. Les conclusions de cette première phase sont disponibles dans Termonia et al. (2018b). Ces résultats ont également contribué au Rapport Climatique de l'IRM, publié en 2020 (IRM, 2020). Les différentes échelles de modélisation climatique sur la Belgique peuvent également être résumées en annexe 1.

1.4.2. Le Centre Climat

En novembre 2022, le Centre Climat a été inauguré avec pour mission de « **maximiser l'impact de la science sur l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à ses impacts en Belgique, afin de soutenir une transition efficace et socialement juste** » (Centre Climat, s.d.). Ses objectifs sont cohérents avec les piliers des services climatiques mentionnés plus haut :

- **renforcer les capacités de recherche scientifique** (#1 sur la figure 13) ;
- **faciliter le transfert de connaissance** des chercheurs vers un large éventail d'acteurs (#2) ;
- **améliorer la pertinence des futurs programmes de recherche** sur l'action climatique (#3).

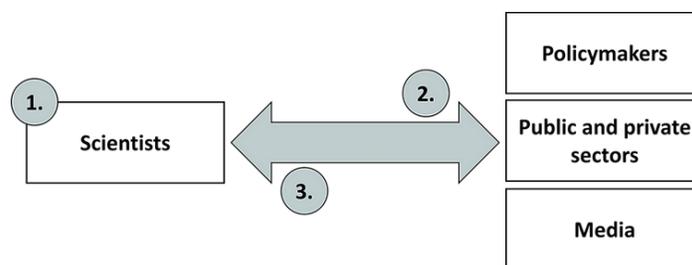


Figure 13 (Centre Climat, s.d.) – Schéma des interactions entre les différentes parties prenantes.

1.4.3. CORDEX.be II

Les projections du climat belge réalisées dans le cadre de CORDEX.be sont en cours de mise à jour et sont attendues pour 2026. **L'objectif est de minimiser l'écart entre les informations produites par les modèles régionaux et les impacts observés afin de développer des services climatiques et accélérer l'adaptation et l'atténuation du changement climatique en Belgique.** Plusieurs raisons techniques motivent également cette mise à jour (IRM, s.d. c) :

- les **RCM utilisés pour les simulations H-Res ont évolué vers de nouvelles versions**, incluant désormais de nouvelles connaissances scientifiques, notamment sur les extrêmes climatiques ;
- les **ESM utilisés pour forcer les RCM ont également évolué vers de nouvelles versions**. CORDEX.be se basait sur les modèles intégrés à l'initiative CMIP5. CORDEX.be II se base désormais sur les ESM intégrés à l'initiative CMIP6 ;
- les **scénarii d'émissions de GES doivent être alignés aux scénarii du dernier rapport du GIEC** (SSP – *Shared Socioeconomic Pathways dans l'AR6 du GIEC*) alors que CORDEX.be se basaient sur les précédents (RCP - *Representative Concentration Pathway dans l'AR5 du GIEC*) ;
- il y a un **intérêt croissant pour des informations et des données climatiques détaillées, de la part de différentes parties prenantes** (ex : des secteurs de la santé, des infrastructures, des transports, de l'énergie), concernant les événements météorologiques extrêmes. Un focus sera donc mis sur les extrêmes liés à la chaleur, aux précipitations et aux sécheresses ;
- **l'effort dans la gestion des données de modélisations climatiques au sein de la communauté scientifique belge doit être poursuivi**. Afin de renforcer les activités du Centre Climat, l'initiative CORDEX.be II se positionne comme une étude de cas concrète pour la création d'un « Belgian Climate Data Hub ».

La méthodologie développée est disponible dans Termonia et al. (2024). Les RCM utilisés sont ALARO-0, COSMO et MAR avec une résolution spatiale de 4 km. Dans un second temps, les données générées seront utilisées dans les modèles d'impacts locaux : « *deux modèles d'impact*

hydrologique (SCHEME et WOLF) seront utilisés pour simuler les inondations dans les bassins fluviaux ; le modèle urbain URBCLIM réalisera une simulation d'une résolution de 100 m qui pourra être utilisée parallèlement à la campagne d'observation urbaine pour évaluer l'impact à micro-échelle (par exemple, les bâtiments et les arbres) des villes sur le climat local ; les grandes villes belges seront également simulées à une résolution de 1 km à l'aide du modèle urbain SURFEX. En outre, le projet vise à co-créeer des scénarii sur les conditions météorologiques futures avec les principaux partenaires, ce qui permettra d'étudier les impacts climatiques pertinents pour les parties prenantes » (Termonia et al., 2024).

Comme développé dans les prochains chapitres, la présente étude porte sur des simulations climatiques (H-Res) au niveau de Charleroi Métropole (Target 2 dans la figure 12) avec l'ambition de jeter les bases pour le développement de futurs services climatiques pour cette région de Belgique. Conformément à ce qui est décrit sur la figure 12, cet exercice requiert le choix de différents ESM et la sélection d'au moins un RCM. Le prochain chapitre décrit la méthodologie développée pour y parvenir.

1.4.4. Étude de vulnérabilités et d'adaptation en Région wallonne

Le gouvernement wallon via l'AwAC (*l'Agence Wallonne de l'Air et du Climat*) a commandé une mise à jour des projections climatiques pour la Wallonie auprès du Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège. L'objectif était de répondre à la question : « **Quel sera le climat potentiel de la Wallonie dans un monde (à l'échelle globale) à +2°C, +3°C, +4°C par rapport à 1850-1900 ?** ». Les éléments méthodologiques clés étaient les suivants :

- utilisation du modèle régional MAR dans sa version 3.14 ;
- utilisation de 6 ESM pour forcer le modèle MAR à ses frontières, recommandés par EURO-CORDEX ;
- utilisation des scénarii SSP3 (le plus plausible) et SSP5 (le pire scénario) ainsi que les niveaux de réchauffement global +2°C, +3°C et +4°C. Ces scénarii et niveaux de réchauffement sont décrits dans la section 2.3 ;
- les niveaux de réchauffement global sont calculés sur des périodes de 30 ans et la période de référence, de 30 ans également, s'étend de 1980 à 2010.
- de nombreuses variables sont étudiées : la température, les précipitations, le vent, l'évapotranspiration, l'éclairement solaire et l'humidité spécifique. **La présente étude se limiter aux variables de températures et de précipitations ;**

L'étude complète est disponible dans Fettweis et al. (2023).

1.5. Domaine de l'attribution

La modélisation climatique contribue également à une branche relativement jeune de la climatologie : **l'étude du degré d'attribution des événements météorologiques extrêmes au réchauffement climatique.**

En 2015, l'initiative World Weather Attribution (WWA) a été lancée par G.J. van Oldenborgh et F.Otto en réponse à la **question récurrente de savoir si le réchauffement climatique est responsable de l'apparition d'un événement extrême.** Le but est de publier rapidement des informations à ce sujet *« afin d'éclairer les discussions sur les changements climatiques, l'atténuation et l'adaptation, alors que les impacts de l'évènement météorologique extrême sont encore frais dans l'esprit du public et des décideurs, et que des décisions concernant la reconstruction sont prises »*. Cette initiative répond également à trois erreurs fréquemment commises par les journalistes : *« ignorer le changement climatique comme cause d'un évènement climatique extrême, attribuer cet évènement au changement climatique sans en fournir aucune preuve, ou encore l'attribuer au changement climatique en le retenant comme cause unique »* (WWA, s.d.).

La science de l'attribution permet de répondre à 3 questions principales : **comment le réchauffement climatique influence l'intensité de l'évènement ? Comment il influence la probabilité de l'évènement ? Et comment la vulnérabilité préexistante des territoires impactés amplifie ou non les impacts ?**

Une des méthodes courantes est de réaliser **deux types de modélisations climatiques en parallèle : des modélisations dans les conditions atmosphériques actuelles et des modélisations dans des conditions climatiques dépourvues de l'influence humaine**, par exemple avec le taux de GES de la période préindustrielle (Carbon Brief, 2022). **L'analyse de la différence entre les deux simulations permet de tester l'influence significative du réchauffement climatique sur la probabilité et l'intensité de l'évènement étudié.**

En 2022, dans Clarke et al. (2022), une première synthèse des enseignements principaux de ce jeune champ d'étude a été réalisée et souligne notamment **le manque de données et de moyens humains dédiés à ce champ d'étude.**

Au titre de synthèse, Carbon Brief (2022) a reporté sur une carte interactive l'ensemble des études d'attribution à cette date (figure 14).

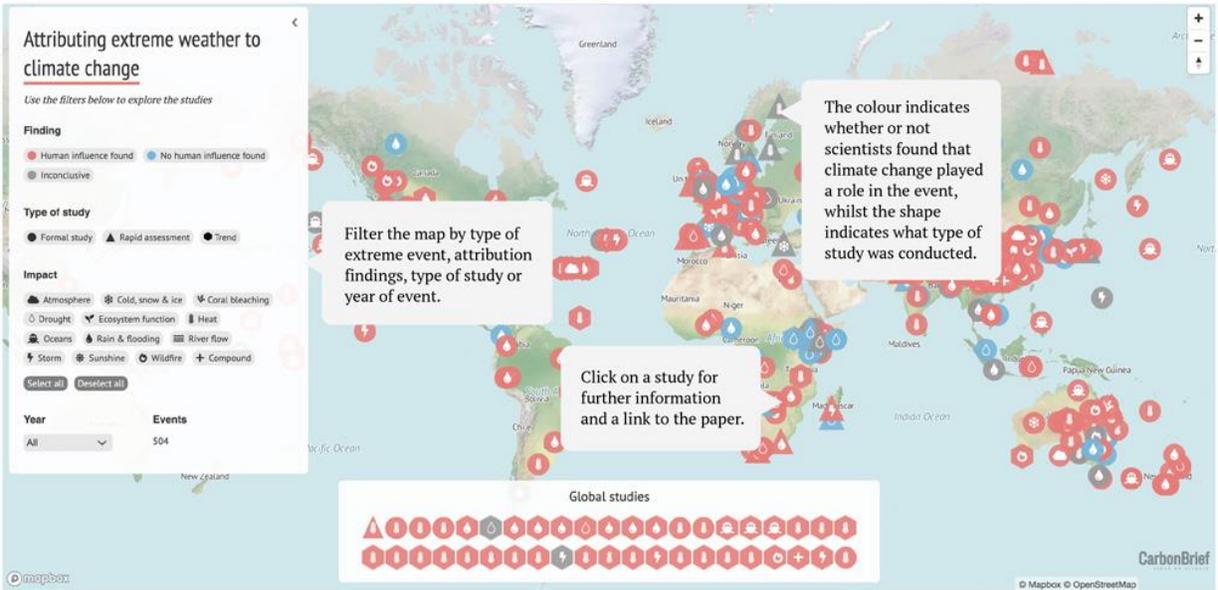


Figure 14 (Carbon Brief, 2022) – Carte interactive des 504 événements extrêmes qui ont fait l'objet d'une étude d'attribution

Les auteurs concluent ainsi que :

- « **71 %** des 504 phénomènes météorologiques extrêmes et des tendances figurant sur la carte ont été **rendus plus probables ou plus graves** par le changement climatique causé par l'homme » ;
- « **9 %** des événements ou des tendances ont été **rendus moins probables ou moins graves** par le changement climatique, ce qui signifie que 80 % de tous les événements ont eu un impact humain. Les 20 % restants d'événements et de tendances n'ont montré aucune influence humaine perceptible ou n'ont pas été concluants » ;
- « Sur les **152 épisodes de chaleur extrême qui ont été évalués par les scientifiques, 93 %** ont constaté que le changement climatique rendait l'évènement ou la tendance plus probable ou plus grave » ;
- « Sur les **126 épisodes de pluie ou d'inondation étudiés, 56 %** ont constaté que l'activité humaine avait rendu l'évènement plus probable ou plus grave. **Pour les 81 épisodes de sécheresse étudiés, c'est 68 %** ».

En ce qui concerne la Belgique, une étude d'attribution a été réalisée sur les précipitations extrêmes qui ont touché la Belgique et l'Allemagne en juillet 2021 (Tradowsky et al., 2023). Les conclusions principales de l'étude sont les suivantes :

- « Dans une région de cette taille limitée, l'estimation robuste des valeurs de retour ainsi que la détection et l'attribution des tendances des précipitations sont complexes. Cependant, pour une région plus large en Europe occidentale, il a été constaté que, **dans**

les conditions climatiques actuelles, on peut s'attendre en moyenne à une pluie de cette ampleur tous les 400 ans à un endroit donné. Par conséquent, dans l'ensemble de la région, on s'attend à ce que des évènements d'une ampleur similaire se produisent plus d'une fois tous les 400 ans » ;

- « La **probabilité** qu'un tel évènement se produise aujourd'hui par rapport à un climat plus froid de 1,2 °C **a augmenté d'un facteur de 1,2 à 9**. Les modèles indiquent que l'intensité et la **fréquence de ces évènements augmenteront encore avec le réchauffement climatique futur** » ;
- « Le changement climatique a déjà **augmenté de 3 à 19 % l'intensité des précipitations maximales en 1 jour pendant la saison estivale** ».

En ce qui concerne l'Europe, une étude d'attribution a été réalisée suite aux épisodes de canicules à l'été 2017 (Otto et al., 2017). Les conclusions principales de l'étude sont les suivantes :

- « Une chaleur record s'est abattue sur la majeure partie de l'Europe occidentale en juin 2017, envoyant **les températures moyennes mensuelles d'environ 3°C au-dessus de la normale (1981-2010)** » ;
- « Les auteurs ont constaté que le changement climatique rendait l'intensité et la **fréquence de cette chaleur extrême au moins deux fois plus probables en Belgique, au moins quatre fois plus probables en France, en Suisse, aux Pays-Bas et dans le centre de l'Angleterre et au moins 10 fois plus probables au Portugal et en Espagne** ».

1.6. Réchauffement actuel et projections climatiques à différentes échelles

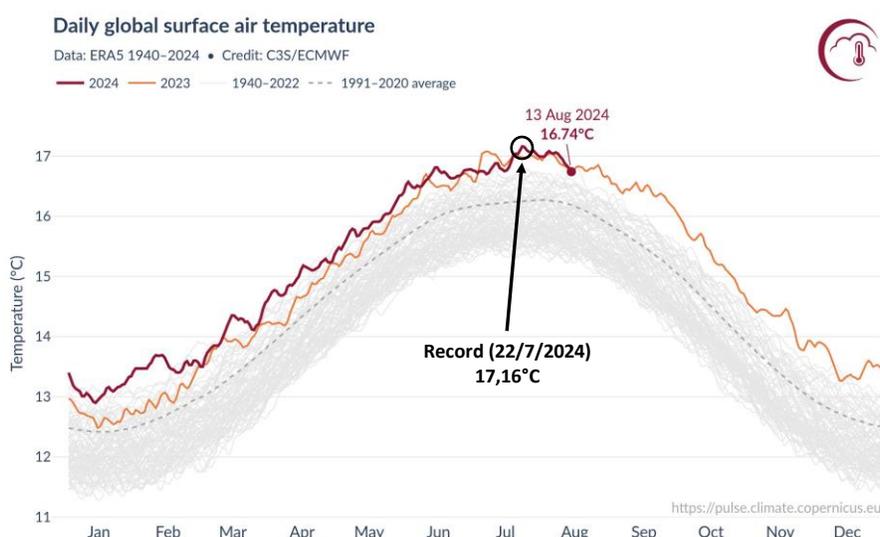


Figure 15 (C3S, 2024) – Record de température globale journalière mesuré le 27/7/2024.

Comme évoqué dans l'introduction, le climat mondial s'est déjà réchauffé de 1,1°C depuis la période 1850-1900 et ce réchauffement n'est pas uniforme sur les différentes régions du monde, que ce soit en termes de variations des températures ou de précipitations (IPCC, 2021), comme l'indiquait la figure 1. Le réchauffement global s'amplifiera tant que les émissions de GES continueront. **Le 22 juillet 2024, le record de température globale journalière a d'ailleurs été une nouvelle fois battu, atteignant 17,16°C (figure 15), et risque d'être régulièrement mis à jour à l'avenir.**

Pour clôturer ce chapitre faisant l'état des lieux de la modélisation climatique, cette section parcourt brièvement la littérature scientifique pour extraire **(i)** les niveaux de réchauffement déjà actés à des échelles régionales et locales (européenne, nationale et au niveau de la Région wallonne) ; **(ii)** les modélisations futures concernant les températures et les précipitations à ces mêmes échelles.

1.6.1. Niveaux de réchauffement actuels à différentes échelles

Dans son rapport *European State of the Climate 2023*, le *Copernicus Climate Change Service* (C3S) indique que le **continent européen s'est réchauffé environ deux fois plus vite que le reste du monde : +2,3°C à l'échelle européenne, contre 1,3°C au niveau mondial, prenant en compte la moyenne des 5 dernières années par rapport à la période 1850-1900** (C3S, 2023). Ce chiffre est une moyenne sur l'ensemble du continent et des disparités existent au sein du continent. La figure 16 illustre cette disparité territoriale pour l'année 2023.

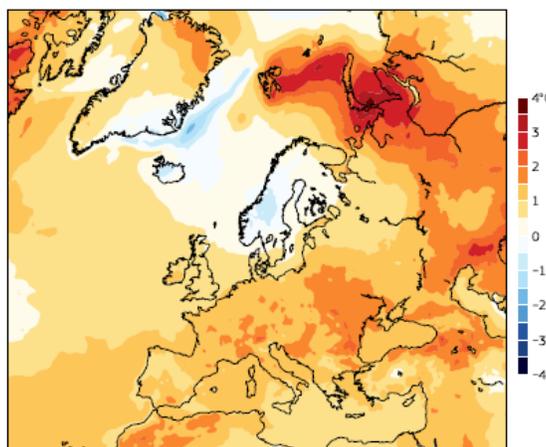


Figure 16 (C3S, 2023) – Anomalies moyennes de température de l'air en 2023 en Europe (°C) par rapport à 1850-1900.

En **Belgique**, dans son rapport climatique publié en 2020, l'**IRM indique que la température moyenne a augmenté de [1,8;1,9]°C** entre la période 1990-2019 par rapport à la période 1880-1909 (IRM, 2020). Le territoire montre également des disparités territoriales, le réchauffement étant dans la fourchette [0,27;0,33]°C par décennie depuis 1954, selon les régions (figure 17).

L'IRM précise que « l'analyse des longues séries d'observations climatologiques à Saint-Josse-ten-Noode/Uccle et dans le pays montre depuis 1981 plusieurs évolutions significatives. De manière générale, les tendances sont beaucoup moins marquées pour les précipitations que pour les températures. **Cela peut s'expliquer en partie par la très grande variabilité des précipitations dans nos régions d'une année à l'autre** » (IRM, 2020).

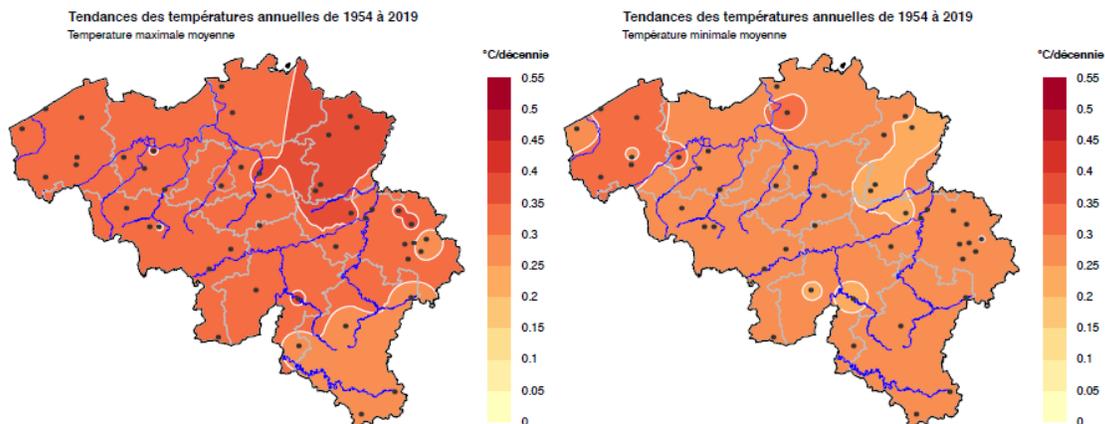


Figure 17 (IRM, 2020, figure 1.26) – Changements observés (en °C par décennie) dans les températures annuelles moyennes maximales (gauche) et minimales (droite) sur la période 1954-2019, d'après les tendances linéaires.

En Région wallonne, Fettweis et al. (2023) indiquent que la **température a augmenté en moyenne de 1,3°C sur la période 1980-2010 par rapport à la période 1850-1900.**

L'ensemble de ces études indiquent les mêmes tendances pour la Belgique pour l'évolution du climat jusqu'à aujourd'hui : une **augmentation des températures moyennes, minimales et maximales ainsi qu'une augmentation des cumuls de précipitations, de l'ordre de 15 % au niveau belge (IRM, 2020).** Elles renforcent davantage la nécessité de caractériser les changements climatiques à l'échelle locale pour élaborer des politiques d'adaptation adéquates.

Le détail de ces analyses et d'autres indicateurs sont disponibles dans chacune des études mentionnées.

1.6.2. Projections pour les températures et précipitations à différentes échelles

Afin de caractériser les variations futures à l'échelle régionale, le GIEC produit des *Regional Fact Sheets* pour 11 régions du monde qui sont des regroupements de plus petites zones (figure 18, gauche). La *fact sheet* pour l'Europe regroupe 4 zones (figure 18, droite) dont la zone WCE (*Western & Central Europe*) à laquelle la Belgique appartient. Cette *fact sheet* est basée sur des

modélisations régionales au sein de l'initiative EURO-CORDEX regroupant 40 modèles climatiques, et informent des changements clés modélisés, principalement pour les variations de température et de précipitations. Un atlas librement accessible en ligne⁵ permet également de consulter les analyses chiffrées et détaillées.

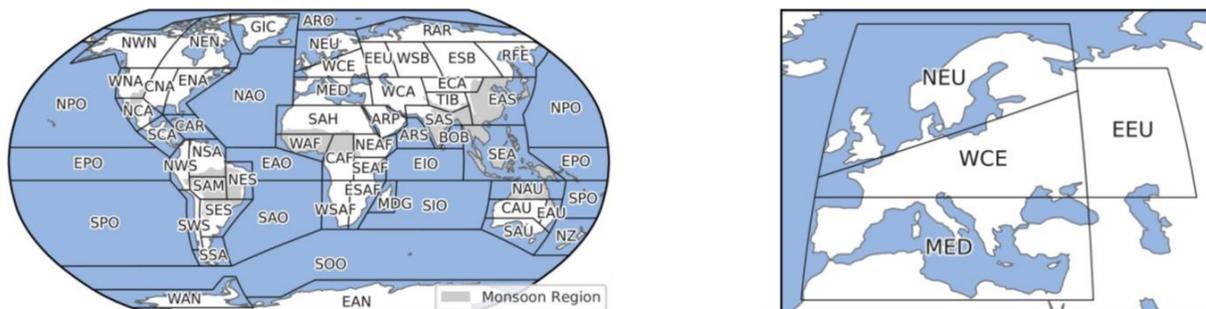


Figure 18 (IPCC, 2021, Fact Sheet Europe) – Découpage régional pour les modélisations régionales et l'élaboration des facts sheets. Découpage à l'échelle du monde (gauche) et de l'Europe (droite).

La figure 19 synthétise les variations de températures et de précipitations modélisées pour trois niveaux de réchauffement global⁶ (+1,5°C, +2°C et +4°C) au cours de deux saisons, l'été (JJA) et l'hiver (DJF), par rapport à la période de référence 1995-2014 et non la période préindustrielle (1850-1900).

Pour les températures (figure 19), les tendances sur les deux saisons sont au réchauffement et s'amplifient de concert avec le niveau de réchauffement global. La Belgique semble se trouver dans une zone comprise entre deux zones qui semblent se réchauffer davantage : la Scandinavie et la zone Arctique au Nord, et le pourtour méditerranéen au Sud.

Pour les précipitations (figure 19), la tendance varie pour l'hiver (augmentation) et pour l'été (diminution). À nouveau, ces tendances s'amplifient avec le niveau de réchauffement global. La localisation de la Belgique, à proximité directe de la zone NEU (*Northern Europe*), peut être génératrice d'incertitudes en été en raison de cette position comprise entre 2 tendances différentes : une augmentation des précipitations au Nord et une diminution au Sud.

⁵ L'atlas est accessible via le lien suivant : <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

⁶ Le concept de niveau de réchauffement global (Global Warming Level – GWL) est développé dans la section 2.3 de la méthodologie.

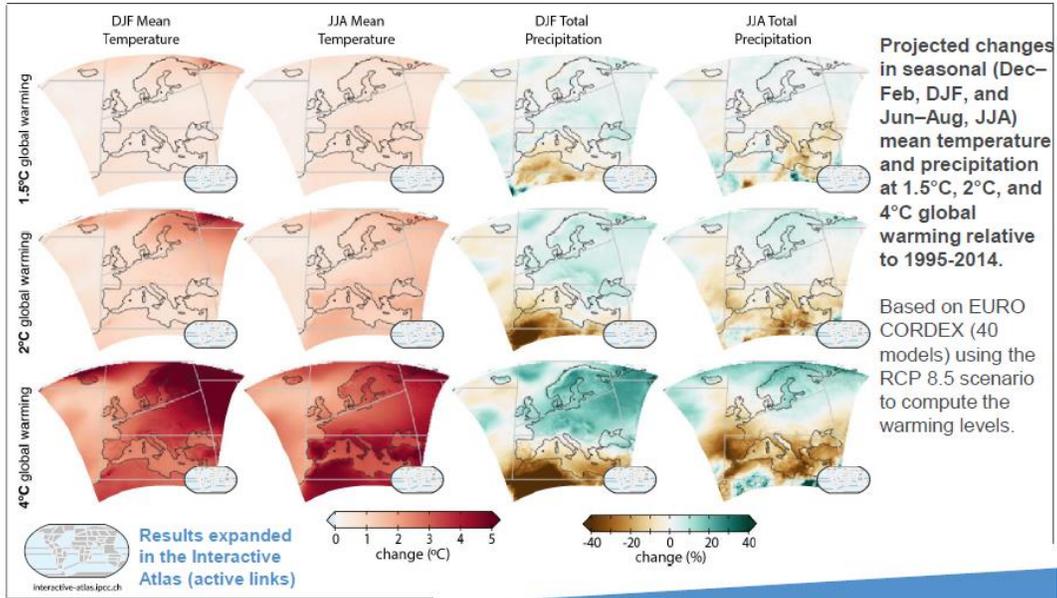


Figure 19 (IPCC, 2021, Fact Sheet Europe) – Évolution des températures (gauche) et des précipitations (droite) pour l'hiver (DJF) et l'été (JJA), par rapport à la période 1995-2014.

Ensuite, les résultats de l'initiative CORDEX.be (décrite en section 1.4.1), consolidés au sein de l'initiative CICADA.be (Van Schaeybroeck et al., 2021), permettent également d'analyser des tendances au niveau du territoire belge et d'affiner les conclusions précédentes au niveau européen : **des températures moyennes, minimales et maximales en augmentation avec des augmentations plus importantes en été (figure 20), des précipitations plus importantes en hiver, des étés plus secs, des vagues de chaleur plus fréquentes et plus longues.** Dans son rapport climatique, l'IRM confirme ses tendances : un réchauffement des températures moyennes compris entre 0,7°C et 5°C d'ici la fin du siècle (avec une augmentation plus importante en été qu'en hiver), des hivers plus humides et davantage de jours de fortes précipitations (IRM, 2020).

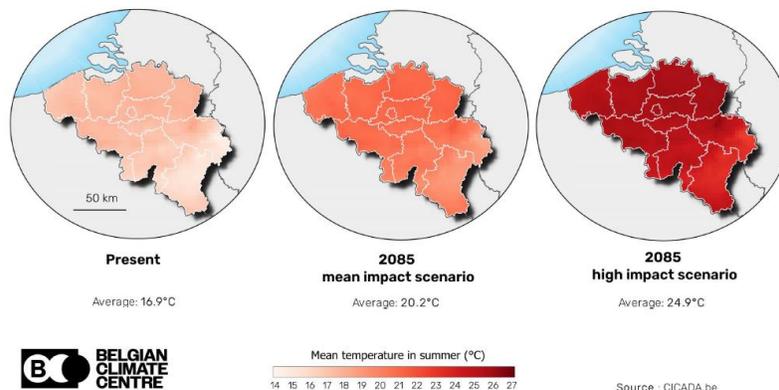


Figure 20 (Van Schaeybroeck et al., 2021) – Évolution des températures moyennes en Belgique, en 2085 et en été pour un scénario de réchauffement moyen (centre) et élevé (droite).

Finalement, les simulations de Fettweis et al. (2023) indiquent des **tendances significatives** pour les **indicateurs de température** au niveau de la Région wallonne : des températures journalières moyennes, minimales et maximales supérieures quelle que soit la saison avec une augmentation plus importante en été, moins de jours de gel, plus de jours d'été, davantage de jours de vigilance canicule et de vagues de chaleur de différentes durées (figure 21).

		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

Figure 21 (Fettweis et al., 2023) – Résultats moyennés sur la Wallonie par degré de réchauffement global pour les indicateurs relatifs aux vagues de chaleur et au nombre de jours de vigilance canicule (changement +/- écart-type). En rouge, plus chaud que la période de référence 1981-2010. Case grisée : changement non significatif.

Pour les **précipitations**, les résultats concordent avec les observations précédentes mais sans être significatifs : une augmentation des cumuls annuels et saisonniers, à l'exception de l'été, ainsi que des variations du nombre de jours de précipitations, de fortes précipitations et de très fortes précipitations en fonction des saisons.

Le détail de ces analyses et d'autres indicateurs sont disponibles dans chacune des études mentionnées.

2. MÉTHODOLOGIE

Après avoir réalisé un état des lieux des avancées de la modélisation climatique aux échelles globale, régionale et locale, ce chapitre est dédié à l'approche méthodologique mise en place pour la réalisation et l'interprétation de modélisations climatiques de haute résolution (*H-Res*) sur le territoire de Charleroi Métropole. Cette étude ne comporte pas l'utilisation de modèles d'impacts locaux spécifiques (LIM). Ceci pourrait faire l'objet d'études ultérieures.

Le présent chapitre décrit :

- la sélection du RCM et des ESM ainsi que leur validation ;
- la sélection des scénarii d'émissions de GES ainsi que leur équivalent en degrés de réchauffement global ;
- la sélection de la période de référence et de la période d'étude ;
- la sélection et la description de la zone d'étude ;
- la sélection des variables et indices analysés, ainsi que leur traitement et l'interprétation des données générées.

Pour rappel, la méthodologie développée doit pouvoir répondre à la question de recherche suivante : « Comment le climat de Charleroi Métropole évoluera-t-il localement en fonction de l'évolution des températures à l'échelle mondiale ? »

2.1. Modèle MAR et validation

Le modèle régional utilisé dans la présente étude est la dernière version 3.14 du modèle MAR (*Modèle Atmosphérique Régional*) développé par le Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie de l'Université de Liège. Dans le cadre de l'étude, il est utilisé à haute résolution.

Description

Initialement développé pour l'étude des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, le modèle MAR a été adapté pour simuler le climat des régions tempérées comme la Belgique (Doutreloup, 2022) et les régions tropicales. Les principes généraux sont les suivants (Denis, 2023) :

- MAR est un modèle hydrostatique (représentant les variables climatiques en niveaux de pression), décrit dans Gallée et Schayes (1994) ;
- le schéma convectif est décrit dans Bechtold et al. (2001) ;
- la dynamique atmosphérique est décrite dans Gallée et Schayes (1994), et Gallée et al. (1995) ;

- MAR est couplé au modèle SISVAT (Soil Ice Snow Vegetation Atmosphere Transfer) pour le transfert unidimensionnel végétation-atmosphère, décrit dans Ridder et Gallée (1998) ;
- le modèle SISVAT est couplé au modèle neigeux CROCUS pour la partie neige-glace, décrit dans Brun et al. (1992).

Le fonctionnement du modèle est décrit avec davantage de précisions dans Kittel (2021) et représenté dans la figure 22.

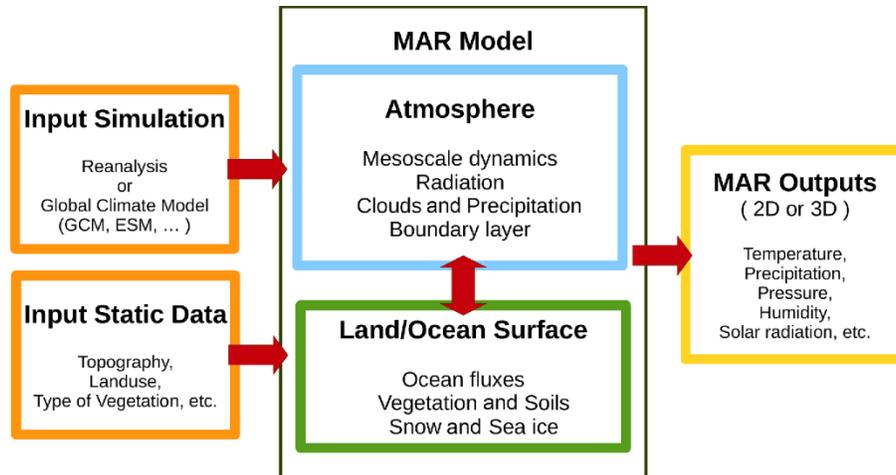


Figure 22 (Doutreloup, 2022) - Fonctionnement du modèle MAR. Le modèle MAR (cadre noir) doit être forcé par des réanalyses ou un modèle global (case orange supérieure) et par des données statiques (case orange inférieure). Le résultat de la simulation MAR donne des variables météorologiques en deux ou trois dimensions (cadre jaune).

Utilisation

Selon le site de l'ULiège (s.d.), le modèle MAR est utilisé pour analyser :

- l'évolution du climat et du bilan de masse des calottes glaciaires dans les régions polaires ;
- les prévisions météorologiques en Belgique ;
- les changements d'enneigement dans les Alpes et, plus généralement, en Europe ;
- les changements de végétation en Afrique grâce à la régionalisation des scénarii climatiques.

À titre d'exemple, la section ci-dessous reprend une série d'études réalisées à l'aide du modèle MAR. Il est également utilisé dans de nombreux travaux de fin d'étude comme : « Détermination d'un indice de sécheresse atmosphérique des forêts en Belgique » qui a remporté le prix SPORCK (Baudewijn, 2023), « Juillet 2021 vu par le modèle MAR » (Denis, 2023), « Développement d'un outil opérationnel de prévision d'apparition de gel printanier dans un vignoble wallon, à l'aide du modèle MAR » (Louis, 2023).

Études de référence réalisées à l'aide du modèle MAR (liste non exhaustive)

- Wyard et al. (2017) où la version 3.6 du MAR est utilisée (résolution de 5 km) ;
- Fettweis et al. (2017) où la version 3.7 du MAR est utilisée (résolution de 5 km) ;
- Doutreloup et al. (2019) où la version 3.9 du MAR est utilisée (résolution de 10 km) ;
- Kittel (2021) où la version 3.11 du MAR est utilisée (résolution de 35-50 km) ;
- Doutreloup et al. (2022) où la version 3.11.4 du MAR est utilisée (résolution de 5 km) ;
- Fettweis et al. (2023) où la version 3.14 du MAR est utilisée (résolution de 5 km).

Intégration aux initiatives internationales et nationales

Depuis l'adaptation du modèle MAR au climat belge dans sa version 3.6 (Wyard et al., 2017), il a été utilisé notamment pour réaliser des projections climatiques à l'échelle de la Belgique dans le cadre de l'initiative CORDEX.be et sa dernière version (3.14) est utilisée dans la mise à jour CORDEX.be II (IRM, s.d. b).

Il contribue également à l'initiative EURO-CORDEX avec deux objectifs principaux : **(i)** contribuer à l'amélioration continue des modèles climatiques régionaux et **(ii)** évaluer sa performance en comparaison avec les autres modèles régionaux impliqués dans l'initiative (Scholzen & Fettweis, 2016). Dans le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2021), le modèle MAR est mentionné dans les modèles contribuant aux études menées par CORDEX.

Configuration dans le cadre de la présente étude

- Résolution spatiale : 5 km, c'est-à-dire un pixel de 5 km de côté (25 km² de surface) ;
- Résolution temporelle : 1 heure (données horaires). Les données horaires ont ensuite été converties en données journalières pour faciliter le traitement des variables étudiées dans le cadre de cette étude (voir section 2.6.4).

Validation du modèle MAR sur le climat présent

Quelle est la capacité du modèle MAR à reproduire le climat en Région wallonne ? C'est la question posée par Fettweis et al. (2023) pour le diagnostic de vulnérabilités de la Wallonie commandé par l'AwAC (voir section 1.4.4). Afin de tester les capacités du modèle MAR à reproduire le climat passé, les observations de l'IRM provenant de stations météorologiques belges ont été comparées aux simulations produites par MAR forcé par les réanalyses ERA⁷.

⁷ ERA est la représentation la plus fiable de l'atmosphère depuis 1940

Sur la période 2010-2020, 3 statistiques (la corrélation, le biais standardisé et le RMSE) ont été calculées sur plusieurs variables de température et de précipitations pour évaluer la capacité du modèle MAR à reproduire les observations. Il en ressort que le modèle MAR (voir tableau en annexe 2) :

- est très **performant pour représenter la température moyenne et maximale journalière sur la Wallonie (corrélation > 0.9 et biais standardisé proche de 0)**. Néanmoins, MAR sous-estime la température maximale pour toutes les saisons mais les biais standardisés ne sont pas significatifs. En climatologie, le biais standardisé est significatif pour des valeurs ≥ 1 (Fettweis et al., 2023) ;
- **surestime la température minimale journalière** (corrélation comprise entre 0,77 en été et 0,88 en hiver) sans que les biais ne soient significatifs ;
- **évalue correctement les précipitations à l'échelle saisonnière (biais standardisé faible) mais une corrélation plus faible (entre 0,57 et 0,65) selon les saisons indique que les précipitations générées ne sont pas synchronisées avec les observations**. Ceci est cohérent avec les incertitudes des modélisations climatiques évoquées au chapitre 1.

Un autre argument pour l'utilisation du modèle MAR est qu'il est actuellement l'unique RCM traitant les données climatiques les plus récentes (CMIP6) pour la Belgique. Les autres RCM utilisés dans CORDEX.be II (ALARO et COSMO) ne feront de même qu'en 2025 (Fettweis et al., 2023).

Tout en prenant en compte l'ensemble de ces remarques dans les futures conclusions, la capacité du modèle MAR forcé par ERA à reproduire le climat observé est donc jugée suffisante sans devoir réaliser une analyse similaire à l'échelle de Charleroi Métropole.

2.2. Sélection des ESM et validation des couples MAR-ESM

Sélection des ESM

Une fois le modèle MAR sélectionné et validé pour le climat présent, il convient de choisir les modèles globaux qui vont forcer MAR pour réaliser les projections sur le climat futur à l'échelle de Charleroi Métropole. Dans un souci de cohérence avec les initiatives de modélisation belges, la méthodologie de sélection des ESM de cette étude est inspirée de celle développée pour CORDEX.be II (Termonia et al., 2024). Le cheminement méthodologique est résumé ci-dessous.

Dans son dernier rapport (AR6), le GIEC se base sur l'initiative internationale CMIP6 regroupant plus de 60 GCM/ESM⁸, et 24 RCM issus de l'initiative CORDEX. Ces modèles requièrent une puissance de calcul très importante et des délais conséquents, qui rendent leur combinaison globale techniquement impossible dans un délai raisonnable. Par conséquent, une sélection d'un sous-ensemble d'ESM est effectuée pour ne retenir que les modèles qui répondent à certains critères (Termonia et al., 2024). Ces critères sont :

- leur **capacité à simuler le climat passé et présent** via des comparaisons avec les observations ;
- la **sensibilité climatique** des ESM. Cette notion renvoie à l'augmentation de température liée à un doublement de la concentration de CO₂. Les projections des températures de long terme peuvent donc être très différentes entre ESM (figure 23). Plusieurs ESM sont généralement sélectionnés pour prendre en compte l'incertitude des modélisations et les scénarii extrêmes : des ESM dits « plus chauds » ou « plus froids » et des ESM dits « plus humides » ou « plus secs » que les autres ;
- des **considérations pratiques** de compatibilité entre les données nécessaires pour les RCM et les données produites par les ESM. Le modèle MAR est compatible avec l'ensemble des ESM.

Sobolowski et al. (2023), dans le cadre d'EURO-CORDEX, ont établi une série de recommandations pour la sélection des ESM pour des modélisations climatiques sur le territoire européen. Ces recommandations sont partiellement suivies par l'initiative CORDEX.be II en adaptant ces recommandations pour le territoire belge avec un intérêt particulier pour les événements extrêmes (canicules et fortes précipitations).

⁸ Dans un souci de simplicité, le terme ESM sera utilisé dans la suite du document pour regrouper les termes GCM et ESM.

FAQ 7.3: Equilibrium climate sensitivity and future warming

Equilibrium climate sensitivity measures how climate models respond to a doubling of carbon dioxide in the atmosphere.

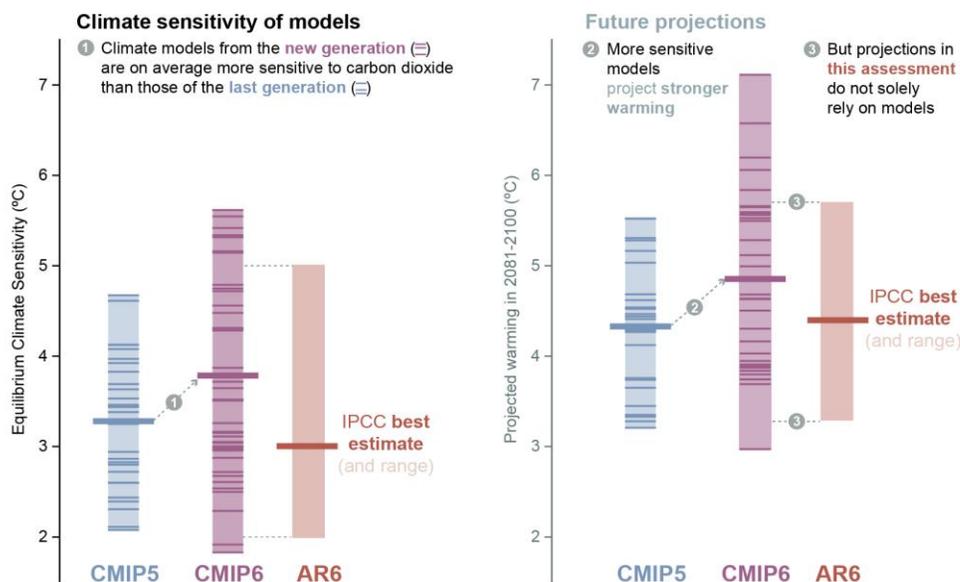


Figure 23 (IPCC, 2021, FAQ 7.3) – Comparaison de la sensibilité climatique (gauche) et des projections de long terme de réchauffement global (droite) pour les modèles de la génération actuelle (CMIP6) et de la génération précédente (CMIP5). La dernière évaluation du GIEC est également représentée (AR6). Les lignes horizontales épaisses représentent la moyenne multimodèle et les lignes horizontales fines représentent les résultats des modèles individuels.

Des 9 ESM pertinents pour le territoire européen (Sobolowski et al., 2023), 3 sont exclus (FGOALS-g3, MIROC-ES2L et NorESM2-LM) par CORDEX.be II pour leur incapacité à reproduire les fréquences d'apparition des différents types de « météo » (anticyclones et dépressions) sur la Belgique (Termonia et al., 2024). Ensuite, pour la présente étude, le modèle CNRM-CM6-1-HR n'a pas été retenu car il est principalement retenu par CORDEX.be II pour des considérations pratiques de compatibilité avec le RCM ALARO-0. Les 5 ESM retenus pour cette étude sont mentionnés dans le tableau 1 pour leur respect des recommandations d'EURO-CORDEX et/ou leur capacité à produire des événements extrêmes de chaleur et de précipitations. La sensibilité climatique multimodèles évaluée par le GIEC étant d'environ 3°C (figure 23), les modèles sélectionnés pour cette étude et leur sensibilité climatique respective permettent d'avoir une première approximation de l'incertitude de l'ensemble des ESM (CMIP6) sans devoir tous les utiliser (Doutreloup, 2022). En effet :

- le modèle MPI est aligné sur la sensibilité climatique moyenne de l'ensemble des ESM: environ 3°C (AR6 sur la figure 23) ;
- les modèles CMCC et EC3 sont plus « chauds » : respectivement 3,52°C et 4,31°C ;
- les modèles MIR ET NOR sont plus « froids » : respectivement 2,61°C et 2,50°C.

ESM	Référence	Sensibilité climatique	Critère de Sélection	Abréviation-Pays d'origine
CMCC-CM2-SR5	Cherchi et al. (2019)	3,52 °C	EURO-CORDEX	CMCC–Italie
EC-Earth3-Veg	Döscher et al. (2021)	4,31 °C	Chaleur extrême	EC3–Suède
MPI-ESM1-2-HR	Gutjahr et al. (2019)	3,00 °C	EURO-CORDEX	MPI–Allemagne
NOR-ESM2-MM	Seland et al, (2020)	2,50 °C	EURO-CORDEX	NOR–Norvège
MIROC6	Tatebe et al. (2019)	2,61 °C	EURO-CORDEX	MIR–Japon

Tableau 1 – Sélection des ESM – Référence – Sensibilité climatique (Scafetta, 2021) – Critère de sélection (Termonia et al., 2024) – abréviation et pays d'origine

Validation des couples MAR-ESM

Cette section répond à la question suivante : quelle est la capacité des couples MAR-ESM à reproduire le climat observé ? Comme les ESM n'assimilent aucune observation du climat, leur performance est évaluée par rapport à leur capacité à reproduire le climat moyen, approximé par MAR forcé par ERA comme expliqué dans la section précédente.

Une étude des biais des simulations générées par les couples MAR-ESM par rapport aux données MAR-ERA a également été réalisée pour la Wallonie par Fettweis et al. (2023), sur la période de référence 1980-2010 et avec 6 ESM, dont 5 repris dans cette étude. Les résultats sont présentés en annexe 3 pour les températures et en annexe 4 pour les précipitations. Les conclusions sont les suivantes :

- **les biais standardisés significatifs sont rares pour les températures** : MAR-MIR présente des températures maximales trop élevées en été, MAR-CMCC simule trop de jours de vigilance canicule et trop de vagues de chaleur de 15 jours ;
- **les biais standardisés sont plus nombreux pour les précipitations** : MAR-CMCC, MAR-EC3 et MAR-NOR ne génèrent pas assez de précipitations en été, à des degrés de réchauffement différents, ce qui peut ensuite provoquer des biais pour le maximum de jours secs et le nombre de jours de pluie en été.

Bien que la période de référence (1980-2010) soit différente de celle utilisée dans la présente étude (1995-2014), cette étude des biais des couples MAR-ESM présente peu de biais par rapport à MAR-ERA, et est donc supposée transposable à l'échelle de Charleroi Métropole. **La capacité des couples MAR-ESM à reproduire le climat observé est donc jugée suffisante sans devoir réaliser une analyse similaire à l'échelle locale.**

2.3. Choix des scénarii et des niveaux de réchauffement

Cette section décrit le choix des scénarii climatiques et des niveaux de réchauffement utilisés dans le cadre de la présente étude. Ils sont résumés dans le tableau 2.

Scénarii d'émissions de GES et niveaux de réchauffement global sélectionnés				
Scénarii d'émissions retenus		Niveaux de réchauffement global par rapport à la période 1850-1900		
SSP3-7.0	SSP5-8.5	+ 2 °C	+ 3 °C	+ 4 °C

Tableau 2 – Scénarii d'émission (SSP) et de degrés de réchauffement globaux retenus.

2.3.1. Scénarii et niveaux de réchauffement : explications

La responsabilité des émissions de GES dans le changement climatique en cours est aujourd'hui sans équivoque (IPCC, 2021). Étant donné la relation quasi-linéaire entre ces émissions et le niveau de réchauffement (figure 24), la plus grande incertitude lors de projections climatiques futures est la quantité de GES qui sera émise à l'avenir : « *les risques physiques associés au changement climatique résultent des impacts causés par les phénomènes météorologiques et climatiques dont la fréquence et l'intensité sont modifiées par le changement climatique. Ces phénomènes, dits aléas climatiques, peuvent être des événements extrêmes ou des évolutions progressives, et l'ampleur de leur évolution dépendra des émissions futures de gaz à effet de serre (GES)* » (Carbone 4, 2022 ; Termonia et al., 2024).

Pour la mise en place de politiques d'adaptation d'un territoire, les projections climatiques et l'utilisation de scénarii sont indispensables pour identifier les zones, les processus et les populations les plus exposées aux aléas. L'ambition de ces projections n'est pas de prédire « la météo » au jour près dans un lieu précis, mais d'estimer la fréquence d'apparitions de certains changements et d'évènements extrêmes. Ne pas intégrer ces approches aux processus de décisions signifie sous-estimer une série de risques croissants (Carbone 4, 2022).

Pour décrire un nombre restreint de scénarii, les auteurs du GIEC ont établi 5 scénarii d'émissions appelés les *Shared Socio-economic Pathways* (SSP) dans le dernier rapport (AR6). Ceux-ci décrivent différentes trajectoires de développement socio-économiques. Précédemment (AR5 publié en 2013), les scénarii établis étaient les *Representative Concentration Pathways* (RCP) qui se focalisaient davantage sur les scénarii de concentrations de GES dans l'atmosphère pour les études d'impacts. Ces deux approches sont complémentaires et leur utilisation diffère en fonction de l'objectif de recherche poursuivi.

Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)

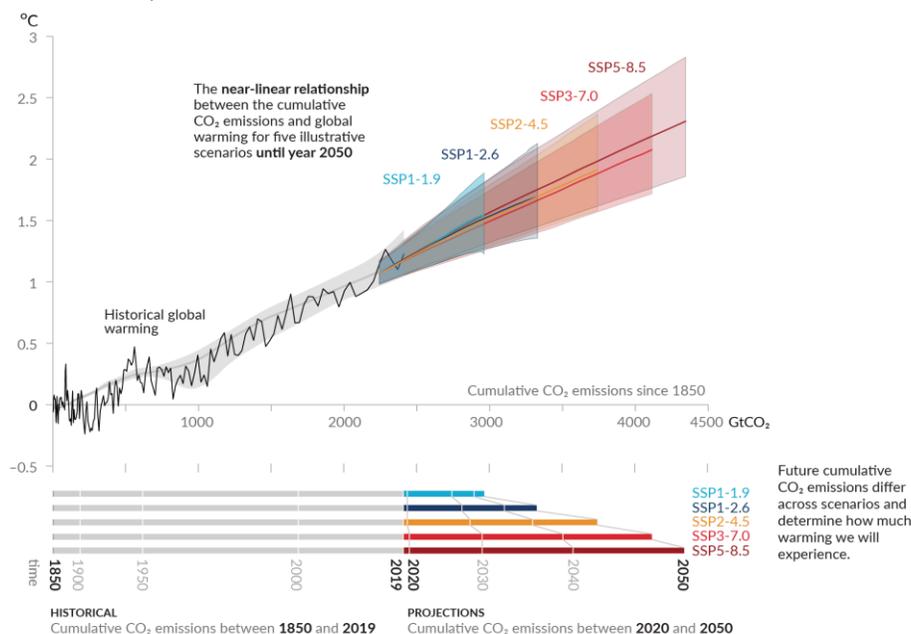


Figure 24 (IPCC, 2021, SPM.10) – Relation quasi-linéaire entre les émissions cumulées de CO₂ et l'augmentation de la température mondiale à la surface. Panneau supérieur : les données historiques (fine ligne noire) montrent l'augmentation observée de la température de surface mondiale en °C depuis 1850-1900 en fonction des émissions historiques cumulées de dioxyde de carbone (CO₂) en GtCO₂ de 1850 à 2019. La plage grise avec sa ligne centrale montre une estimation correspondante du réchauffement historique de la surface d'origine humaine. Les zones colorées montrent la plage très probable évaluée des projections de températures de surface mondiales, et les lignes centrales colorées épaisses montrent l'estimation médiane en fonction des émissions cumulées de CO₂ de 2020 à 2050 pour l'ensemble de scénarii (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5)

Les auteurs de Carbone 4 (2022) synthétisent les SSP de la façon suivante :

- « les **SSP1** et **SSP5** envisagent des tendances relativement optimistes pour le développement humain, avec des investissements substantiels dans l'éducation et la santé, une croissance économique rapide et des institutions qui fonctionnent bien. Cependant, le SSP5 suppose une économie à forte intensité énergétique et basée sur les combustibles fossiles, alors que la SSP1 prévoit une évolution croissante vers des pratiques durables » ;
- « les **SSP3** et **SSP4** envisagent des tendances de développement plus pessimistes, avec peu d'investissements dans l'éducation ou la santé, une croissance démographique rapide et des inégalités croissantes. Dans le SSP3, les pays donnent la priorité à la sécurité régionale, tandis que dans le SSP4, les grandes inégalités au sein des pays et entre pays dominant, conduisant dans les deux cas à des sociétés qui sont hautement vulnérables au changement climatique » ;

- « le scénario **SSP2** envisage une trajectoire intermédiaire dans laquelle les tendances se poursuivent sans déviations substantielles ».

Ces scénarii socio-économiques sont alors transformés en courbes d'émissions de GES jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle. Ces évolutions temporelles d'émissions de GES sont utilisées comme données d'entrée dans les modèles climatiques qui produisent alors des projections climatiques à 2100 (figure 25). Dans « SSPX-Y », X est le numéro du scénario et Y est le niveau de forçage radiatif⁹ estimé à la fin du siècle, exprimé en W/m².

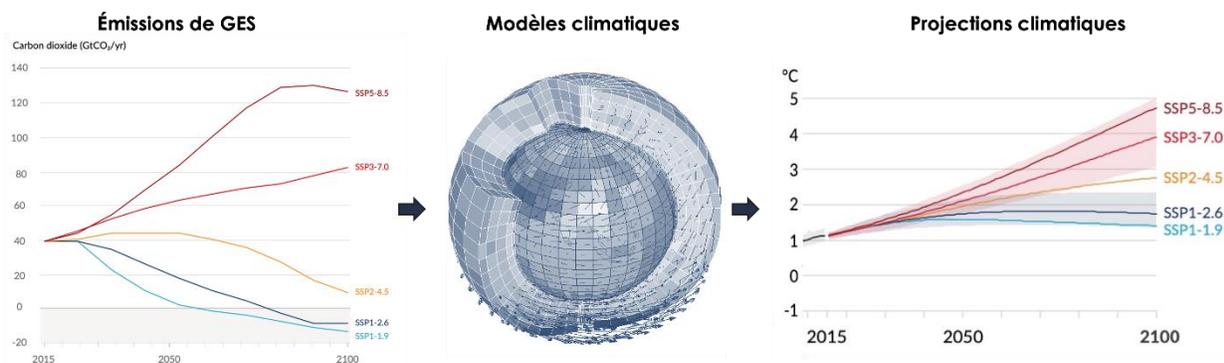


Figure 25 (Carbone 4, 2022). Les scénarii SSP et les émissions de GES correspondantes (gauche) sont intégrés dans les modèles climatiques (centre) qui génèrent des projections climatiques (droite). Figure adaptée: gauche-droite (IPCC, 2021) ; centre (IPSL, s.d.)

	Court terme 2021-2040	Moyen terme 2041-2060	Long terme 2081-2100
SSP1-1.9	1,5	1,6	1,4
SSP1-2.6	1,5	1,7	1,8
SSP2-4.5	1,5	2,0	2,7
SSP3-7.0	1,5	2,1	3,6
SSP5-8.5	1,6	2,4	4,4

Tableau 3 (Carbone 4, 2022) – Réchauffement global estimé par période (court, moyen et long terme) et par scénario SSP

Chaque modèle est ainsi forcé avec les scénarii d'émissions de GES pour produire des niveaux de réchauffement (figure 25 et tableau 3). « Inversement, chaque scénario de GES peut donc être associé à des niveaux de réchauffement (Global Warming Level – **GWL**) potentiels en fonction des résultats des simulations à des horizons donnés » (Carbone 4, 2022). C'est cette dernière approche qui est de plus en plus retenue par la communauté scientifique, car elle permet, à l'aide des RCM, d'explorer à quel climat régional on peut s'attendre dans un monde globalement plus chaud de 1°C, 2°C, 3°C ou 4°C, indépendamment de la période où cela se produirait en

⁹ Le forçage radiatif « mesure l'impact de certains facteurs affectant le climat sur l'équilibre énergétique du système couplé Terre/atmosphère. Le terme « radiatif » est utilisé parce que ces facteurs modifient l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère. Cet équilibre radiatif contrôle la température à la surface de la planète. Le terme forçage est utilisé pour indiquer que l'équilibre radiatif de la Terre est en train d'être déstabilisé » (IPCC, 2007, FAQ 2.1)

fonction des SSP qui ont trajectoires fixes dans le temps. Cette approche par GWL permet d'identifier la nature et l'intensité des adaptations requises pour chaque niveau de réchauffement global. Finalement, dans le meilleur des cas, cette approche fournit des incitants supplémentaires pour réduire les émissions de GES et éviter des niveaux de réchauffement supérieurs. **Les différents scénarii SSP peuvent donc être considérés comme des trajectoires qui passent par différents niveaux de réchauffement à différentes périodes (Termonia et al., 2024).** Ceci est illustré sur la figure 26 où l'on constate que :

- un réchauffement global de +2°C est atteint pour les scénarii SSP 2, 3 et 5 à des périodes différentes, approximativement autour de la période 2040-2050 ;
- un réchauffement global de +3°C est atteint pour les SSP 3 et 5 à des périodes différentes, approximativement autour de la période 2065-2075 ;
- un réchauffement global de +4°C est atteint pour le SSP 5 uniquement, approximativement autour de 2085-2090.

Une fois que les SSP et les niveaux de réchauffement globaux pertinents pour l'étude seront sélectionnés, il sera nécessaire de (Fettweis et al., 2023) :

- définir les périodes de 20 ans où les niveaux de réchauffement global sont atteints par rapport à la période 1850-1900 par chaque ESM sélectionné (voir section 2.4) ;
- calculer la période moyenne pour chaque niveau de réchauffement global pour l'ensemble des ESM sélectionnés, à titre indicatif.

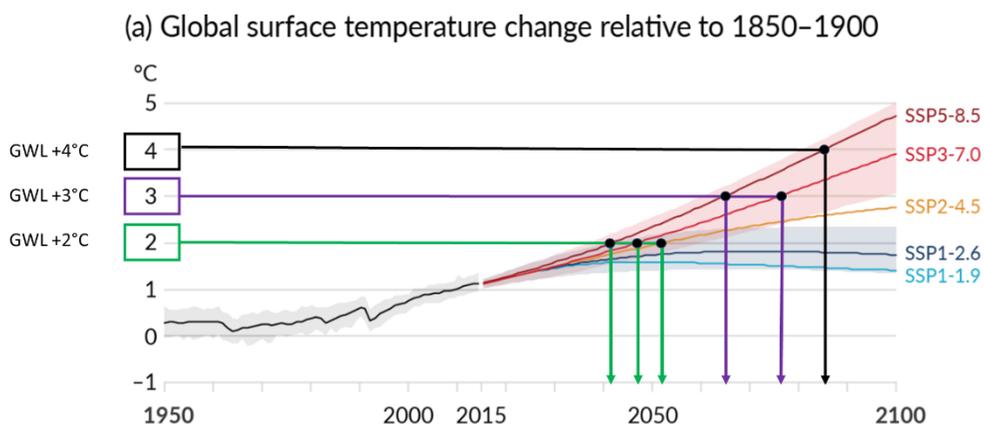


Figure 26 (adaptée à partir de Termonia et al., 2024) – Illustration des scénarii SSP et des moments auxquels ils atteignent un niveau de réchauffement global de +2°C, +3°C et +4°C. Graphique original à partir de IPCC (2021).

Les niveaux de réchauffement globaux, correspondant donc à ces périodes calculées, serviront ensuite de référence dans la suite de l'étude, en mesurant l'évolution des variables climatiques à l'échelle locale sur ces mêmes périodes, grâce au MAR forcé par les ESM sélectionnés.

Exemple : quand le réchauffement global est de +3°C sur la période 2065-2085, l'évolution des températures sur Charleroi Métropole est de X °C sur cette même période.

2.3.2. Scénarii et niveaux de réchauffement : sélection

Pour des aspects pratiques de puissance de calcul, de réalisme sur les futurs possibles et de clarté dans les informations transmises, une sélection parmi les SSP et GWL doit être réalisée.

Sélection des SSP

Selon le Climate Action Tracker (2023), mis à jour en décembre 2023, l'augmentation des températures sera de +2,5°C [2,0°C ;3,0°C] si chaque état respecte ses engagements, alors que les actions actuellement mises en œuvre mènent à un réchauffement de +2,7°C [2,2°C;3,4°C] (figure 27).

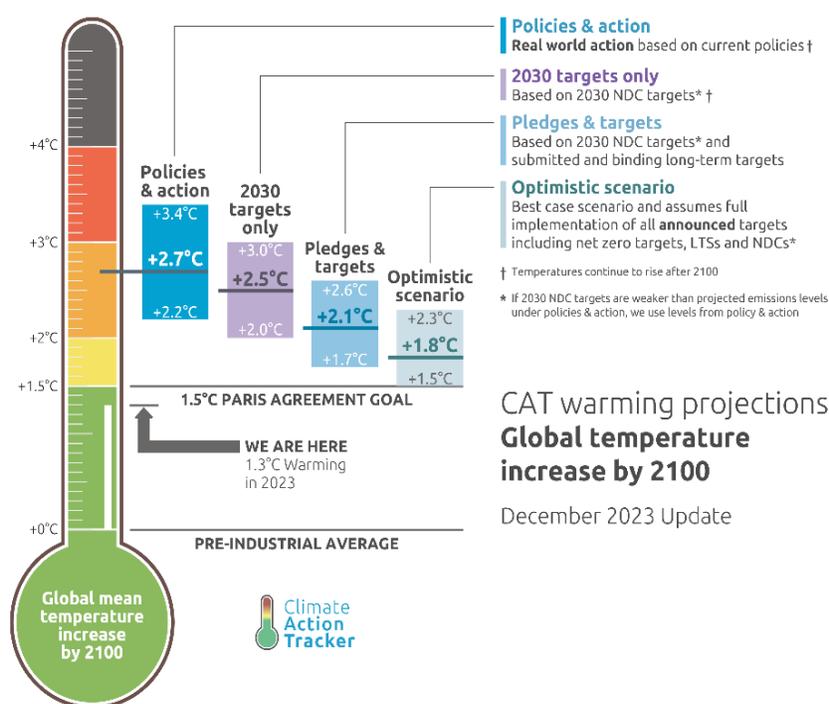


Figure 27 (Climate Action Tracker, 2023) – Projections du réchauffement climatique en fonction du niveau de respect des engagements. Pour chaque scénario, les boîtes de couleurs fournissent un minimum et un maximum ainsi que la valeur médiane.

Or, dans la synthèse du dernier rapport du GIEC (IPCC, 2023), il est indiqué que les émissions de GES actuelles dépassent les engagements (*implementation gap*) et que sans un renforcement des politiques et actions actuelles, un réchauffement de +3,2°C [2,2°C;3,5°C] est à prévoir d'ici la fin du siècle. Cette dernière fourchette est pratiquement similaire à celle du Climate Action Tracker. Ce réchauffement estimé de +3,2°C est intermédiaire au SSP2 et au SSP3 qui correspondent respectivement à +2,7°C et +3,6°C d'ici la fin du siècle (voir tableau 3). Si les politiques climatiques s'intensifient à l'échelle mondiale, le scénario SSP2

deviendra plus réaliste. Par contre, un désengagement des états nous mènerait davantage vers le scénario SSP3 (Fettweis et al., 2023). Pour ces raisons, les GWL de +2°C et +3°C sont retenus pour cette étude.

Il est important de remarquer que seul le scénario SSP5 mène à un réchauffement de +4°C (figure 26). Bien qu'une littérature croissante décrit ce scénario comme non réaliste, par exemple dans Scafetta (2024), il reste pertinent pour explorer le « scénario du pire », comme dans l'étude commandée par l'AwAC (Fettweis et al., 2023). Le scénario d'un réchauffement global de +4°C est donc retenu pour la présente étude. Il n'est par exemple pas retenu dans l'initiative CORDEX.be II (Termonia et al., 2024) pour les raisons évoquées ci-dessus. Néanmoins, les auteurs indiquent qu'un scénario bien supérieur à +3°C n'est pas impossible en raison de certains « points de bascule non linéaires » non modélisés par les ESM qui peuvent avoir des impacts globaux majeurs (ex : un ralentissement important ou arrêt du Gulf Stream ; ou la transformation de la forêt amazonienne en savane).

À l'instar de Fettweis et al. (2023), le scénario SSP2 n'est pas retenu et le scénario SSP3 est privilégié, car il atteint un GWL de +2°C plus tôt que SSP2 (figure 26), ce qui permet d'anticiper les mesures d'adaptation dans le temps et de se préparer à un GWL de +3°C à l'échelle mondiale.

Pour les GWL inférieurs, le climat s'étant déjà réchauffé de +1,1°C par rapport à l'ère industrielle (IPCC, 2021) et étant donné les scénarii SSP les plus probables, les GWL de +1°C et de +1,5°C sont exclus de cette étude. On peut néanmoins considérer que la période historique retenue dans cette étude (1995-2014) correspond déjà à un niveau intermédiaire de réchauffement compris entre +0°C et +1°C par rapport à l'ère préindustrielle. En effet, dans son rapport spécial sur un réchauffement global de +1,5°C, le GIEC indique que l'estimation du réchauffement global pour la période 2006-2015 était déjà de +0,87°C (IPCC, 2018).

En conclusion, les SSP retenus sont les SPP3 et SSP5, et les GWL retenus sont +2°C, +3°C et +4°C.

Grâce à l'étude menée par Hauser et al. (2022), nous pouvons dresser le tableau 4 qui donne les périodes de 20 ans pendant lesquelles un niveau de réchauffement global est atteint par les 5 ESM sélectionnés. On constate que le modèle MIR n'atteint pas le GWL +3°C et que les modèles MIR, MPI et NOR n'atteignent pas le GWL +4°C à la fin du siècle. À titre indicatif, une période moyenne est calculée pour l'ensemble des modèles. Celle-ci sera utilisée dans les projections et graphiques du chapitre 3 comme « période probable où le GWL sera atteint ».

SSP	SSP3-7.0	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Période	20 ans	20 ans	20 ans
ESM / GWL	GWL +2°C	GWL +3°C	GWL +4°C
CMCC-CM2-SR5	2030 - 2049	2054 - 2073	2060 - 2079
EC-Earth3-Veg	2023 - 2042	2048 - 2067	2058 - 2077
MPI-ESM1-2-HR	2041 - 2060	2072 - 2091	<i>Non atteint</i>
NorESM2-MM	2053 - 2072	2080 - 2100	<i>Non atteint</i>
MIROC6	2050 - 2069	<i>Non atteint</i>	<i>Non atteint</i>
Moyenne	<u>2039 - 2058</u>	<u>2067 - 2086</u>	<u>2072 - 2091</u>

Tableau 4 (sur la base de Hauser et al., 2022) – Période correspondant au GWL par ESM.
« Non atteint » signifie que l'ESM n'atteint pas ce niveau de réchauffement.

2.4. Période de référence et période d'étude

Période de référence pour les projections climatiques
1995-2014 (1/1/1995 au 31/12/2014) soit 20 années
Période d'étude pour les projections climatiques
2015-2099 (1/1/2015 au 31/12/2099) soit 85 années

Les modèles ESM issus de CMIP6 représentent l'évolution de la moyenne et de la variabilité interannuelle des paramètres climatiques sur de longues périodes (Doutreloup, 2022). Ces périodes doivent couvrir une période de 10 ans minimum pour neutraliser la variabilité naturelle du climat (Termonia et al., 2024). Ainsi, les couples MAR-ESM recouvrent 2 périodes :

- une période dite « historique » qui sert de référence, dans ce cas-ci 1995-2014, et où les ESM sont forcés par les concentrations atmosphériques de GES mesurées à cette période ;
- une période future pour réaliser les projections climatiques (2015-2099) en fonction des scénarii d'émissions de GES (voir section 2.3). Dans notre cas, cette période est découpée en périodes d'intérêt de 20 ans correspondant aux périodes où les différents paliers de réchauffement sont atteints (GWL) par les ESM sélectionnés (voir tableau 4).

Ainsi fixées, la période historique et les périodes correspondant aux différents niveaux de réchauffement (GWL) sont de la même durée (20 ans) et sont donc statistiquement comparables.

Précisions sur la période de référence

L'augmentation de la température à l'échelle mondiale est généralement exprimée par rapport à la période de référence dite « préindustrielle » (1850-1900), à l'instar du dernier rapport du GIEC (AR6) indiquant un réchauffement de +1,1°C à l'échelle mondiale depuis cette période (IPCC, 2021).

Néanmoins, l'initiative CMIP6 dont sont issus les ESM utilisés dans cette étude, ne dispose pas de données pour les ESM sur les périodes précédant 1950 (Fettweis et al., 2023). **L'évolution des variables analysées sera donc comparée aux valeurs calculées pour la période historique (1995-2014) et non à la période préindustrielle (1850-1900). Il est nécessaire de garder ceci à l'esprit lors de la lecture des tableaux du catalogue de variables, au risque de minimiser l'évolution des variables climatiques. En effet, la température de l'air en Wallonie a déjà augmenté de +1,3°C entre la période 1850-1900 et la période 1980-2010 (Fettweis et al., 2023).** Cette dernière valeur ne sera pas ajoutée aux projections pour correspondre à la période 1850-1900, mais il est important de la prendre en compte à la lecture des résultats.

2.5. Choix et description de la zone d'étude

Le choix de la zone d'étude est totalement arbitraire et correspond à ma région natale et de résidence : **Charleroi Métropole**. Précédemment mentionnés, les travaux du CMIP, CORDEX, EURO-CORDEX et CORDEX.be ont étudié la variation des variables climatiques à l'échelle du monde, de l'Europe et de la Belgique, et plus récemment à l'échelle de la Wallonie dans Fettweis et al. (2023), mais peu d'études ont été réalisées à une échelle plus petite comme l'échelle supracommunale. Les modèles régionaux comme le modèle MAR permettent d'étudier la variation des variables climatiques à cette échelle, et cela représente une opportunité **(i)** de tester la pertinence des modélisations à cette échelle, **(ii)** de sensibiliser l'ensemble des acteurs locaux pour développer et affiner les politiques d'adaptation du territoire, et **(iii)** idéalement d'amplifier les politiques d'atténuation. Les forces et les faiblesses des modélisations climatiques ont été évoquées dans la section 1.3.

2.5.1. Description de Charleroi Métropole

Charleroi Métropole est un territoire composé de 30 communes (voir figure 28), dont les limites ont été établies selon la logique des bassins de vie. « *À la fois bassin d'emploi et de formation, cohérent en matière de dynamiques résidentielles et d'interactions sociales, économiques et culturelles, cette échelle est considérée comme pertinente pour le développement d'une dynamique supracommunale ambitieuse* » (Charleroi Métropole, 2021). Ainsi, les élus et forces vives du territoire se sont engagés à travailler ensemble sur certaines thématiques, via

notamment des commissions composées d'élus et d'autres acteurs locaux (liste non exhaustive) : les équipements et les services, la mobilité (un plan de mobilité a été élaboré à l'échelle du territoire), le développement de l'alimentation locale et durable, l'enseignement et la formation, et le tourisme. « *De nombreux défis ne peuvent se résoudre qu'à une échelle supralocale en mutualisant les ressources, les compétences et les forces des uns et des autres. Charleroi Métropole vise à optimiser les connexions, les complémentarités et les coopérations entre les communes mais également entre tous les acteurs du territoire, entre les territoires ruraux, semi-ruraux et les espaces urbains* » (Charleroi Métropole, s.d.). Sur le volet purement énergétique, les communes sont accompagnées par de nombreuses initiatives via l'intercommunale locale (IGRETEC), mais à ce jour, la thématique du climat, ou plus singulièrement l'adaptation au changement climatique, ne dispose actuellement pas de commission dédiée.

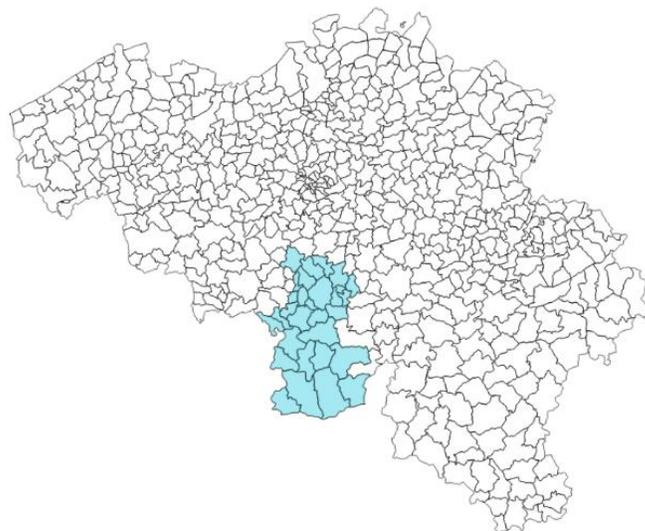


Figure 28 : Carte des 581 communes belges et des 30 communes de Charleroi Métropole (en bleu). Carte générée via QGIS.

L'ensemble des documents stratégiques de Charleroi Métropole évoque les enjeux climatiques de manière transversale et se rattachent principalement au Plan Air Climat Energie wallon (PACE 2030), au Plan National Energie Climat (PNEC), à la Stratégie Nationale Biodiversité et à la Stratégie Biodiversité 360 wallonne, mais le bassin de vie ne dispose pas encore de stratégie élaborée localement. Néanmoins, le besoin de se doter d'un Plan Climat Charleroi Métropole et d'encourager les communes à se doter d'un *Plan d'Actions en faveur de l'Energie Durable et du Climat* (PAEDC) y est mentionné (Charleroi Métropole, 2021). Des projets ou appels à projets sont également coordonnés à l'échelle de Charleroi Métropole mais englobent généralement des projets touchant l'**atténuation** du dérèglement climatique : production d'énergie durable, isolation des bâtiments publics ou plan de mobilité. Quelques appels à projets, coordonnés ou non par Charleroi Métropole, traitent néanmoins directement ou indirectement de l'adaptation comme la

création du Parc National de l'Entre-Sambre-et-Meuse ou les projets pour la mise en place d'actions de préservation et de restauration des espaces naturels (Charleroi Métropole, s.d.).

Les politiques structurantes **d'adaptation** du territoire au dérèglement climatique ne sont que trop succinctement évoquées au niveau de l'ensemblier qu'est Charleroi Métropole. À titre d'illustration, les termes suivants n'apparaissent pas dans les documents les plus récents, ou dans un cadre très général (Charleroi Métropole 2021 ; Charleroi Métropole, 2024) : « adaptation » (1x), « îlots de chaleur » (0x), « îlots de fraîcheur » (0x), « sécheresse » (0x), « canicule » (0x), « inondation » (2x).

Ces questions **d'adaptation** sont par contre directement évoquées au niveau des communes, via l'élaboration des PAEDC dans le cadre de l'initiative européenne de la Convention des Maires (SPW, s.d. a), coordonnée par la Région wallonne depuis 2017. Cette initiative repose sur trois piliers : l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques ainsi que la lutte contre la précarité énergétique. À l'échelle des communes, elles bénéficient de ressources humaines ou en investissement à travers des appels à projets. Plusieurs outils sont ainsi mis à leur disposition pour les accompagner dans la rédaction des PAEDC (SPW, s.d. b) :

- l'outil *Adapte ta commune*, disponible depuis 2017, qui vise à « *sensibiliser les pouvoirs locaux aux impacts des changements climatiques et de les accompagner dans la démarche de l'adaptation* » (AwAC, s.d.). Cet outil est basé sur l'étude d'adaptation de la Région wallonne au changement climatique ECORES-TEC (2011). À travers un questionnaire de 70 questions, un premier diagnostic de vulnérabilité du territoire communal est établi pour identifier et orienter les futures actions ;
- l'outil POLLEC est quant à lui destiné à « *définir une vision à long terme du territoire ainsi que des objectifs d'efficacité énergétique et de production renouvelable spécifiques à chaque secteur* » (SPW, s.d. b). Des objectifs et des actions liés à l'adaptation doivent également être intégrés dans les plans d'actions communaux ;
- d'autres outils existent mais concernent l'atténuation (énergie, rénovation des bâtiments scolaires...).

Dans le cadre du programme POLLEC, plusieurs communes de Charleroi Métropole bénéficient d'un soutien de structures supracommunales (BEP, Province de Hainaut et IGRETEC) dans l'élaboration, la mise en œuvre et le suivi de leur PAEDC.

Si l'objectif est d'affiner les mesures d'adaptation localement, ces diagnostics et outils n'intègrent pas de modélisation climatique à l'échelle locale et ne permettent donc pas de caractériser les risques et impacts à cette échelle : à quelles températures maximales doit-on s'attendre dans les prochaines décennies ? La répartition des précipitations va-t-elle

changer de manière significative ? Le risque d'îlots de chaleur urbain est-il généralisé ou localisé ? À quel climat devront s'adapter les agriculteurs et les agricultrices ? Des tendances existent au niveau européen, national et au niveau de la Wallonie mais pas à l'échelle de plus petits territoires. L'ambition de cette étude est donc de donner une première estimation robuste de l'évolution du climat à l'échelle locale.

Les prochaines sections décriront géographiquement le territoire de Charleroi Métropole et justifieront son découpage en 4 zones.

2.5.2. Caractéristiques du territoire et définition des sous-zones d'étude

À cheval sur la province de Hainaut et de Namur, Charleroi Métropole possède des caractéristiques territoriales diversifiées présentées dans cette section. En annexe 9, une carte avec le nom des communes est disponible.

Caractéristiques (Source)	
Nombre de communes (annexe 8)	30
Population totale (annexe 8)	580 490 habitants
Superficie (QGIS)	2 070 km ² (6,75% de la superficie de la Belgique) dont près de 900 km ² (43%) sont des surfaces agricoles utiles (Sytra, 2022)

Dans l'introduction de Idea Consult et Buur (2018), Nicolas Sottiaux et Paul Furlan, ancien président de la conférence des Bourgmestres, décrivaient Charleroi Métropole comme ceci : *« Charleroi Métropole, dans ses propres composantes paysagères, peut se targuer d'une grande complémentarité. La partie nord, marquée par l'agglomération directe de Charleroi et l'influence de Bruxelles, présente essentiellement un tissu urbanisé dense, une couronne de communes dynamiques et des terres cultivées. La partie Sud offre un caractère rural, agricole, forestier propice au tourisme, des spécialités économiques singulières, une richesse artisanale, folklorique et patrimoniale mais également des centres dont l'activité n'est plus à démontrer ».*

D'un point de vue climatique, ces caractéristiques territoriales sont pertinentes. En effet, en topoclimatologie¹⁰, les principaux éléments influençant le climat localement sont (Doutreloup, 2022) :

- le **relief** : en moyenne, la température diminue de 0,65°C tous les 100 mètres (IRM, s.d. d) ;
- les **étendues d'eau** (océan, mer, lac) par la création de brise ou par leur inertie thermique ;

¹⁰ La **topoclimatologie** analyse la variabilité spatiale et temporelle des paramètres climatiques à l'échelle locale au sein des différents milieux de vie ruraux et/ou urbains (Doutreloup, 2022).

- **l'occupation des sols** : types de sols, urbanisation et végétation, principalement. Ces facteurs influencent l'albedo¹¹.

Les étendues d'eau étant réduites sur Charleroi Métropole, nous nous focaliserons sur les 2 autres critères principaux pour justifier le découpage de Charleroi Métropole en 4 zones pour des projections climatiques : **l'utilisation des sols et la topographie**. Bien qu'ils aient une influence sur le micro-climat, les Lacs de l'Eau D'heure, avec une superficie d'environ 6 km², ont en effet peu d'influence sur les variables de la zone 4 couvrant une surface de 1 475 km² (soit 0,4% de la surface de cette zone).

Le découpage en zones est visible sur la **figure 30** (gauche) et a été réalisé sur base des informations présentes dans la **figure 29** et le **tableau 5**. La méthodologie utilisée pour extraire les données et créer la **figure 30** (droite) est explicitée dans la section 2.6.

¹¹ L'**albédo** est « la fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface ou par un objet, souvent exprimée en pourcentage » (IPCC, 2018).

Nom de la zone (couleur)	Utilisation des sols	Altitude moyenne [min-max] (m)	Nombre de pixels	Superficie (km ²)
<i>Sources</i>	<i>Idea Consult et Buur (2018)</i>	<i>Logiciel QGIS</i>		#pixels * 25 km ²
Zone 1 (vert) (Zone semi-rurale)	Cette zone semi-rurale fait partie d'un territoire plus vaste qui peut être considéré jusqu'à la périurbanisation bruxelloise. Elle est principalement constituée de vastes champs agraires rythmés de densités urbaines dispersées et plus ponctuellement de fermes isolées. Communes : Seneffe, Pont-à-Celles, Les Bons Villers et la moitié de Fleurus.	143 [88-185]	12	300
Zone 2 (bleu) (Zone urbaine)	Cette zone urbaine dense s'étire le long de la Sambre et englobe de nombreux noyaux urbains et des zones fortement minéralisées. Communes : Charleroi, Anderlues, Chapelle-lez-Herlaimont, Fontaine-L'évêque, Courcelles, Montigny-le-Tilleul, Lobbes, Châtelet, Farciennes, Aiseau-Presles, Sambreville et l'autre moitié de Fleurus.	154 [77-264]	21	525
Zone 3 (jaune) (Zone semi-rurale)	Cette zone semi-rurale est composée principalement de cultures et de noyaux urbains dispersés . Il existe une forte pression de l'urbanisation, principalement au Nord de cette zone, où le paysage s'en trouve fragilisé. Communes : Erquennes, Merbes-le-Château, Ham-sur-Heure-Nalinnes, Thuin, Gerpennes, Beaumont et Walcourt	201 [111-312]	28	700
Zone 4 (rouge) (Zone rurale et forestière)	Cette zone rurale marquée par les vallées est caractérisée par ses nombreuses forêts typiques du Sud de la Belgique. La composition géologique et sa topographie favorisent la foresterie ou l'élevage . L'habitat y est rare et pour majorité regroupé en deux centralités (Chimay et Couvin). Communes : Momignies, Chimay, Couvin, Viroinval, Sivry-Rance, Froidchapelle, Cerfontaine, Philippeville	258 [91-498]	59	1475

Tableau 5 – Critères climatiques pour les zones d'étude.

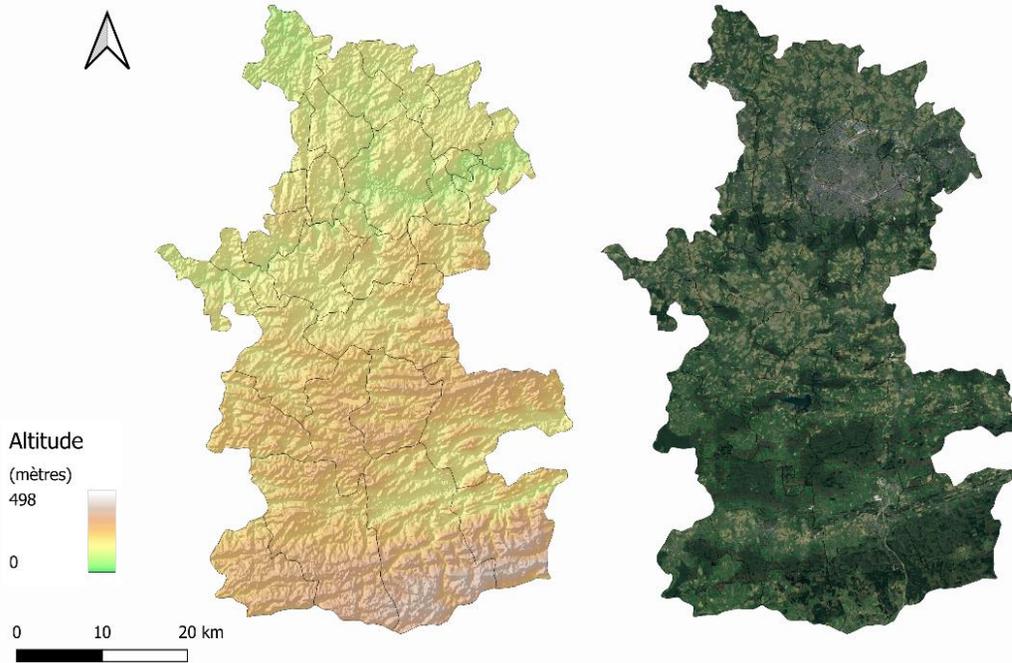


Figure 29 – Carte topographique des 30 communes de Charleroi Métropole (à gauche). Carte satellite des 30 communes de Charleroi Métropole (à droite). Cartes générées via QGIS.

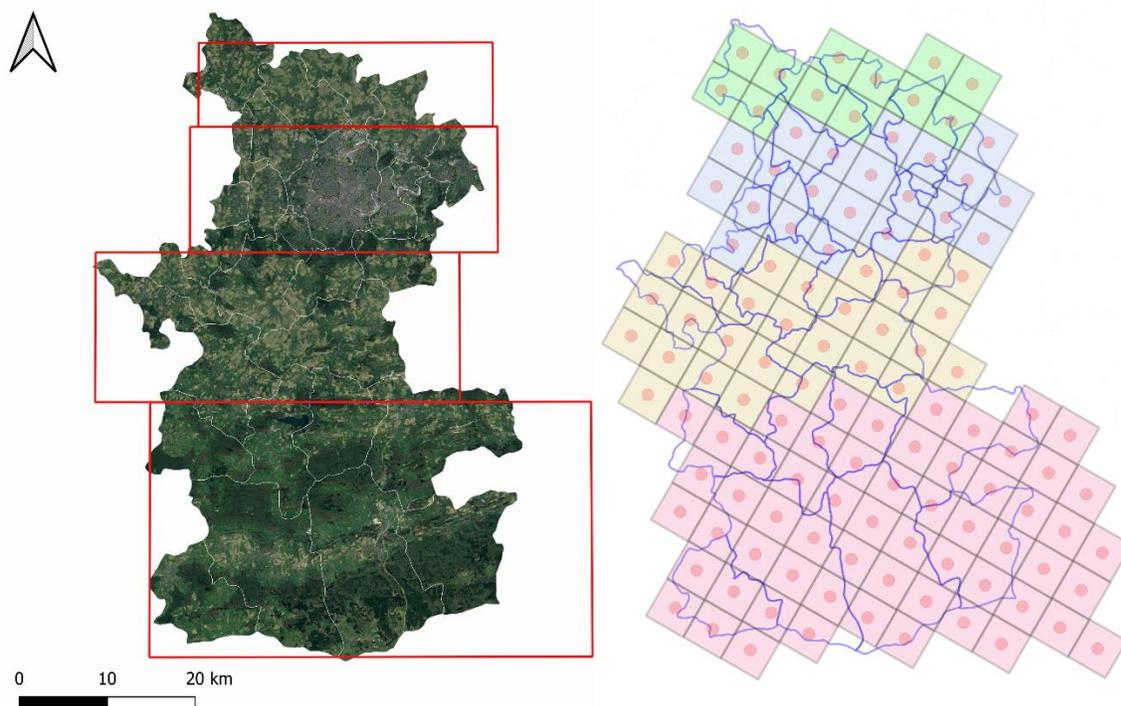


Figure 30 – Délimitations des 4 zones d'étude correspondant aux zones définies dans le tableau 5 (en rouge à gauche). Positionnement des pixels de 5 km de côté issus du modèle MAR par rapport aux zones définies à gauche, les points rouges représentent le centre des pixels (à droite). Cartes générées via QGIS.

2.6. Variables et indices analysés

2.6.1. Extraction des variables d'intérêt

Les étapes suivantes ont été suivies. Je remercie particulièrement Nicolas Ghilain (co-promoteur) pour sa contribution sur ces étapes techniques.

1. La description des zones d'intérêt (voir tableau 5) permet de dessiner approximativement les zones à l'aide de QGIS (figure 29, gauche).
2. Ensuite, QGIS permet de traduire ces 4 zones d'intérêt dessinées en coordonnées géographiques. Cette étape fournit 4 coordonnées par zone (les 4 coins) ;
3. L'outil NCO (*netCDF Operators Discussion*) est utilisé pour lier ces coordonnées géographiques aux données générées par le modèle MARv3.14. Ce modèle a en effet déjà généré les données pour la Belgique, réparties en pixels de 5 km de côté (soit 25 km²). Il est donc nécessaire d'extraire les pixels correspondant aux zones spécifiques étudiées ;
4. L'étape 3 permet d'extraire les coordonnées géographiques des centres des pixels inclus dans les zones définies. Pour éviter les doublons, la répartition des pixels à cheval sur deux zones voisines est réalisée en fonction de la localisation du centre du pixel. De la sorte, aucun pixel n'appartient à 2 zones. Cette étape permet de réaliser la figure 30 (droite) via QGIS.
5. L'outil CDO (*Climate Data Operator*) permet ensuite de manipuler les fichiers au format netCDF générés par le modèle MAR pour (i) en extraire les pixels correspondant aux zones sélectionnées (ii) en extraire les **variables horaires** d'intérêt et (iii) calculer les cumuls, moyennes, minima ou maxima à **l'échelle journalière** ;
6. L'outil CDO est utilisé à nouveau pour concaténer les données par ESM et par scénarii SSP ;
7. Les outils Bash et CDO sont finalement utilisés pour générer des fichiers .txt affichant les données en colonnes ;

Ces manipulations ont généré 100 fichiers correspondant à :

- 5 ESM ;
- 5 séries temporelles par ESM : 1 historique sur la période 1980-2014 et les 4 scénarii SSP sur la période 2015-2099 ;
- 4 zones d'études.

$$5 \text{ ESM} * 5 \text{ séries temporelles} * 4 \text{ zones d'étude} = 100 \text{ fichiers}$$

Étant donné les choix méthodologiques réalisés à la section 2.3, tous les scénarii SSP ne sont pas utilisés (uniquement les SSP3 et SSP5) et tous les ESM n'atteignent pas les 3 GWL (tableau 4), il n'est donc pas nécessaire de travailler avec l'ensemble des fichiers générés. Le tableau 6 ci-dessous décrit les fichiers retenus : 12 fichiers pour chaque zone, soit un total de **48 fichiers** pour l'ensemble de Charleroi Métropole.

SSP	/	SSP3-7.0	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Période	20 ans	20 ans	20 ans	20 ans
ESM / GWL	Historique	GWL +2°C	GWL +3°C	GWL +4°C
CMCC-CM2-SR5	1995-2014	2030 - 2049	2054 - 2073	2060 - 2079
EC-Earth3-Veg	1995-2014	2023 - 2042	2048 - 2067	2058 - 2077
MPI-ESM1-2-HR	1995-2014	2041 - 2060	2072 - 2091	<i>Non atteint</i>
NorESM2-MM	1995-2014	2053 - 2072	2080 – 2099*	<i>Non atteint</i>
MIROC6	1995-2014	2050 - 2069	<i>Non atteint</i>	<i>Non atteint</i>
#fichiers	5	5 (traitement sur les 2 GWL)	2	12

Tableau 6 – Nombre de fichiers utilisés par zone. Les mêmes fichiers pour SSP3 sont utilisés pour les GWL +2°C et +3°C. Tableau adapté à partir du tableau 4. * La véritable période est 2081-2100 mais l'année 2100 n'est pas disponible dans les données produites.

2.6.2. Sélection des variables d'intérêt

Dans la littérature scientifique, nous pouvons distinguer trois principales catégories de variables : celles liées à la **température**, celles liées aux **précipitations** et une troisième catégorie regroupant des **variables diverses** (vent, humidité, couverture nuageuse...). **Afin de se concentrer sur les impacts principaux du changement climatique à l'échelle de Charleroi Métropole, cette étude se focalisera uniquement sur des variables et indices liés à la température et aux précipitations.**

Parmi les nombreuses variables fournies par les couples MAR-ESM, les variables **journalières** extraites pour cette étude sont les suivantes (tableau 7) :

Variables	Unité	Descriptif
DATE	Jour	Cette variable permet la manipulation des autres variables par sous-périodes en fonction des besoins (ex : saisons)
T_{min}	°C	Température minimale journalière de l'air, à 2 mètres
T_{max}	°C	Température maximale journalière de l'air, à 2 mètres
T_{avg}	°C	Température moyenne journalière de l'air, à 2 mètres
Rainfall	mm	Cumul des précipitations liquides journalières (pluie)
Snowfall	mm	Cumul des précipitations solides journalières (neige, grêle)
RH_{min}	%	Humidité relative de l'air journalière minimale

Tableau 7 – Variables extraites des modélisations du modèle MAR pour cette étude

Cette sélection d'indicateurs constitue la base pour la création des indicateurs et indices étudiés par la suite.

2.6.3. Tableau des indicateurs et indices analysés

Sur base de ces variables extraites des modèles et des hypothèses méthodologiques ci-dessus, d'autres variables et indices d'intérêt peuvent être calculés. La sélection est reprise dans les tableaux 8 (températures) et 9 (précipitations). L'étude de l'évolution de ces variables sur les 4 zones de Charleroi Métropole sélectionnées constitue l'objet central de cette étude.

Cat.	Indicateur	Unité	Descriptif	Méthodologie
Température	T_{\min}	°C	température minimale journalière de l'air, à 2 mètres	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Comparaison interannuelle des moyennes annuelles de T_{\min} ◦ Comparaison saisonnière interannuelle des moyennes saisonnières de T_{\min}
	T_{\max}	°C	température maximale journalière de l'air, à 2 mètres	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Comparaison interannuelle des moyennes annuelles de T_{\max} ◦ Comparaison saisonnière interannuelle des moyennes saisonnières de T_{\max}
	T_{avg}	°C	température moyenne journalière de l'air, à 2 mètres	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Comparaison interannuelle des moyennes annuelles de T_{avg} ◦ Comparaison saisonnière interannuelle des moyennes saisonnières de T_{avg}
	$J_{\text{été}}$	Jours/an	nombre de jours d'été	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Comparaison interannuelle du nombre de jours où $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$
	J_{gel}	Jours/an	nombre de jours de gel	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Comparaison interannuelle du nombre de jours où $T_{\min} \leq 0 \text{ °C}$
	J_{canicule}	Jours/an	nombre de jours de vigilance canicule	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Comparaison interannuelle du nombre de jours où les 2 conditions suivantes sont rencontrées : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Moyenne glissante sur 3 jours où $T_{\max} \geq 34 \text{ °C}$ ◦ Moyenne glissante sur 3 jours où $T_{\min} \geq 19 \text{ °C}$
	V_5	#/an	nombre annuel d'occurrences de vagues de chaleur de 5 jours	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Comparaison interannuelle du nombre de périodes de 5 jours où les 2 conditions suivantes sont rencontrées : <ul style="list-style-type: none"> ◦ $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ ◦ Au moins 3 jours où $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$

V ₇	#/an	nombre annuel d'occurrences de vagues de chaleur de 7 jours	◦ idem V ₅ pour une période de 7 jours
V ₁₀	#/an	nombre annuel d'occurrences de vagues de chaleur de 10 jours	◦ idem V ₅ pour une période de 10 jours
V ₁₅	#/an	nombre annuel d'occurrences de vagues de chaleur de 15 jours	◦ idem V ₅ pour une période de 15 jours
J _{Humidex}	jours/an	nombre de jours où il y a un inconfort thermique selon l'Humidex	◦ Comparaison interannuel du nombre de jours où Humidex_{max} ≥ 30 (voir 2.6.5 « Zoom sur les indices de chaleur »)
J _{Humidex40}	jours/an	nombre de jours où il y a un inconfort thermique important selon l'Humidex	◦ Comparaison interannuel du nombre de jours où Humidex_{max} ≥ 40 (voir 2.6.5 « Zoom sur les indices de chaleur »)
J _{wetbulb}	jours/an	nombre de jours où il y a un inconfort thermique selon le Heat Index	◦ Comparaison interannuel du nombre de jours où WetBulb_{max} ≥ 27 (voir 2.6.5 « Zoom sur les indices de chaleur »)
J _{HeatIndex}	Jours/an	nombre de jours où il y a un inconfort thermique selon le Wet Bulb Temperature	◦ Comparaison interannuel du nombre de jours où HeatIndex_{max} ≥ 19 (voir 2.6.5 « Zoom sur les indices de chaleur »)

Tableau 8 – Variables et indices sélectionnés liés à la température.

Cat.	Indicateurs	Unité	Descriptif	Méthodologie
Précipitations	P_{annuel}	mm/an	cumul des précipitations annuelles	◦ Comparaison interannuelle de P_{annuel}
	P_{saison}	mm/saison	cumul des précipitations saisonnières	◦ Comparaison saisonnière interannuelle de P_{saison}
	$J_{\text{précip}}$	jours/saison	nombre de jours avec des précipitations ($\geq 1,5$ mm), par saison	◦ Comparaison interannuelle saisonnière du nombre de jours où les précipitations sont $\geq 1,5$ mm
	$J_{\text{précip-fortes}}$	Jours/saison	nombre de jours avec des précipitations fortes (≥ 10 mm), par saison	◦ Comparaison interannuelle saisonnière du nombre de jours où les précipitations sont ≥ 10 mm. Cette variable inclut les précipitations $\geq 1,5$ mm
	$J_{\text{précip-t.fortes}}$	Jours/saison	nombre de jours avec des précipitations très fortes (≥ 20 mm), par saison	◦ Comparaison interannuelle saisonnière du nombre de jours où les précipitations sont ≥ 20 mm. Cette variable inclut les précipitations $\geq 1,5$ mm et ≥ 10 mm
	$C_{\text{précip-max}}$	mm/saison	Cumul maximum des précipitations sur 1 jour, par saison	◦ Comparaison interannuelle saisonnière des cumuls maximum de précipitations sur 1 jour
	$C_{\text{précip-max-5j}}$	mm/saison	Cumul maximum des précipitations sur 5 jours, par saison	◦ Comparaison interannuelle saisonnière des cumuls maximum de précipitations sur 5 jours
	$J_{\text{sec-max}}$	Jours/saison	Nombre de jours consécutifs maximum avec des précipitations $< 1,5$ mm, par saison	◦ Comparaison interannuelle saisonnière du nombre maximum de jours secs consécutifs

Tableau 9 – Variables et indices sélectionnés liés aux précipitations.

2.6.4. Traitement des données et hypothèses

Sur la base des données extraites pour les couples MAR-ESM, leur traitement via le logiciel R intègre les hypothèses suivantes :

- les saisons suivent le calendrier météorologique, pour une année n (tableau 10) ;

Saison	Début	Fin
Hiver	1/12/n-1	28/2/n
Printemps	1/3/n	31/5/n
Été	1/6/n	31/8/n
Automne	1/9/n	30/11/n

Tableau 10 – Détermination des saisons selon le calendrier météorologique

- via R, les fichiers correspondant aux données historiques sont manipulés pour **adapter la période historique, passant de 1980-2014 à 1995-2014, pour respecter la méthodologie décrite à la section 2.4 et ainsi comparer des périodes de même durée (20 ans).**

Pour le calcul des indicateurs et indices liés à la température :

- les températures en sortie des modèles doivent être interprétées comme si elles étaient relevées par une station météorologique, c'est-à-dire mesurant les températures de l'air à 2 mètres à l'abri du rayonnement direct du soleil. Ces températures ne sont pas celles ressenties (voir les sections suivantes sur les indices d'inconfort thermique) ;
- pour les calculs liés à T_{avg} , T_{min} et T_{max} , les manipulations sont relativement simples et se résument à des calculs de moyennes annuelles et saisonnières pour tous les couples MAR-ESM et les périodes sélectionnées ;
- pour les autres indices, les manipulations consistent à créer une variable binaire pour chaque jour prenant la valeur 1 si les conditions décrites dans le tableau 8 sont remplies, et d'en faire ensuite la somme sur la période étudiée. Par exemple, la méthodologie de calcul pour les vagues de chaleur se base sur la définition de l'IRM (s.d. a). Pour calculer cet indicateur, pour une vague de chaleur de 5 jours, une variable a été créée pour chaque pas de temps (1 jour), qui calcule si les conditions sont réunies pour le jour en question et les 4 jours suivants. Une vague de chaleur de 6 jours sera alors comptabilisée comme 2 vagues de chaleur (Fettweis et al., 2023) ;
- **l'Humidex** est calculé et interprété selon la formule et les interprétations décrites dans la section 2.6.5. En R, le calcul est facilité grâce au package *ThermIndex* développé par Jablinski (2017). La valeur est stockée dans une colonne dédiée et une valeur binaire de 1 est donnée à une journée dans une autre colonne si le seuil décrit dans le tableau 8 est dépassé ;

- le **Heat Index** est calculé et interprété selon la formule et les interprétations décrites dans la section 2.6.5. En R, le calcul est facilité grâce au package *weathermetrics* développé par Anderson (2016). La valeur est stockée dans une colonne dédiée et une valeur binaire de 1 est donnée à une journée dans une autre colonne si le seuil décrit dans le tableau 8 est dépassé ;
- le **Wet Bulb Temperature** (WBT) est calculé et interprété selon la formule et les interprétations décrites dans la section 2.6.5. En R, le calcul est facilité grâce à la formule développée par Casanueva (2016). La valeur est stockée dans une colonne dédiée et une valeur binaire de 1 est donnée à une journée dans une autre colonne si le seuil décrit dans le tableau 8 est dépassé.

Pour le calcul des indicateurs liés aux précipitations :

- **les précipitations liquides (pluie) et solides (neige, grêle) ne sont pas distinguées et sont donc additionnées sous le vocable « précipitations » ;**
- **les précipitations dont la somme est < 1,5 mm sont considérées comme nulles en raison du « bruit numérique » généré par les simulations du modèle MAR pour des jours normalement secs (Fettweis et al., 2023) ;**
- pour les calculs liés à P_{annuel} et P_{saison} , les manipulations se résument à des calculs de moyennes annuelles et saisonnières ;
- pour les autres indicateurs, les manipulations consistent à créer une variable binaire pour chaque jour prenant la valeur 1 si les conditions décrites dans le tableau 9 sont remplies, et d'en faire ensuite la somme sur la période appropriée.

Sur la base des 48 fichiers retenus à la section 2.6.1, chacun des indicateurs et indices sélectionnés sera calculé de la façon suivante :

- sur la période historique (1995-2014) : par couple MAR-ESM, calcul des moyennes ou sommes annuelles/saisonnières (en fonction de l'indicateur) pour chaque année de la période. Ce qui génère 100 valeurs (5 modèles multipliés par 20 années). Les moyennes et écarts-types sur la période sont ensuite calculés pour chaque couple MAR-ESM. Finalement, pour agréger les résultats de l'ensemble des couples MAR-ESM (à partir des 100 valeurs de départ), les mesures statistiques suivantes sont calculées : la moyenne et l'écart-type, mais aussi la valeur médiane accompagnée de la valeur minimale et maximale pour générer des graphiques ;
- sur les périodes correspondant aux 3 GWL : par couple MAR-ESM, calcul des moyennes ou sommes annuelles/saisonnières (en fonction de l'indicateur) pour chaque année de la période concernée (ex : pour le couple MAR-EC3 et le GWL +2°C, chaque année sur la période 2023 - 2042). Pour calculer les variations des indicateurs par rapport à la période historique, la moyenne de la valeur historique est soustraite de chaque moyenne ou

somme annuelle calculée. Finalement, pour agréger les résultats de l'ensemble des couples MAR-ESM, les mesures statistiques suivantes sont calculées sur les variations calculés par rapport à la période de référence : la moyenne et l'écart-type, mais aussi la valeur médiane accompagnée de la valeur minimale et maximale pour générer des graphiques.

- ces valeurs ne seront pas calculées pour tous les couples MAR-ESM selon les GWL, étant donné que certains ESM n'atteignent pas certains niveaux de réchauffement (tableau 4).

Ensuite :

1. Les valeurs calculées par GWL seront comparées à la période historique pour y détecter des différences significatives. **La variation d'un indicateur sera considérée comme statistiquement significative si sa valeur absolue par rapport à la moyenne de la période de référence 1995-2014 est supérieure à l'écart-type (variabilité interannuelle) calculé sur la même période** (Fettweis et al., 2023). De cette manière, une variation qui ne dépasse pas la variabilité naturelle du climat (écart-type) sur la période historique sera considérée comme non significative :

$$\text{Seuil de significativité pour la Variable}_{GWL(i)} : \frac{\text{Variable}_{GWL(i)} - \text{Variable}_{histo}}{\text{Ecart_type}_{histo}} > 1$$

2. Les valeurs calculées seront comparées entre zones pour y détecter des différences significatives sur les variations entre GWL +3°C (réchauffement le plus probable) et la période historique. Les données ne respectant pas la condition de normalité, le test statistique ANOVA de comparaison des moyennes entre groupes de données (ici les zones), n'est pas utilisable. Il existe un autre test statistique de comparaison entre groupes des médianes qui ne nécessite aucune normalité dans la distribution des données : le test de Kruskal-Wallis. Il fournit une p-value avec l'hypothèse nulle qu'il n'y a pas de différence significative dans les médianes des évolutions de températures entre les différentes zones. L'hypothèse nulle est rejetée si $p < 0,05$. Le calcul est réalisé en R (Data Novia, s.d.). La conclusion de ce test sera indiquée par variable.

Finalement, l'ensemble des données est représenté graphiquement à l'aide de boxplots (ou boîte à moustache en français) pour visualiser les données et les tendances.

L'ensemble des résultats sont consultables dans le catalogue de 53 variables, disponible à la fin de ce document. Un guide de lecture des boxplots et tableaux est proposé au début de la section 3.1 et au début du catalogue de variables.

2.6.5. Zoom sur les indices de chaleur

En termes d'impact du réchauffement climatique en Wallonie, le risque sanitaire lié aux vagues de chaleur et aux îlots de chaleur urbains en été est identifié comme le plus important si l'on considère le nombre de victimes potentielles. Les inondations passent au premier plan si l'on considère l'impact économique (Pwg, 2022). En raison de la complexité de la thématique des inondations, cette étude se concentre sur les indicateurs de température et leurs impacts potentiellement grandissants sur les populations. **Au-delà du calcul de certaines variables liées aux vagues de chaleur et aux canicules, des indices de chaleur sont également calculés.**

Les indices de chaleur combinent la température et le taux d'humidité dans l'air pour exprimer l'inconfort thermique : « *le corps tente de se maintenir à une température interne constante de 37 °C. Par temps chaud, l'organisme produit de la sueur qui rafraîchit le corps en s'évaporant. La sueur ne s'évapore pas toujours aussi rapidement, s'il y a beaucoup d'humidité dans l'air. L'évaporation s'arrête même complètement lorsque l'humidité relative atteint environ 90%. Dans ce cas, la température du corps augmente et il y a un risque élevé pour les populations* » (ECCC, 2018). Les symptômes associés et non exhaustifs sont les suivants : irritation, crampes, spasmes musculaires, épuisement, transpiration abondante, faiblesse, étourdissement, nausée, maux de tête et dans les pires cas, coups de chaleur et hyperpyrexie¹².

Il existe plusieurs indices de chaleur (Hosokawa et al., 2019) qui diffèrent par leurs méthodes de calcul mais qui ont tous le même objectif : quantifier l'inconfort thermique et permettre aux autorités et aux populations de prendre les mesures adéquates.

Trois indices couramment utilisés sont utilisés dans cette étude : l'Humidex, le Heat Index et le Wet Bulb Temperature (WBT). Leur simplicité d'utilisation constitue également leur principale limitation : ils se basent sur température de l'air et le taux d'humidité mais ne tiennent pas compte du rayonnement solaire, du vent, ou d'autres facteurs environnementaux. **Leurs résultats sont néanmoins de bons indicateurs de l'inconfort thermique et la communauté scientifique réclame que leur usage soit de plus en plus répandu notamment par les services météorologiques** (Wagner, 2022). D'autres indicateurs plus complexes existent mais ne seront pas analysés ici, comme le Wet Bulb Global Temperature (WBGT), intégrant la vitesse du vent, la couverture nuageuse et le rayonnement solaire.

Pour chacun des indices utilisés, une définition et leur méthode de calcul sont énoncées avec un tableau des valeurs et des seuils d'inconfort associés disponibles en annexes. Un tableau

¹² Le corps humain rentre en hyperpyrexie lorsque la température corporelle dépasse 41 °C

récapitulatif est fourni en fin de cette section pour résumer les valeurs seuils retenues dans cette étude.

Une remarque préliminaire est importante : ces indices utilisent idéalement des valeurs horaires de la température de l'air (T_{air} , exprimé en °C) et du taux d'humidité (RH, exprimé en %). Ne disposant pas des données horaires, T_{air} et RH peuvent être remplacés respectivement par leurs valeurs journalières, respectivement maximale et minimale, T_{max} et RH_{min} pour calculer la valeur maximale journalière des indices. En effet, comme Diaconescu et al. (2023) le démontrent, l'Humidex atteint statistiquement son maximum au moment de T_{max} qui correspond généralement à l'apparition de RH_{min} . Les formules ci-dessous sont donc adaptées. Dans ce contexte, **cette étude analyse donc les valeurs journalières maximales des trois indices étudiés, atteintes au moins 1 heure par jour**. Malgré leurs divergences, l'objectif est de mesurer une tendance au cours du 21^{ème} siècle en comparaison avec la période de référence (1995-2014), même si les valeurs peuvent diverger sur cette période de référence ou sur les GWL.

→ L'Humidex (HX)

L'indice Humidex [sans unité] a été utilisé pour la première fois au Canada en 1965. « *L'humidex combine la température et l'humidité en une seule donnée pour refléter la température perçue* » (ECCC, 2018).

Formule adaptée (éléments adaptés en rouge) :

$$HX_{\text{max}} = T_{\text{max}} + \frac{5}{9} * \left(\left[6.112 * 10^{\left[\frac{7.5 * T_{\text{max}}}{237.7 + T_{\text{max}}} \right]} * \frac{RH_{\text{min}}}{100} \right] - 10 \right)$$

Un tableau complet des combinaisons température et humidité, et l'indice Humidex associé est disponible en annexe 5.

→ Le Heat Index (HI)

Créé en 1978 aux États-Unis, sa définition est très semblable à celle de l'Humidex : « *le Heat Index, également connu sous le nom de température apparente, est la température ressentie par le corps humain lorsque l'humidité relative est combinée à la température de l'air* » (NWS, s.d.).

Dans cette étude, la formule du Heat Index est adaptée comme pour l'Humidex, où la température T_{max} est également exprimée en °C et l'humidité relative RH_{min} est exprimée en %.

Formule adaptée (éléments adaptés en rouge) :

$$HI_{max} = -42,379 + (2,04901523 * T_{max}) + (10,14333127 * RH_{min}) - (0,022475541 * T_{max} * RH_{min}) - (6,83783 * 10^{-3} * T_{max}^2) - (5,481717 * 10^{-2} * RH_{min}^2) + (1,22874 * 10^{-3} * T_{max}^2 * RH_{min}) + (8,5282 * 10^{-4} * T_{max} * RH_{min}^2) - (1,99 * 10^{-6} * T_{max}^2 * RH_{min}^2)$$

Un tableau complet des combinaisons température et humidité, et l'indice Heat Index associé est disponible en annexe 6.

Ces 2 premiers indices sont par exemple utilisés dans Timmermans et al. (2023), où l'évolution des vagues de chaleur sur Bruxelles est simulée pour l'horizon 2100, à l'aide du modèle MAR forcé par l'ESM MIR et en suivant le scénario SSP5-8.5.

→ Le Wet Bulb Temperature (WBT) ou température du thermomètre mouillé

Le thermomètre mouillé est « la température humide à laquelle l'air est saturé et retient autant d'humidité qu'il peut sous forme de vapeur d'eau ; la sueur d'une personne ne s'évapore pas à cette température » (Wagner, 2022). Contrairement au Heat Index et à l'Humidex, qui sont des indices basés sur des formules, le WBT est une mesure physique directe de la température et de l'humidité, qui peut être prise par un outil appelé psychromètre. Il existe néanmoins une équation pour l'approximer (Stull, 2011).

Formule adaptée (éléments adaptés en rouge) :

$$WBT_{max} = T_{max} * \arctan(0.151977 \sqrt{RH_{min} + 8.133659}) + 0.00391838 \sqrt{RH_{min}^3} \arctan(0.023101 RH_{min}) - \arctan(RH_{min} - 1.676331) + \arctan(T_{max} + RH_{min}) - 4.686035$$

Un graphique reprenant les combinaisons de température et d'humidité est disponible en annexe 7. Théorisée autour de 35°C dans Sherwood & Huber (2010), la température du thermomètre mouillé **létale pour le corps humain** a été empiriquement étudiée sur des individus en bonne santé et serait plutôt proche de 31°C (Vecellio et al., 2022). En l'absence de tableau similaire aux annexes 5 et 6 pour le WBT, et en se basant sur les valeurs minimales de température et d'humidité relative de l'annexe 7 qui correspond à l'ensemble des combinaisons où il y a inconfort thermique, on peut fixer le seuil de début d'inconfort thermique à 19 pour la température du thermomètre mouillé (WBT).

→ Résumé des indices et des valeurs seuils

Sur base des annexes 5, 6 et 7, les valeurs seuils retenues sont celles correspondant au début de l'inconfort thermique (tableau 11). Ce seuil est retenu, car il correspond au seuil où les activités socio-économiques commencent à être impactées et ne peuvent plus avoir lieu sans adaptation (pause dans l'activité, quantité d'eau adaptée...) et où le risque sanitaire débute pour les groupes les plus fragiles au sein de la population.

Indice	Valeur seuil retenue dans les calculs
Humidex (HX)	≥ 30
Heat Index (HI)	≥ 27
Wet Bulb Temperature (WBT)	≥ 19

Tableau 11 – Seuil d'inconfort thermique sélectionné par indice.

→ Interprétation des résultats

Bien que les 3 indices étudiés se basent sur les mêmes variables (température et humidité relative), la divergence des résultats entre indices peut être expliquée par plusieurs facteurs :

- par leur formule, les indices ont des sensibilités différentes à l'élévation de la température et de l'humidité. Par exemple, l'Humidex réagit plus fortement à l'élévation de l'humidité ;
- il existe également des plages différentes de température et d'humidité où les indices ont des sensibilités différentes ;
- l'impact sur les populations dépend de l'acclimatation, de l'âge, de l'état de santé ou de l'activité physique des individus, et utiliser plusieurs indices permet également de représenter cette diversité ;
- enfin, comme pour l'usage de plusieurs ESM pour neutraliser la variabilité importante de certains modèles, analyser plusieurs indices de chaleur permet de définir une tendance globale qui n'est pas basée sur une source unique de données.

Il est également important de garder à l'esprit lors de l'interprétation des résultats que, se basant sur T_{\max} et RH_{\min} d'une journée, les indices calculés sont dépassés au moins 1h sur la journée, sans indication plus précise de la durée de ce dépassement.

2.7. Méthodologie : tableau récapitulatif

Références méthodologiques				
<ul style="list-style-type: none"> ◦ CORDEX.be II: Scenarios & Global Climate Model Selection (Termonia et al., 2024) ◦ Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l’adaptation aux changements climatiques : scénarii, impacts et mesures – Rapport du volet 2 – Projections climatiques (Fettweis et al., 2023) 				
Modèle régional utilisé – RCM				
<ul style="list-style-type: none"> ◦ MAR v3.14 (MAR) – Belgique (Université de Liège) ◦ Résolution spatiale de 5 km (pixel de 5 km de côté, soit une surface de 25 km²) 				
ESM sélectionnés / abréviations / couples RCM-ESM				
<ul style="list-style-type: none"> ◦ CMCC-CM2-SR5 / CMCC / MAR-CMCC ◦ EC-Earth3-Veg / EC3 / MAR-EC3 ◦ MPI-ESM1-2-HR / MPI / MAR-MPI ◦ NOR-ESM2-MM / NOR / MAR-NOR ◦ MIROC6 / MIR / MAR-MIR 				
Scénarii d’émissions de GES et niveaux de réchauffement global sélectionnés				
Scénarii d’émissions retenus		Niveaux de réchauffement global par rapport à la période 1850-1900		
SSP3-7.0	SSP5-8.5	+ 2 °C	+ 3 °C	+ 4 °C
Période de référence et période d’étude pour les projections climatiques				
Période de référence		Période étudiée		
1995-2014		2015-2099		
(1/1/1995 au 31/12/2014) soit 20 années		(1/1/2015 au 31/12/2099) soit 85 années		
La variation des indicateurs et indices climatiques présentée dans le chapitre 3 est donc calculée par rapport à la période 1995-2014 et non la période 1850-1900				

Variables et indices analysés

Température

- T_{moy} : température moyenne (annuelle et par saison)
- T_{min} : température minimale (par saison)
- T_{max} : température maximale (par saison)
- $J_{\text{été}}$: nombre de jours d'été (annuel)
- J_{gel} : nombre de jours de gel (annuel)
- J_{canicule} : nombre de jours de vigilance canicule (annuel)
- $V_{5-7-10-15}$: nombre de jours de vagues de chaleur de 5-7-10-15 jours (annuel)
- J_{Humidex} : nombre de jours où il y a un inconfort thermique selon l'Humidex (annuel)
- $J_{\text{Humidex40}}$: nombre de jours où il y a un inconfort thermique important selon l'Humidex (annuel)
- $J_{\text{HeatIndex}}$: nombre de jours où il y a un inconfort thermique selon le Heat Index (annuel)
- J_{WetBulb} : nombre de jours où il y a un inconfort thermique selon le Wet Bulb (annuel)

Précipitations

- P_{annuel} : cumul des précipitations annuelles
- P_{saison} : cumul des précipitations saisonnières
- $J_{\text{précip}}$: nombre de jours avec des précipitations ($\geq 1,5$ mm), par saison
- $J_{\text{précip-fortes}}$: nombre de jours avec des précipitations fortes (≥ 10 mm), par saison
- $J_{\text{précip-t.fortes}}$: nombre de jours avec des précipitations très fortes (≥ 20 mm), par saison
- $C_{\text{précip-max}}$: maximum de précipitations journalières, par saison
- $C_{\text{précip-max-5j}}$: cumul maximum des précipitations sur 5 jours, par saison
- $J_{\text{sec-max}}$: nombre de jours secs consécutifs maximum, par saison

Zone étudiée

Charleroi Métropole (Belgique) divisée en 4 zones

Logiciel de cartographie

QGIS 3.36.3-Maidenhead

Logiciel de traitement et de visualisation des données

RStudio 4.4.1

Tableau 12 – Récapitulatif méthodologique.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La méthodologie développée dans le chapitre 2 peut être résumée à l'aide de la figure 31. Après avoir sélectionné les SSP d'intérêts (**étape 1**) pour forcer les modèles globaux les plus pertinents (**étape 2**), à leur tour utilisés pour forcer le modèle régional MAR à haute résolution sur Charleroi Métropole (**étape 3**), le présent chapitre, le plus important, est dédié à l'interprétation des résultats en fonction des niveaux de réchauffement global potentiels (**étape 4**).

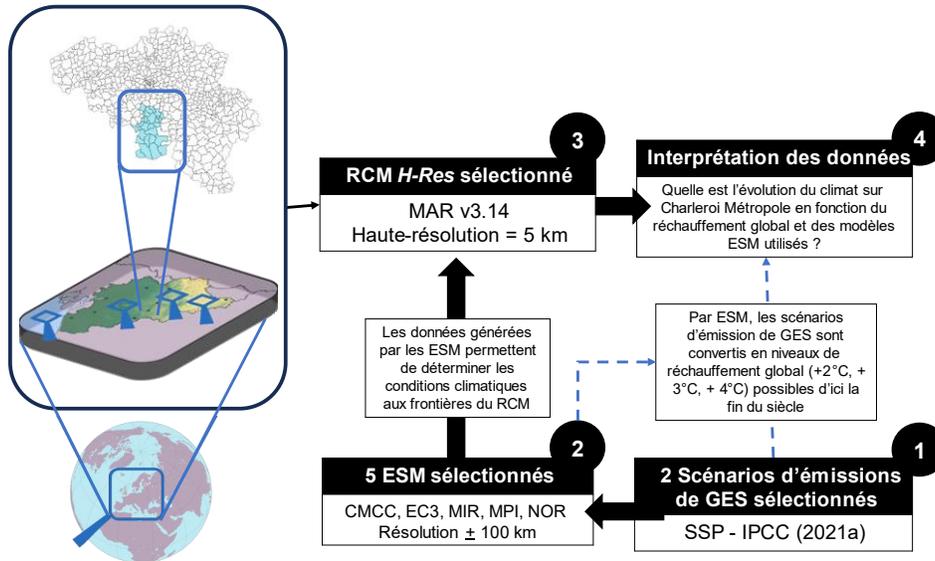


Figure 31 – Schéma récapitulatif de la méthodologie développée au chapitre 2. Schéma adapté de (IRM, s.d. b).

! Important !

Basée sur la méthodologie décrite tout au long du chapitre 2, l'ensemble des analyses par variable est disponible dans le « **Catalogue des variables** » situé à la fin de ce document. Le présent chapitre en fait la synthèse en analysant : **(i) la tendance de l'évolution annuelle ou saisonnière des variables** pour des niveaux de réchauffement de +2°C, +3°C et +4°C par rapport à la période historique (1995-2014) ; **(ii) la significativité de ces tendances**. Ces analyses se basent sur l'évolution **des moyennes et écarts-types des 5 couples MAR-ESM**. **Le détail par couple MAR-ESM et par zone pour chaque variable est disponible dans le catalogue**. Sur les graphiques, une période de 20 ans indicative est associée à chaque niveau de réchauffement global et correspond à la période moyenne des périodes où les 5 ESM sélectionnés atteignent ce niveau de réchauffement global.

Dans l'ensemble des tableaux, les règles suivantes sont suivies et sont rappelées en note de bas de page :

- Une valeur significative est affichée en gras (voir section 2.6.4)
- Une valeur non significative est affichée sans mise en forme particulière
- Pour les précipitations, si les tendances pour une variable sont différentes selon les couples MAR-ESM, une diminution sera indiquée en rouge (« plus sec ») et une augmentation en bleu (« plus humide »).

3.1. Comment lire les analyses du catalogue de variables ?

Dans ce chapitre dédié aux résultats, une page sera dédiée à l'étude de chaque variable sur des périodes annuelles et/ou saisonnières. Sur chaque page, seront représentés :

- un **graphique par zone d'étude** (soit 4 graphiques au total), décrivant l'évolution de la variable entre les différents niveaux de réchauffement global (GWL) et la période historique. La variable est donc calculée en termes absolus pour la colonne « histo » et les autres colonnes calculent la variation entre les GWL et la valeur de la période historique (ex : gwl2 vs histo). La figure 32 décrit comment interpréter ces graphiques et se base sur la méthodologie développée au chapitre 2 ;

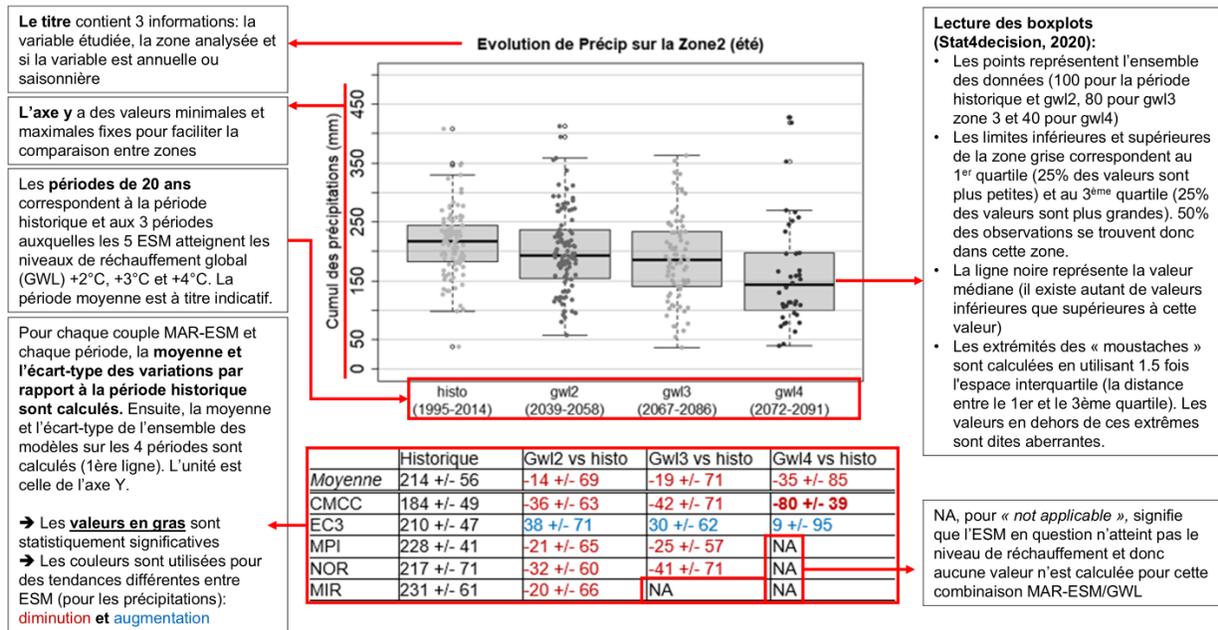


Figure 32 – Guide de lecture pour interpréter les résultats par zone et par variable.

- ensuite, à l'aide du test de Kruskal-Wallis et de sa p-value (section 2.6.4), **une comparaison entre zones est réalisée pour la période gwl3 vs histo** (à gauche sur la figure 33), +3°C à l'échelle globale étant le réchauffement global utilisé comme le plus probable aujourd'hui (voir section 2.3). Cette comparaison est destinée à identifier des variations significativement différentes entre zones. L'espace restant est réservé à l'interprétation qualitative des résultats.

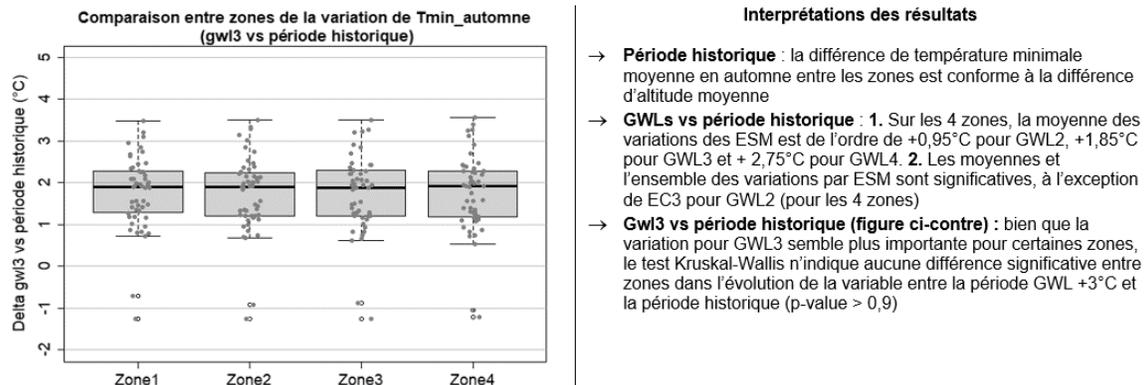


Figure 33 – Comparaison des zones pour gwl3 vs période historique et interprétations des résultats

Avant la lecture des résultats, quelques informations importantes sont à rappeler :

1. des comparaisons seront faites de manière ponctuelle avec Fettweis et al. (2023) qui ont étudié la variation de variables climatiques à l'échelle de la Région wallonne. Par rapport à cette étude, **les périodes de référence sont différentes** quant à leur durée et aux années de début et de fin (20 années entre 1995 et 2014 pour la présente étude, contre 30 années entre 1980 et 2010 pour l'étude sur la région wallonne). Par exemple, pour les températures, ceci induit une période de référence plus chaude pour la présente étude et donc des variations moins importantes ;
2. dans les deux études, la **période de référence n'est pas la période préindustrielle** (1850-1900) et donc une partie de la variation depuis cette période n'est pas captée dans les analyses. En effet, la **température de l'air en Wallonie a déjà augmenté de +1,3°C** entre la période 1850-1900 et la période 1980-2010 (Fettweis et al., 2023). Cette variation peut être légèrement différente sur les zones de Charleroi Métropole mais cette analyse n'a pas été effectuée ;
3. sur des périodes de 20 ans, les **variations moyennes de variables sont analysées pour dégager des tendances**, et les écarts-types représentent la variabilité naturelle du climat telle que modélisée par les couples MAR-ESM. Cela signifie qu'il y aura toujours des années plus chaudes/froides ou plus sèches/humides que les moyennes calculées. En effet, des variations annuelles importantes peuvent exister au cours d'une période de 20 ans, même si la compensation entre les années présentant des tendances inverses peut aboutir à des variations moyennes non significatives. ;
4. le niveau de **réchauffement global (GWL) sélectionné comme le plus probable aujourd'hui est +3°C**, comme expliqué dans la section 2.3 ;
5. il est finalement important de **prendre en compte les biais de certains couples MAR-ESM** évoqués dans la section 2.2. Ceux-ci sont rappelés quand cela est pertinent.

3.2. Indicateurs et indices liés à la température

Voici des résultats transversaux à l'ensemble des variables analysées pour les températures :

- l'ensemble des variables étudiées par les couples MAR-ESM indique une **augmentation statistiquement significative (ou une diminution dans le cas des jours de gel)**, pour les périodes correspondant à un réchauffement global de +3°C et de +4°C. Pour la période correspondant à un réchauffement global de +2°C, certaines variations **ne sont pas statistiquement significatives mais indiquent néanmoins toutes une augmentation des températures** ;
- pour cette raison, aucun code couleur n'est utilisé dans les tableaux pour indiquer un réchauffement ou un refroidissement ;
- bien que les températures soient initialement légèrement différentes entre les zones de Charleroi Métropole (différence inférieure à 1°C), aucune variable analysée ne génère de variations statistiquement significatives entre les zones pour la variation entre un monde globalement plus chaud de 3°C et la période historique (1995-2014).

Pour simplifier le propos, les éléments ci-dessus permettent de synthétiser les analyses d'une seule zone de Charleroi Métropole sans perdre d'information significative sur les autres zones. La zone sélectionnée est la zone 2 (zone urbaine), théoriquement la plus à risque pour les épisodes de chaleur urbains. L'analyse des autres zones est disponible dans le catalogue des variables.

3.2.1. Températures moyennes, maximales et minimales

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Température moyenne journalière (°C)	Année	10,65 +/- 0,74	0,98 +/- 0,81	1,88 +/- 0,75	2,8 +/- 0,77
	Été	18,6 +/- 1,3	1,28 +/- 1,29	2,35 +/- 1,39	3,86 +/- 1,19
	Hiver	3,64 +/- 1,38	0,79 +/- 1,26	1,69 +/- 0,83	2,28 +/- 1,13
	Printemps	9,42 +/- 1,19	0,81 +/- 1,31	1,54 +/- 1,19	2,08 +/- 1,28
	Automne	10,82 +/- 0,9	1,04 +/- 1,07	1,96 +/- 1,22	2,98 +/- 0,97

Tableau 13 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour la température moyenne journalière, à l'échelle annuelle et saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). Valeurs significatives.

Pour la température moyenne journalière (tableau 13), l'ensemble des résultats sont significatifs pour les niveaux de réchauffement global de +3°C et +4°C. Ils sont également significatifs pour un réchauffement global de +2°C, pour l'automne et la moyenne annuelle. Ceci est similaire aux résultats de Fettweis et al. (2023), à l'exception de la variation pour l'été qui n'est pas significative pour +2°C (1,28 < 1,3). Bien que non significative de peu pour +2°C, l'été est la saison qui se réchauffe le plus rapidement, en raison de futurs étés plus secs et plus ensoleillés. Cette variation plus importante de la température moyenne en été par rapport à la

moyenne annuelle est conforme avec les travaux du GIEC (Fettweis et al., 2023). Finalement, pour les valeurs significatives, la deuxième saison qui se réchauffe le plus est l'automne et la saison qui se réchauffe le moins est le printemps.

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Température maximale moyenne journalière (°C)	Été	22,77 +/- 1,7	1,45 +/- 1,66	2,58 +/- 1,89	4,3 +/- 1,56
	Hiver	5,39 +/- 1,28	0,8 +/- 1,2	1,63 +/- 0,82	2,22 +/- 1,11
	Printemps	12,6 +/- 1,4	0,77 +/- 1,53	1,56 +/- 1,45	2,03 +/- 1,53
	Automne	13,4 +/- 1,06	1,17 +/- 1,31	2,15 +/- 1,51	3,26 +/- 1,29

Tableau 14 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour la température maximale journalière, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). **Valeurs significatives**

L'analyse pour les températures maximales moyennes journalières (tableau 14) suit celle des températures moyennes journalières : pour les valeurs significatives, l'été se réchauffe davantage que (dans l'ordre décroissant) : l'automne, l'hiver et finalement le printemps. On remarque que pour l'été, les variations dans un monde à +3°C et +4°C deviennent très importantes si l'on se rappelle que le réchauffement en Wallonie est environ de +1,3°C entre la période préindustrielle (1850-1900) et la période 1980-2010. Dans notre cas, les maxima de températures en été sont à nuancer, car MAR-MIR surestime les températures maximales en été sur la période de référence (section 2.2 : validation des couples MAR-ESM). Mais cette précaution n'est valable que pour le réchauffement global de +2°C, le modèle n'atteignant pas les niveaux de réchauffement de +3°C et +4°C.

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Température minimale moyenne journalière (°C)	Été	14,57 +/- 0,92	1,09 +/- 0,97	2,09 +/- 0,96	3,37 +/- 1,03
	Hiver	1,84 +/- 1,5	0,83 +/- 1,36	1,79 +/- 0,88	2,36 +/- 1,16
	Printemps	6,36 +/- 1,07	0,88 +/- 1,15	1,59 +/- 0,98	2,2 +/- 1,07
	Automne	8,4 +/- 0,87	0,95 +/- 0,94	1,83 +/- 1,08	2,77 +/- 0,85

Tableau 15 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour la température minimale journalière, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). **Valeurs significatives**

L'analyse pour les températures minimales moyennes journalières (tableau 15) suit la même logique, à l'exception que la variation en été pour un monde à +2°C est significative. Sinon, comme pour les variables précédentes, l'été se réchauffe davantage que (dans l'ordre décroissant) : l'automne, l'hiver et finalement le printemps. La variation en hiver a un impact important sur l'évolution du nombre de jours de gel, qui est analysée plus loin.

3.2.2. Jours d'été et jours de gel

Pour rappel, un jour est considéré comme un **jour d'été** lorsque la température maximale journalière est $\geq 25^{\circ}\text{C}$ et considéré comme un **jour d'hiver** lorsque la température minimale journalière est $\leq 0^{\circ}\text{C}$ (voir section 2.6.3).

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Jours d'été	Annuel	34,96 +/- 12,41	13 +/- 14,94	23,26 +/- 17,78	40,55 +/- 17,63
Jours de gel	Annuel	34,7 +/- 15,53	-8,18 +/- 13,7	-18,27 +/- 8,36	-19,12 +/- 8,09

Tableau 16 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour le nombre de jours d'été annuel et le nombre de jours de gel annuel. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). **Valeurs significatives**

Les **variations pour le nombre de jours d'été annuel (tableau 16) sont significatives** pour tous les niveaux de réchauffement et atteignent une augmentation moyenne de 13 jours/an pour un réchauffement global de +2°C, 23 jours/an pour un réchauffement global de +3°C et 40 jours/an pour un réchauffement global de +4°C (figure 34). **Cela équivaut approximativement à un mois supplémentaire de jours d'été chaque année pour les niveaux de réchauffement les plus élevés.** Ceci a un impact important sur l'évolution des indices de confort thermique analysés plus loin et les risques associés pour les populations (section 2.6.5).

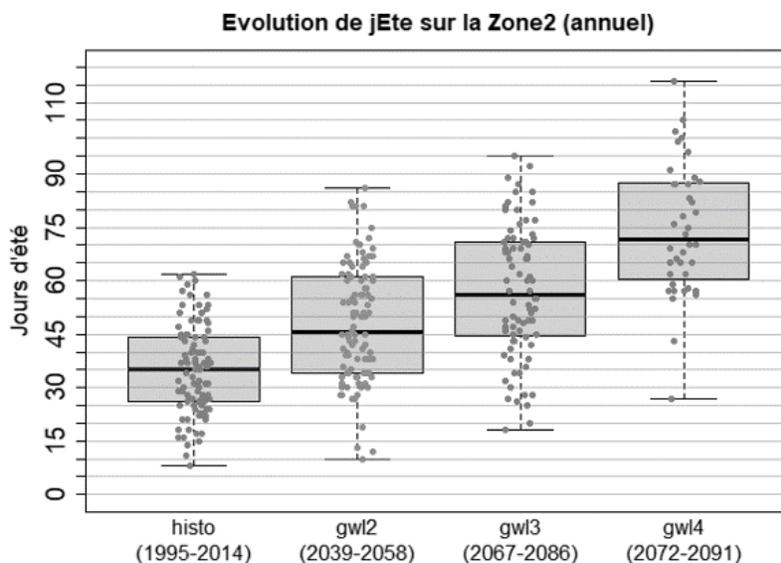


Figure 34 – Évolution du nombre de jours d'été annuel en zone 2 ($T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$)

Concernant le **nombre de jours de gel annuel (tableau 16)**, la tendance devient significative à partir des niveaux de réchauffement global +3°C et + 4°C, pour atteindre respectivement 18 et 19 jours de gel en moins chaque année, ce qui équivaut à une diminution de plus de 50% par rapport à la période historique. Cette tendance est encore plus forte sur les autres zones de

Charleroi Métropole (voir catalogue des variables). La variation maximale est atteinte sur la zone 4 qui est une zone principalement agricole et forestière. Cette forte variation est représentée sur la

figure 35, également disponible dans le catalogue des variables.

Cette diminution du nombre de jours de gel est principalement due à l'augmentation de la température minimale en hiver et au printemps (section 3.2.1). Fettweis et al. (2023) se sont également intéressés au nombre de jours de gel en Wallonie pour les mois de mars et d'avril. Bien que les résultats ne soient significatifs que pour le mois de mars et un réchauffement global de +4°C, les tendances vont vers une diminution du nombre de jours de gel pendant ces deux mois sans pour autant disparaître, comme l'illustre la figure 35 où les années pratiquement sans jours de gel sont l'exception pour un réchauffement global de +3°C et +4°C. Les auteurs concluent ainsi que « **les gelées dites tardives devraient se faire plus rares mais devraient toutefois persister, augmentant ainsi le risque de dommages sur la végétation et les cultures qui démarreront elles plus tôt** ». En effet, ils analysent que la période végétative (non étudiée ici) sera plus longue de 2 mois en moyenne répartis sur le début de l'année et la fin de l'année, en raison des températures minimales plus importantes tout au long de l'année (section 3.2.1).

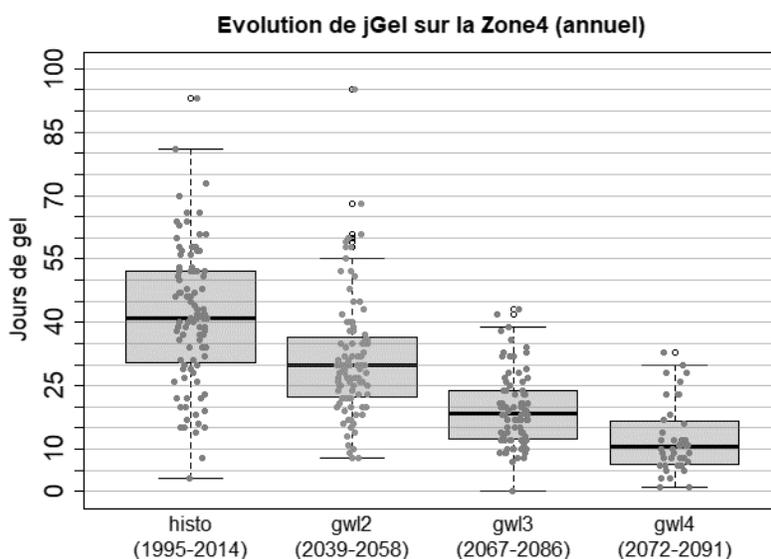


Figure 35 – Évolution du nombre de jours de gel annuel sur la zone 4 de Charleroi Métropole (zone agricole et forestière).

3.2.3. Jours de vigilance canicule et vagues de chaleur de 5, 7, 10 et 15 jours

Pour rappel, les méthodes de calcul des variables étudiées ci-dessous sont développées dans les sections 2.6.3 et 2.6.4. Avec la méthode appliquée pour les vagues de chaleur, une vague de

chaleur qui durerait 9 jours correspond à 5 vagues de chaleur de 5 jours successives ou 3 vagues de chaleur de 7 jours successives. L'interprétation des résultats doit en tenir compte.

L'ensemble des variations des variables étudiées dans le tableau 17 montrent une augmentation significative du nombre de jours de vigilance canicule et de vagues de chaleur, quelle que soit leur durée. Néanmoins, ces variations ne sont significatives qu'à partir d'un réchauffement global de +3°C ou +4°C. Pour un réchauffement global de +2°C, les résultats sont différents par rapport à Fettweis et al. (2023) pour les mêmes variables. Une hypothèse pouvant expliquer cette différence est la période de référence de la présente étude, débutant 15 ans plus tard et finissant 5 ans plus tard. La période de référence utilisée ici est donc plus « chaude ». Ceci expliquerait également les variations moins élevées de la variable par rapport à l'étude sur la Région wallonne. Une autre hypothèse pourrait être que le territoire de Charleroi Métropole serait moins impacté par une variation à court terme, mais la véritable cause reste à déterminer.

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Jours de vigilance canicule	Annuel	0,54 +/- 1,36	1,18 +/- 2,38	3,2 +/- 4,43	6,2 +/- 6,3
Vagues de chaleur de 5 jours	Annuel	3,53 +/- 4,78	3,89 +/- 7,71	8,56 +/- 10,86	16,7 +/- 12,89
Vagues de chaleur de 7 jours	Annuel	2,11 +/- 3,66	2,78 +/- 6,7	6,45 +/- 9,52	14,1 +/- 11,5
Vagues de chaleur de 10 jours	Annuel	1,07 +/- 2,61	1,44 +/- 5,17	4,4 +/- 7,47	10,25 +/- 9,76
Vagues de chaleur de 15 jours	Annuel	0,3 +/- 1,46	0,72 +/- 3,33	2,44 +/- 4,9	5,4 +/- 7,01

Tableau 17 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour le nombre de jours de canicule et pour le nombre de vagues de chaleur de 5, 7, 10 et 15 jours. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type).

Valeurs significatives.

En raison de l'augmentation des températures minimales et maximales en été, **le nombre de jours de vigilance canicule suit également une tendance à la hausse** avec une variation de 3 jours supplémentaires par an en moyenne pour un réchauffement de +3°C et 6 jours par an en moyenne pour un réchauffement global de +4°C. Pour rappel, si les valeurs historiques et les variations paraissent faibles par rapport aux vagues de chaleur, un jour de vigilance canicule correspond simultanément à une moyenne sur 3 jours de la température maximale $\geq 34^{\circ}\text{C}$ et à une moyenne sur 3 jours de la température minimale $\geq 19^{\circ}\text{C}$.

En raison de l'augmentation des températures maximales journalières en été (section 3.2.1), **le nombre de vagues de chaleur de 5, 7, 10 et 15 jours suit une tendance à la hausse significative pour les degrés de réchauffement global de +3°C et +4°C**. Il est important de souligner que les vagues de chaleur de 10 et 15 jours, rares sur la période historique vont se multiplier si le réchauffement global atteint +3°C ou +4°C. Pour un réchauffement global de +3°C, les vagues de chaleur de 10 jours ou 15 jours peuvent atteindre, respectivement, 4 et 2 occurrences annuelles (en prenant en compte la remarque préliminaire sur la méthode de calcul).

Le niveau de variations pouvant être atteint par ces variables est éventuellement à nuancer. En effet, dans la section 2.2 traitant de la validation des couples MAR-ESM, nous avons vu que le couple MAR-CMCC surestimait le nombre de jours de vigilance canicule et de vagues de chaleur de 15 jours sur la période de référence.

3.2.4. Indices d'inconfort thermique

Pour rappel, ces indices sont construits sur la base de la température maximale journalière et du taux d'humidité journalier minimum (section 2.6.5), généralement concomitants et calculés sur un pas de temps d'une heure. Les seuils d'inconfort thermique, quand ils sont dépassés, le sont donc sur une durée minimale d'une heure sans indication sur l'intensité et la durée du dépassement de ce seuil au cours de cette journée. Les 3 premiers indices (tableau 18) correspondent à un seuil d'inconfort thermique *a minima* léger, alors que le dernier indice (tableau 19) correspond à un niveau d'inconfort thermique *a minima* important.

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Humidex ≥ 30	Annuel	29,63 +/- 10,8	13,9 +/- 13,42	24,44 +/- 16,68	43,3 +/- 16,81
Heat Index ≥ 27	Annuel	27,65 +/- 11,06	12,3 +/- 13,51	20,58 +/- 16,69	36,73 +/- 17,64
WBT ≥ 19	Annuel	31,61 +/- 10,5	16,33 +/- 13,28	28,66 +/- 16,15	49,45 +/- 16,58

Tableau 18 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour le nombre de jours où le seuil d'inconfort thermique léger est dépassé (3 indices). Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). **Valeurs significatives.**

Dans le tableau 18, l'ensemble des tendances sont à la hausse et **sont significatives**, quels que soient les indices et les niveaux de réchauffement global. Bien qu'il y ait des différences entre indices (section 2.6.5), les tendances sont importantes et similaires entre les indices, avec une augmentation d'environ +50% pour +2°C, +100% pour +3°C et +150% pour +4°C. **En termes absolus, cela correspond approximativement au passage de 4 semaines d'inconfort thermique *a minima* léger par an sur la période historique à [7;8] semaines sur la période correspondant à un réchauffement global de +3°C, voire 10 semaines par an d'inconfort thermique *a minima* léger dans un monde à +4°C.**

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Humidex ≥ 40	Annuel	2,08 +/- 2,59	3,84 +/- 4,34	7,31 +/- 6,76	13,2 +/- 8,44

Tableau 19 – Moyenne des variables sur la zone 2 de Charleroi Métropole pour le nombre de jours où le seuil Humidex de 40 est dépassé, correspondant à un inconfort thermique important. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). **Valeurs significatives.**

Dans le tableau 19, l'Humidex est ici calculé pour un niveau d'inconfort important (voir section 2.6.5 et annexe 5). Pour le seuil sélectionné, les tendances sont également à la hausse et **sont significatives** pour l'ensemble des degrés de réchauffement. En termes absolus, la variable démarre de 2 jours par an où le seuil est dépassé sur la période historique et augmente de respectivement 4, 7 et 13 jours par an pour les niveaux de réchauffement global de +2°C, +3°C et +4°C, soit une augmentation de 650% dans ce dernier cas. **En d'autres termes, le nombre de jours par an où l'Humidex dépasse le seuil d'un inconfort thermique important peut passer à une semaine par an dans un monde à 3°C et à deux semaines par an dans un monde à +4°C.** Ceci est représenté sur la figure 36 qui permet de rappeler que les valeurs mentionnées dans le tableau 19 sont des moyennes et que des valeurs plus basses ou plus extrêmes sont également possibles en raison de la variation interannuelle.

Finalement, pour ces indices, il n'y a pas de comparaison possible avec la Wallonie dans son ensemble, ces indices n'ayant pas été étudiés à cette échelle.

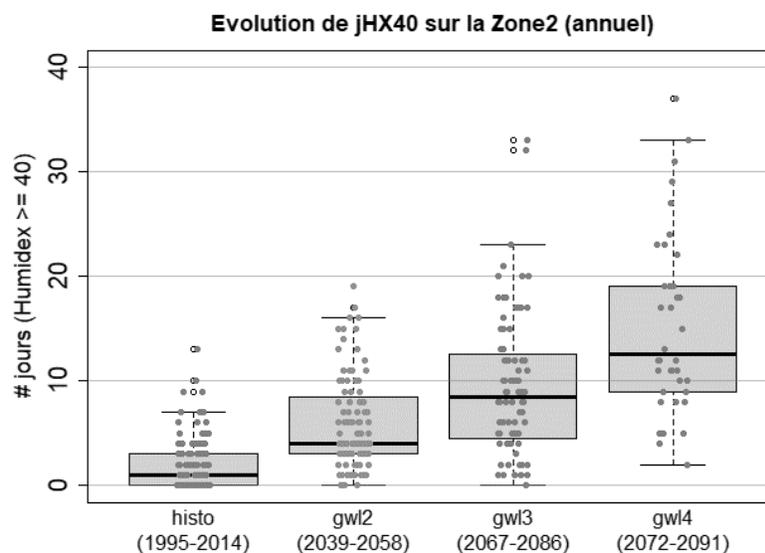


Figure 36 – Évolution du nombre de jours par an où l'Humidex dépasse la valeur de 40 en zone 2

3.3. Indicateurs et indices liés aux précipitations

Voici des résultats transversaux à l'ensemble des variables analysées pour les précipitations :

- l'étude de la tendance des variables de précipitations est beaucoup plus complexe que pour les températures. À quelques exceptions près pour un réchauffement global de +4°C, **aucune des variations moyennes analysées n'est statistiquement significative**. Les résultats par couples MAR-ESM, non significatifs pour l'écrasante majorité, montrent parfois des tendances divergentes entre les saisons qui seront analysées (plus sèches, plus humides ou plus rarement, sans modification) ;
- contrairement aux variables de température qui ont une tendance uniforme à la hausse, un code couleur est ici utilisé pour représenter cette complexité dans les tendances. Une tendance **plus humide sera indiquée en bleu** et une tendance **plus sèche sera indiquée en rouge** ;
- contrairement aux températures, les quantités annuelles 'initiales' de précipitations sur la période de référence diffèrent sur les quatre zones pour la période de référence (1995-2014), comme l'indique le tableau 20. Néanmoins, aucune variable analysée ne génère de variations statistiquement significatives entre les zones pour la variation entre un monde globalement plus chaud de 3°C et la période historique (1995-2014) ;
- bien que des divergences entre zones pour un même modèle apparaissent dans certains cas, les éléments ci-dessus permettent de synthétiser les analyses d'une seule zone de Charleroi Métropole sans perdre d'information significative sur les autres zones. La zone sélectionnée est la zone 4 (plateau rural et forestier), étant la zone comptant le plus de précipitations sur la période de référence. L'analyse des autres zones est disponible dans le catalogue de variables.

Variable	Période	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4
Cumul annuel de précipitations (mm)	1995-2014	738 +/- 108	782 +/- 112	811 +/- 116	920 +/- 129

Tableau 20 – Moyenne des variables pour le cumul annuel de précipitations pour la période historique (1995-2014) pour les 4 zones de Charleroi Métropole.

3.3.1. Cumul de précipitations annuel et saisonnier

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Cumul de précipitations (mm)	Année	920 +/- 129	34 +/- 150	42 +/- 130	88 +/- 152
	Été	221 +/- 55	-12 +/- 75	-21 +/- 71	-34 +/- 84
	Hiver	259 +/- 65	10 +/- 70	36 +/- 69	75 +/- 61
	Printemps	201 +/- 45	25 +/- 61	19 +/- 47	38 +/- 70
	Automne	239 +/- 56	11 +/- 71	9 +/- 73	9 +/- 63

Tableau 21 – Moyenne des variables sur la zone 4 de Charleroi Métropole pour les précipitations annuelles et saisonnières. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type). **Valeurs significatives** / Plus humide / Plus sec

Le tableau 21 décrit l'évolution des cumuls de précipitations à l'échelle annuelle et saisonnière. L'ensemble des résultats ne sont **pas significatifs, à l'exception de la variation hivernale pour un réchauffement global de +4°C**, qui équivaldrait à **+30% de précipitations** en moyenne sur cette saison. Ceci est illustré par la figure 37 où les résultats deviennent significatifs (partie non hachurée) sur Charleroi Métropole (zone encadrée) en passant d'un monde à +3°C à un monde à +4°C.

Sans être significatives, la variable annuelle et celles du printemps et de l'automne indiquent également des augmentations de précipitations (bien que faibles), au fur et à mesure que le réchauffement global s'amplifie. Concernant l'été, les résultats, également non significatifs, indiquent plutôt une diminution des précipitations qui s'amplifie également avec le réchauffement global. Il faut nuancer ce dernier résultat car MAR-CMCC, MAR-EC3 et MAR-NOR ne génèrent pas assez de précipitations en été, à des degrés de réchauffement différents (section 2.2).

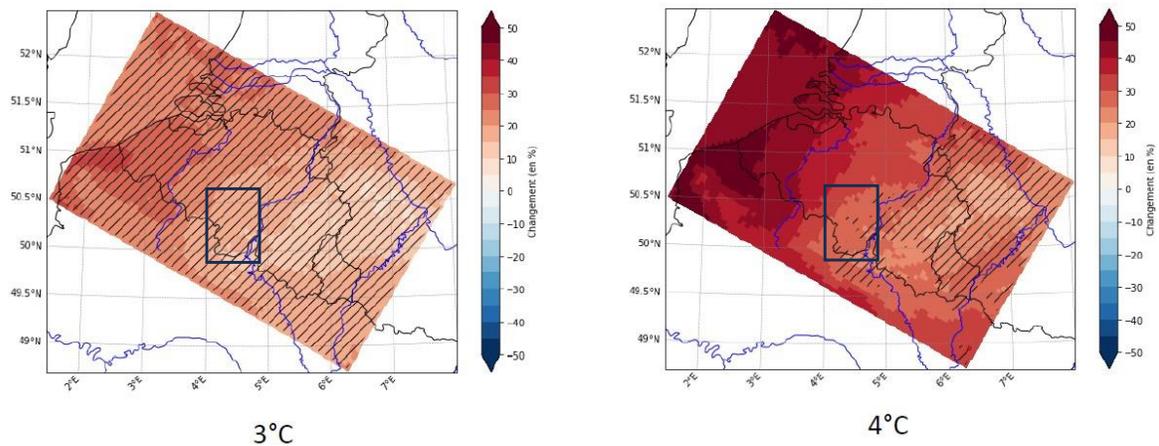


Figure 37 (Fettweis et al., 2023, figure 13) – Changement dans le cumul des précipitations en hiver pour un réchauffement global de +3°C (gauche) et +4°C (droite). Un point de grille barré signifie que le changement n'est pas significatif.

Dans Fettweis et al. (2023), les auteurs indiquent qu'une étude portant sur le niveau de réchauffement global de +2°C a démontré qu'un été sur trois serait potentiellement plus sec, sans exclure des étés plus humides, comme en 2021. En effet, en travaillant avec des moyennes, des étés très secs ne sont pas à exclure étant donné que, sur une période de 20 ans, ces étés (très secs) peuvent être compensés par d'autres étés plus humides, menant en moyenne à des changements non significatifs à l'échelle des périodes étudiées, comme c'est le cas ici. Cette variabilité des quantités de précipitations, non perceptible en travaillant avec des moyennes, est visualisable sur les boxplots dans le catalogue des variables. Un exemple est donné sur la figure 38 où l'on voit la grande variabilité dans les cumuls de précipitations en été sur la zone 4. Par exemple, pour un niveau de réchauffement global de +2°C (en bleu sur la figure 38), 100 étés ont été modélisés (20 années x 5 modèles). On constate que les étés les plus secs ont des cumuls de précipitations dans l'intervalle [50;100] mm/été et les étés les plus humides sont dans l'intervalle [300;430] mm/été, alors que la moyenne sur la période de référence est de 221 +/- 55 mm/été.

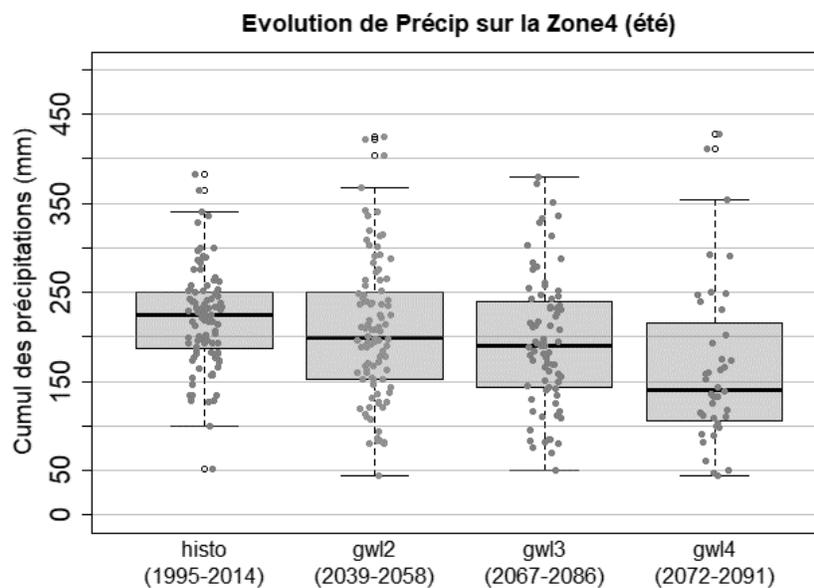


Figure 38 – Évolution du cumul des précipitations en été sur la zone 4 pour les différents niveaux de réchauffement global.

Dans la même étude, les auteurs constatent que « la variabilité interannuelle [l'écart-type] est en valeur absolue bien plus grande que le changement moyen pour tous les degrés de réchauffement [à l'exception ici de l'hiver dans un monde à +4°C], 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 (IPCC, 2021) ». Cette incertitude a été évoquée dans la section 1.6 concernant les projections pour les précipitations à l'échelle européenne.

Finalement, une analyse plus fine du catalogue de variables permet d'indiquer si l'ensemble des couples MAR-ESM indiquent les mêmes tendances. Pour des niveaux de réchauffement de +3°C et +4°C, les tendances globales sont les suivantes : des **cumuls annuels et des hivers plus humides** (5 ESM sur 5 avec quelques valeurs significatives), des **étés plus secs** (4 ESM sur 5 avec quelques valeurs significatives), des **printemps plus humides** (4 modèles sur 5), et des **automnes où la tendance est complexe** à identifier (les variations étant faibles et opposées).

3.3.2. Jours de précipitations, fortes précipitations et très fortes précipitations

Pour rappel, les catégories ne sont pas exclusives et une journée totalisant, par exemple, des précipitations de 25 mm sera comptabilisée dans les 3 catégories (section 2.6.3).

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Nombre de jours de précipitations (≥ 1,5 mm)	Été	44,2 +/- 8,7	-3,9 +/- 10,1	-5,1 +/- 9,6	-7,6 +/- 11,5
	Hiver	47,1 +/- 9,1	-0,7 +/- 8,3	2,5 +/- 7,8	5,5 +/- 6,8
	Printemps	42,2 +/- 8,6	2,8 +/- 9	1,5 +/- 8,6	3 +/- 8,2
	Automne	42,5 +/- 7,7	-1,2 +/- 9,3	-1,5 +/- 8,9	-2,4 +/- 7,1
Nombre de jours de fortes précipitations (≥ 10 mm)	Été	3,3 +/- 1,9	0 +/- 2,7	-0,1 +/- 2,9	-0,7 +/- 2,9
	Hiver	5,9 +/- 3,1	0,7 +/- 3,2	1,8 +/- 3,4	4 +/- 3,1
	Printemps	3,1 +/- 1,8	1,1 +/- 2,4	0,7 +/- 1,9	2 +/- 3,2
	Automne	5,5 +/- 2,7	0,8 +/- 3,3	1 +/- 2,8	1,3 +/- 2,7
Nombre de jours de très fortes précipitations (≥ 20 mm)	Été	0,3 +/- 0,5	0,1 +/- 0,8	0,1 +/- 0,7	0,1 +/- 0,8
	Hiver	0,5 +/- 0,7	0,3 +/- 1,1	0,4 +/- 1,1	1 +/- 1,2
	Printemps	0,4 +/- 0,7	0,1 +/- 0,8	0,1 +/- 0,6	0,3 +/- 1
	Automne	0,7 +/- 0,9	0,4 +/- 1,2	0,4 +/- 1,1	0,3 +/- 1,2

Tableau 22 – Moyenne des variables sur la zone 4 de Charleroi Métropole pour les jours de précipitations, fortes précipitations et très fortes précipitations, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type).

Valeurs significatives / Plus humide / Plus sec

À nouveau, l'ensemble des résultats du tableau 22 sont non significatifs, à l'exception des jours de fortes précipitations en hiver et au printemps, et des jours de très fortes précipitations en hiver, pour un réchauffement global de +4°C. À l'exception du nombre de jours de précipitations en hiver dans un monde à +2°C, il n'y a pas de tendances contradictoires pour les trois niveaux de réchauffement (diminution ou augmentation au fur et à mesure du réchauffement). Il faut également rappeler que MAR-CMCC, MAR-EC3 et MAR-NOR ne génèrent pas assez de précipitations en été, à des degrés de réchauffement différents (section 2.2), ce qui a une influence sur leur calcul des jours de précipitations.

Pour **les jours de précipitations, aucune valeur n'est significative**, quel que soit le niveau de réchauffement global. Une analyse plus fine du catalogue de variables prévoit, pour la zone 4 et un niveau de réchauffement global de +3°C : des **étés avec moins de jours de précipitations** (3 ESM sur 4 dont certaines variations sont significatives), des **hivers avec plus de jours de précipitations** (3 ESM sur 4), **des printemps avec plus de jours de précipitations** (2 ESM sur 4 ont des variations plus humides plus importantes), et des **automne où la tendance est plus claire que dans la section précédente, avec moins de jours de précipitations** (3 ESM sur 4). Ces résultats sont transposables pour un réchauffement global de +4°C où les deux modèles vont dans le même sens et accentuent la tendance.

Pour **les jours de fortes précipitations, aucune valeur n'est significative, à l'exception de l'hiver et du printemps dans un monde plus chaud de 4°C**. Une analyse plus fine du catalogue de variables prévoit, pour la zone 4 et un niveau de réchauffement global de +3°C : des **étés où le nombre de jours de fortes précipitations** diminue mais est quasi nul (les ESM se neutralisent mais une diminution significative apparaît pour MAR-CMCC dans un monde à +4°C), des **hivers avec plus de jours de fortes précipitations** (3 ESM sur 4, dont des variations significatives pour MAR-CMCC et MAR-EC3 dans un monde à +4°C), **des printemps avec plus de jours de fortes précipitations** bien que la variation soit faible (les ESM se neutralisent mais une diminution significative apparaît pour MAR-CMCC et MAR-EC3 dans un monde à +4°C), et des **automne avec plus de jours de fortes précipitations** (3 ESM sur 4). Ces résultats sont transposables à un réchauffement de +4°C où les modèles vont dans le même sens et accentuent la tendance.

Pour **les jours de très fortes précipitations, l'ensemble des variations indiquent une augmentation du nombre de jours, quelle que soit la saison, bien que ces variations soient très faibles. Celles-ci sont non significatives, à l'exception de celle pour l'hiver dans un monde à +4°C**. Une analyse plus fine du catalogue de variables prévoit, pour la zone 4 et un niveau de réchauffement global de +3°C : des **étés où le nombre de jours de très fortes précipitations** augmente mais de manière presque imperceptible [+0,1] (2 ESM sur 4, et 2 ESM avec une variation nulle), des **hivers avec plus de jours de très fortes précipitations** (2 ESM sur 4 avec des variations significatives et 2 ESM avec une variation nulle, dont 2 ESM avec des augmentations significatives pour +4°C), **des printemps avec plus de jours de très fortes précipitations** (2 ESM sur 4, et 1 ESM avec une variation nulle), et des **automne avec plus de jours de très fortes précipitations** (4 ESM sur 4). Ces résultats sont transposables à un réchauffement de +4°C où les modèles vont dans le même sens et accentuent la tendance.

Le tableau 23 synthétise ces tendances pour la zone 4, dans un monde à +4°C, bien que non significatives pour la plupart et sans prendre en compte le nombre d'ESM validant l'information.

Saison	Jours de précipitations	Jours de fortes précipitations	Jours de très fortes précipitations
Été	-	-	+
Hiver	+	+ !	+ !
Printemps	+	+ !	+
Automne	-	+	+

Tableau 23 - Synthèse des tendances par saison dans un monde à +4°C pour les jours de précipitations, fortes précipitations et très fortes précipitations. **Valeurs significatives (!).**

Comme expliqué plus longuement dans la section précédente, des variations moyennes très faibles sur une période de 20 ans peuvent néanmoins cacher des variations annuelles fortes avec plus ou moins de jours de (très) (fortes) précipitations (voir boxplots dans le catalogue de variables pour visualiser la variabilité interannuelle).

3.3.3. Cumul maximal sur 1 jour et sur 5 jours

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Cumul maximal sur un jour (mm)	Été	18,3 +/- 7,2	0,4 +/- 11,2	-0,2 +/- 8,6	-2,2 +/- 8
	Hiver	19,7 +/- 6	1,1 +/- 5,5	2 +/- 6,6	5,4 +/- 6,6
	Printemps	18 +/- 5,8	0,8 +/- 7,7	1,8 +/- 7,2	3,8 +/- 8,2
	Automne	21,3 +/- 6,7	3,6 +/- 10,2	2,8 +/- 9,3	4,1 +/- 10,4
Cumul maximal sur 5 jours (mm)	Été	42,5 +/- 12,2	-0,2 +/- 16,4	-0,4 +/- 14,9	-7,4 +/- 14,1
	Hiver	45,9 +/- 12,4	3,4 +/- 12,9	4,2 +/- 15,1	12,9 +/- 14,1
	Printemps	39,6 +/- 11,2	2,9 +/- 15,9	5 +/- 13,1	6,7 +/- 15,7
	Automne	45,3 +/- 11,8	7 +/- 17,9	6,1 +/- 15	6,9 +/- 19,8

Tableau 24 – Moyenne des variables sur la zone 4 de Charleroi Métropole pour le cumul journalier sur un jour et sur cinq jours, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type).

Valeurs significatives/ Plus humide / Plus sec

Pour les cumuls maximaux sur 1 et 5 jours (tableau 24), aucune variation n'est significative, à l'exception de l'hiver dans un monde à +4°C pour le cumul maximal sur 5 jours. Les tendances non significatives sont des étés avec moins de cumuls sur 1 jour ou 5 jours et des hivers, automnes et printemps avec plus de cumuls sur 1 jour ou 5 jours.

Pour le cumul maximal sur un jour, une analyse plus fine du catalogue de variables prévoit, pour la zone 4 et un niveau de réchauffement global de +3°C : des étés avec un cumul moins important (3 ESM sur 4), des hivers avec un cumul plus important (3 ESM sur 4), des printemps avec un cumul plus important (3 ESM sur 4), et des automnes avec un cumul

plus important (3 ESM sur 4). Ces résultats sont transposables pour un réchauffement global de +4°C où les deux modèles vont dans le même sens et accentuent la tendance.

Pour le **cumul maximal sur 5 jours**, une analyse plus fine du catalogue de variables prévoit, pour la zone 4 et un niveau de réchauffement global de +3°C : des **étés avec un cumul moins important** (3 ESM sur 4), des **hivers avec un cumul plus important** (4 ESM sur 4), des **printemps avec un cumul plus important** (4 ESM sur 4), et des **automne avec un cumul plus important** (4 ESM sur 4). Ces résultats sont transposables pour un réchauffement global de +4°C, à l'exception que les deux modèles divergent en été.

3.3.4. Maximum de jours secs consécutifs

Variable	Temporalité	Référence (1995-2014)	+2°C (2039-2058)	+3°C (2067-2086)	+4°C (2072-2091)
Maximum de jours secs consécutifs (#jours)	Été	11,4 +/- 4,8	1 +/- 5,4	1,7 +/- 6,4	4,9 +/- 8,8
	Hiver	10,9 +/- 5,2	-0,1 +/- 4,4	-1,1 +/- 4,7	-2,9 +/- 2,3
	Printemps	11,2 +/- 3,5	-0,3 +/- 4,4	0,7 +/- 4,8	-0,2 +/- 4,4
	Automne	11,7 +/- 5	0,4 +/- 5,2	-0,4 +/- 4,3	0,6 +/- 4,6

Tableau 25 – Moyenne des variables sur la zone 4 de Charleroi Métropole pour le maximum de jours secs consécutifs, à l'échelle saisonnière. Comparaison de la variation par niveau de réchauffement global par rapport à la période de référence (moyenne de la variation +/- moyenne de l'écart-type).

Valeurs significatives / Plus humide / Plus sec

Pour le maximum de jours secs consécutifs (tableau 25), aucune variation n'est significative, à l'exception de l'été dans un monde à +4°C. Les tendances sont des étés avec le nombre de jours secs consécutifs qui augmentent (significatif à +4°C), des hivers où le nombre diminue, et des automnes et printemps aux tendances qui ne sont pas similaires sur les trois niveaux de réchauffement.

Une analyse plus fine du catalogue de variables prévoit, pour la zone 4 et un niveau de réchauffement global de +3°C : des **étés avec un maximum de jours secs consécutifs plus important** (4 ESM sur 4), des **hivers avec un maximum de jours secs consécutifs moins important** (3 ESM sur 4), des **printemps avec un maximum de jours secs consécutifs plus important** (4 ESM sur 4 mais la tendance s'inverse pour un réchauffement de +4°C), et des **automne avec un maximum de jours secs consécutifs moins important** (3 ESM sur 4 mais la tendance s'inverse pour un réchauffement de +4°C). Il faut également rappeler une dernière fois que MAR-CMCC, MAR-EC3 et MAR-NOR ne générant pas assez de précipitations en été à des degrés de réchauffement différents (section 2.2), une influence sur le maximum de jours secs consécutifs en été peut alors apparaître.

3.4. Limites de l'étude

Comme évoqué en introduction du présent chapitre, l'objectif de la présente étude est de dégager des tendances (significatives ou non) sur une série de variables de températures et de précipitations. L'analyse est néanmoins affectée par différentes limites, qui peuvent orienter les résultats à la hausse ou à la baisse selon les indicateurs.

Concernant les ESM sélectionnés, bien que choisis pour leur capacité à reproduire les conditions atmosphériques sur l'Europe, un ESM capable de simuler le passé n'est pas automatiquement pertinent pour prédire les conditions futures (Fettweis et al., 2023). De plus, bien qu'ils soient représentatifs d'un large spectre de sensibilité climatique, leur nombre a été limité à 5 pour des raisons de puissance de calcul et de temps de traitement. Finalement, la modélisation va continuer à se développer davantage à l'avenir au sein des initiatives comme CMIP et CORDEX, grâce au développement de nouvelles puissances de calcul et à l'optimisation des codes sources. En effet, comme évoqué dans la section 1.3, bien que leur capacité à modéliser des changements globaux (ex : température globale, niveau des océans) devienne très significative, il reste de nombreux points d'amélioration concernant les modélisations à l'échelle régionale ou locale. Cela inclut la modélisation des nuages et des processus qui en découlent (ex : précipitations), la simulation des événements extrêmes de précipitations et de température, l'intégration de modifications de la circulation générale (ex : blocage atmosphérique) ou encore l'intégration de points de bascule non-linéaires comme un ralentissement du Gulf Stream.

Concernant le modèle MAR, celui-ci est à sa version 3.14 et est en évolution continue. Pour rappel, dans la section 2.1, forcé par ERA, la capacité du modèle à reproduire le climat présent a été évaluée à l'échelle wallonne (Fettweis et al., 2023). Bien que la corrélation soit importante pour les températures ($> 0,9$), celle-ci pourrait augmenter davantage à l'avenir. Concernant les précipitations, le modèle montre une bonne capacité à prévoir le cumul de précipitations mais pas leur répartition temporelle (corrélation comprise entre 0,57 et 0,65). Cet exercice de vérification des biais n'a pas été répliqué à l'échelle de Charleroi Métropole et se base sur les résultats à l'échelle wallonne. Des divergences pourraient alors apparaître localement.

Concernant les couples MAR-ESM, les biais par rapport à MAR-ERA n'ont pas été testés spécifiquement à l'échelle de Charleroi Métropole. Cette étude se base sur les biais analysés à l'échelle de la région wallonne (section 2.2) et des divergences pourraient apparaître localement.

Concernant la zone d'étude, elle a été découpée en quatre sous-zones sur la base de critères théoriques (altitude et occupation du sol), non validés empiriquement sur la base d'observations (ex : via l'albedo moyen des surfaces concernées).

Concernant la durée des périodes de référence et des Global Warming Levels (GWL), celle-ci est de 20 ans alors que le standard est de 30 ans. Ceci peut engendrer plusieurs difficultés comme la comparaison avec d'autres études, comme par exemple CORDEX.be v1 ou l'étude sur la Région wallonne, basées sur une période de référence de 30 ans). En effet, les tendances de la présente étude sont globalement conformes à celles de Fettweis et al. (2023) avec des tendances significatives pour l'ensemble des variables de température et des tendances non-significatives pour les variables de précipitations. Par contre, la comparaison des variations par période ou par couple MAR-ESM ne peut aller beaucoup plus loin, car la durée des périodes est différente et des périodes plus courtes peuvent dégager des résultats moins significatifs.

Concernant les résultats produits, ceux-ci sont des moyennes annuelles et saisonnières, cette étude ne concerne donc pas la survenue d'évènements extrêmes ponctuels. Par contre, des années ou saisons plus chaudes/froides ou plus sèches/humides ne sont pas à exclure étant donné que, sur une période de 20 ans, des variations peuvent être compensées par d'autres, menant à des variations moyennes non significatives sur la période étudiée. Cette variabilité annuelle, éventuellement tirée vers le haut ou vers le bas par des évènements extrêmes, est visualisable sur les boxplots dans le catalogue des variables.

Finalement, d'autres GWL intermédiaires pourraient être explorés, comme +2,5°C et +3,5°C. La différence entre, par exemple +2°C et +3°C, est en effet très importante en termes d'impacts. Des scénarii intermédiaires apparaîtront probablement dans la littérature au fur et à mesure que les politiques d'atténuation et d'adaptation s'implémenteront et s'affineront. Il faut garder à l'esprit que la principale incertitude pour des projections climatiques reste la quantité des GES qui sera émise dans les prochaines décennies.

De manière générale, cette réduction des biais de modélisation est « *largement abordée à l'IRM au travers du développement d'une théorie fondamentale de la dynamique de l'erreur de modélisation et de sa correction* » (IRM, 2020, p.60).

4. RISQUES ET IMPACTS : VERS L'ADAPTATION

Dans le chapitre précédent, la partie centrale de la présente étude, des tendances ont été identifiées concernant les variables de températures et de précipitations sur le territoire de Charleroi Métropole. **Ces modifications engendrent et engendreront des risques accrus pour les populations, les entreprises, l'environnement et les infrastructures, avec des impacts sanitaires et économiques, potentiellement importants et récurrents à défaut de mesures d'adaptation rapides et efficaces.**

La littérature traitant des risques et des impacts potentiels du changement climatique est importante (IPCC, 2022 ; PwG, 2022) et pourrait faire l'objet de plusieurs sujets d'étude à part entière à l'échelle locale. En lien avec les conclusions de la section précédente, ce chapitre évoquera donc brièvement les risques et impacts principaux des changements climatiques sur Charleroi Métropole, en se basant sur la littérature scientifique existante à l'échelle wallonne. Une attention particulière sera accordée à quelques chiffres liés aux épisodes de canicules et leurs impacts sur les populations. Sur cette thématique, quelques pistes seront finalement évoquées pour développer des analyses plus fines sur le territoire de Charleroi Métropole.

4.1. Risques et impacts pour le territoire de Charleroi Métropole

« *Un risque naturel est le produit d'un **aléa** par la **valeur des éléments à risque** [population, les bâtiments, les activités économiques, les ouvrages de génie civil, les infrastructures...] et par **leur degré de vulnérabilité** » (Ozer, 2019).*

Risque = aléa climatique x éléments à risques x vulnérabilité

À valeur et vulnérabilité égales, le risque augmente potentiellement à travers l'augmentation de la fréquence et de l'intensité d'aléas climatiques comme l'augmentation des fortes précipitations, des sécheresses prolongées ou des vagues de chaleur importantes. Suite aux inondations de 2021 et à quelques épisodes récents de canicules et sécheresses, la *Plateforme wallonne du GIEC* (PwG), mandatée par la Région wallonne, a réalisé un état des lieux de l'adaptation en Wallonie (PwG, 2022). L'énumération des risques, impacts et mesures d'adaptation est importante et concernent de nombreux secteurs répertoriés comme suit : **énergie, biodiversité, forêts, eau, agriculture et alimentation, villes, infrastructures et aménagement du territoire, santé, tourisme, justice climatique, divers et 'tous secteurs confondus'**. Dans le cadre de la mise en place de politiques d'adaptation, ce rapport souligne également l'importance de considérer le déficit d'adaptation par secteur, de comprendre les limites souples et dures de l'adaptation en raison de l'existence de seuils et de points de bascule liés au niveau de réchauffement global (IPCC, 2022), de privilégier les solutions basées sur la nature et d'éviter la

maladaptation¹³. Finalement, ce rapport se base également sur un autre rapport clé traitant des impacts socio-économiques du changement climatique en Belgique, qui quantifie les impacts économiques annuels potentiels par secteur (De Ridder et al., 2020)

En lien avec la section 2.5 décrivant le territoire de Charleroi Métropole et le chapitre 3 décrivant les tendances simulées des variables de températures et de précipitations, les risques, impacts et mesures d'adaptation pour Charleroi Métropole sont ici évoqués pour trois secteurs principaux, sur la base du rapport PwG (2022) :

- **l'agriculture et l'alimentation**, les terres agricoles représentant 43 % de surfaces du territoire analysé (Sytra, 2022), principalement en zones 1, 3 et 4 ;
- **les forêts**, représentant une part significative du territoire, principalement en zone 4 ;
- **la santé**, étant un des secteurs transversaux concernant l'ensemble de la population, principalement en zone 2 qui est très urbanisée et sujette aux îlots de chaleur urbains.

L'agriculture est extrêmement sensible à divers aléas climatiques, principalement les sécheresses, les fortes précipitations et le gel tardif (ECORES-TEC, 2011). Comme projeté au chapitre 3, des tendances semblent se dégager pour ces éléments sur le territoire de Charleroi Métropole : une augmentation du maximum de jours secs consécutifs en été et une diminution en hiver ; une augmentation du nombre de jours de fortes et très fortes précipitations sur l'ensemble des saisons et principalement en hiver ; une diminution du nombre de jours de gel mais qui n'exclue pas l'apparition de jours de gel tardifs (Fettweis et al., 2023). Bien que l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique puisse avoir un impact positif sur certaines cultures, l'effet combiné de cet *effet CO₂* et des impacts des aléas climatiques est incertain. « *Pour le scénario RCP 8.5 d'ici 2050, la valeur totale de la production agricole par rapport à 2019 devrait varier [en Belgique] entre une augmentation de 45 M€/an et une diminution de 606 M€/an lors de la prise en compte des pertes de terres liées au climat (par exemple par salinisation, érosion, inondation) et lors de la prise en compte de la baisse des prix liée au climat sur le marché international* » (De Ridder et al., 2020). Des pistes d'adaptation sont évoquées comme : la prise en compte des projections climatiques, des risques d'inondation et d'érosion des sols dans les mesures agro-environnementales ; l'amplification de la recherche pour des cultures alternatives plus adaptées à l'évolution projetée du climat ; le développement de l'agroécologie ; une meilleure gestion des troupeaux et de leur alimentation ; l'adaptation des régimes alimentaires ; la réduction du gaspillage alimentaire. La prise de conscience de cette problématique est de plus en plus présente chez les acteurs de terrain mais peine à passer à l'agenda politique (Thibaut et al., 2023).

¹³ la maladaptation fait référence à des « *actions ou à l'inaction qui peuvent conduire à un risque accru de conséquences néfastes liées au climat et à une augmentation de la vulnérabilité au changement climatique* » (IPCC, 2022). Ex : en privilégiant une seule solution comme la climatisation, il y a un risque accru d'îlots de chaleur urbain.

Les forêts sont impactées par « *les changements climatiques, notamment la hausse moyenne des températures, qui influencent la physiologie, la phénologie foliaire, la distribution des espèces, les processus biogéochimiques et les interactions entre ces différents éléments. Les arbres ont une faible capacité d'adaptation due à leur temps de génération long* » (PwG, 2022). Elles sont également sensibles à la sécheresse, entraînant leur dépérissement par stress hydrique et par l'augmentation de problèmes sanitaires (ex : scolytes). Certaines régions de Wallonie sont plus vulnérables au stress hydrique comme la Calestienne, en zone 4 (Claessens et al., 2017). Enfin, la combinaison sécheresse-canicule peut favoriser les feux de forêt. « *Les coûts dus aux pertes de bois et à la réduction de la qualité (scolytes) sont estimés [en Belgique] à 64 M€/an. Sous RCP 8.5, les pertes liées aux incendies sont estimées d'ici 2071-2100 à 14,3 M€/an et à la moitié de ce montant d'ici 2050* » (De Ridder et al., 2020). Les résultats du chapitre 3 indiquent une augmentation de ces facteurs de risque à Charleroi Métropole : une augmentation de la température moyenne sur l'ensemble des saisons ; une augmentation du maximum de jours secs consécutifs en été ; une augmentation du nombre de jours de vigilance canicule et du nombre de vagues de chaleur de 5, 7, 10 et 15 jours. Les pistes d'adaptation suivantes sont évoquées : le renforcement de la surveillance et de la protection des forêts ; la diversification et le choix des essences ; l'adaptation des méthodes de gestion des forêts à la lumière des dernières connaissances scientifiques (PwG, 2022). Un mémoire récent a exploré différents indicateurs de sécheresses pour les forêts wallonnes (Baudewijn, 2023).

Les impacts potentiels sur la santé peuvent être nombreux (Van de Vel et al., 2021) : « *les extrêmes de chaleur sont la plus grande cause de morbidité liée au climat (épuisement, coup de chaleur, maladies rénales et respiratoires) et touchant principalement les personnes âgées, les personnes atteintes de maladies chroniques et de multimorbidité, les personnes de statut socio-économique faible et la population urbaine (îlots de chaleur) ; une augmentation des températures favorise les maladies transmises par les tiques (ex : maladie de Lyme) et les moustiques [ex : dengue] ; des températures plus élevées et des concentrations atmosphériques élevées de CO₂ et NO₂ ont des implications sur la distribution saisonnière, l'allergénicité et la répartition géographique des espèces allergisantes ; la santé mentale est affectée directement ou indirectement par les changements climatiques ; le risque est accru pour le personnel de santé, en raison de la pénurie de personnel et d'un sous-financement, de ne pas être en mesure d'absorber les soins supplémentaires de manière durable lors de vagues de chaleur plus longues et plus intenses* ». Les résultats du chapitre 3 nous montrent une augmentation projetée significative de nombreux indicateurs favorisant ces risques comme la température maximale moyenne, le nombre de jours de vigilance canicule, le nombre de vagues de chaleur de 5, 7, 10 et 15 jours, le nombre de jours où l'inconfort thermique est léger ou important, le nombre de jours consécutifs sans précipitation pouvant mener à des sécheresses. Certaines communes de Charleroi Métropole ont d'ailleurs déjà été impactées par des restrictions d'eau lors d'épisodes

de sécheresse comme Pont-à-Celles, Aiseau-Presles, Gerpinnes et Couvin (IWEPS, 2020). Les coûts estimés de la mortalité et de la morbidité liés à la chaleur en Belgique sont respectivement de 95M€/an et 188 M€/an, pour le scénario RCP 8.5 en 2050 (De Ridder et al., 2020). Les pistes d'adaptation mentionnées sont (PwG, 2022) : investir dans la sensibilisation (hydratation, efforts à éviter lors des pics de chaleur et d'ozone, allergènes, pollution de l'air, défaillances des chaînes du froid) ; la surveillance, l'alerte précoce et la vaccination (IPCC, 2022) ; la mise en place de plans visant à éradiquer la prolifération des tiques et des moustiques exotiques ; la mise en place de technologies de refroidissement et de ventilation des infrastructures ; améliorer la disponibilité des données, la communication de crise et la gestion des crises par des cartes détaillées des risques et des stress tests ; la végétalisation dans et autour des villes et la promotion du refroidissement passif ; la meilleure prise en compte d'îlots de chaleur urbains dans les documents de planification urbaine en étudiant la morphologie urbaine, en incluant des espaces verts et des espaces d'eau, et en intégrant les nouvelles connaissances autour des nouveaux revêtements de sol et des nouveaux matériaux de construction ; l'adaptation des rythmes de vie lors des phases d'alerte canicule.

4.2. Zoom sur l'impact des vagues de chaleur

Comme expliqué par l'organisme Sciensano (2022), l'impact combiné des pics d'ozone et des vagues de chaleur est encore trop peu investigué en Belgique : *« L'été 2022 a été fort chaud et a été marqué par l'activation de la phase d'avertissement du plan chaleur à 4 reprises. Sciensano a constaté une surmortalité estivale importante, avec des grandes disparités en fonction du sexe et de l'âge. La surmortalité a principalement touché les femmes, surtout à partir de 85 ans. Toutes causes confondues, l'été dans son ensemble a été marqué par une surmortalité de 2 291 décès, soit 5,7% de plus par rapport aux prédictions de Be-MOMO (Belgian Mortality Monitoring). C'est la surmortalité estivale la plus importante depuis les 20 dernières années. À part la chaleur, la COVID-19 a continué également de faire des victimes avec 1 098 décès au cours de l'été, mais les décès COVID-19 n'expliquent pas à eux seuls la surmortalité de la période estivale 2022 [...] Bien que Sciensano n'établisse pas de lien de causalité via le Belgian Mortality Monitoring, la coïncidence entre la surmortalité et des pics de chaleur et d'ozone est un constat récurrent. »*.

Néanmoins, d'autres études ont déjà identifié des pics de mortalité lors de canicules précédentes comme celle de 2003, responsable de 70 000 décès liés à la chaleur en Europe, dont 15 000 en France, 1 500 à Paris, entre 1 200 et 2 000 en Belgique (Gaaloul, 2021), et une surmortalité en Wallonie estimée à 27,7% chez les personnes âgées de plus de 65 ans (Sartor, 2004). Pour la canicule de l'été 2022 en Europe, une étude publiée dans *Nature Medicine* par Ballister et al. (2022) estime la surmortalité en Europe à plus de 60 000 décès, dont 434 en Belgique, principalement chez les personnes âgées. Ils soulignent également l'importance de réévaluer et renforcer les systèmes de surveillance et d'alerte, et de la mise en place de stratégies

d'adaptation des territoires. Dans son rapport 2023, l'initiative *Lancet Countdown*¹⁴, estime que si « la température globale continue d'augmenter jusqu'à un niveau légèrement inférieur à + 2°C, les décès annuels liés à la chaleur à travers le monde devraient augmenter de 370 % d'ici le milieu du siècle, en supposant qu'il n'y ait pas de progrès substantiels sur l'adaptation » (Lancet Countdown, 2023).

Même si le lien entre vagues de chaleur et surmortalité est de plus en plus établi, et que des populations sont statistiquement plus vulnérables, comme les personnes âgées et celles atteintes de maladies cardiovasculaires et respiratoires, il est plus compliqué de généraliser une surmortalité proportionnellement plus importante en fonction du genre et chez les personnes isolées ou célibataires. L'impact précis des vagues de chaleur doit idéalement être étudié en fonction des réalités locales (Furlan, 2023). **Par exemple, des études plus approfondies montrent l'importance des structures sociales des villes et des politiques urbaines lors d'évènements climatiques extrêmes.** Ainsi, dans *Chicago Canicule 1995: Autopsie sociale d'une catastrophe*, l'auteur analyse la vague de chaleur qui a frappé la ville en juillet 1995, responsable de plus de 700 décès. Une analyse poussée sur plusieurs années révèle que les victimes ont été davantage affectées en raison de l'abandon des services publics et du manque de soutien communautaire que par la chaleur elle-même, illustrant ainsi comment les vulnérabilités sociales peuvent amplifier les impacts des catastrophes naturelles (Klinenberg, 2022).

Pour conclure, voici quelques pistes de réflexions pour approfondir la thématique à l'échelle locale :

- **pour explorer les impacts potentiels des futures vagues de chaleur et les mesures d'adaptation nécessaires pour certains secteurs comme la conception des bâtiments ou les systèmes de gestion d'énergie des bâtiments, des projections climatiques affinées à l'échelle des villes sont nécessaires.** Dans ce cadre, dans Doutreloup et al. (2022), les auteurs ont réalisé des simulations climatiques à l'aide du modèle MAR pour explorer la durée, l'intensité et l'amplitude des futurs évènements extrêmes de températures. Les données sont accessibles librement pour plusieurs villes belges, dont Charleroi ;
- **pour explorer la thématique des îlots de chaleur urbains¹⁵,** des modélisations climatiques peuvent être réalisées à une échelle plus fine, en combinant par exemple les

¹⁴ Le *Lancet Countdown* est une initiative mondiale qui vise à suivre les progrès dans la lutte contre les impacts sanitaires du changement climatique. Lancée en 2016 par la revue médicale *The Lancet*, elle réunit des experts de diverses disciplines, y compris la santé publique, la climatologie, l'économie et l'énergie.

¹⁵ L'**îlot de chaleur urbain** (ou *Urban Heat Island (UHI)* en anglais) est défini comme « la différence de température entre une station urbaine et une station de référence située dans un environnement rural, en dehors de la zone urbaine en question » (IRM, 2020).

résultats d'un RCM à une résolution de 4 km avec le modèle *Surfex* qui a une résolution de l'ordre du kilomètre. Ce type d'analyse a été réalisé pour la Région de Bruxelles-Capitale (figure 39) ;

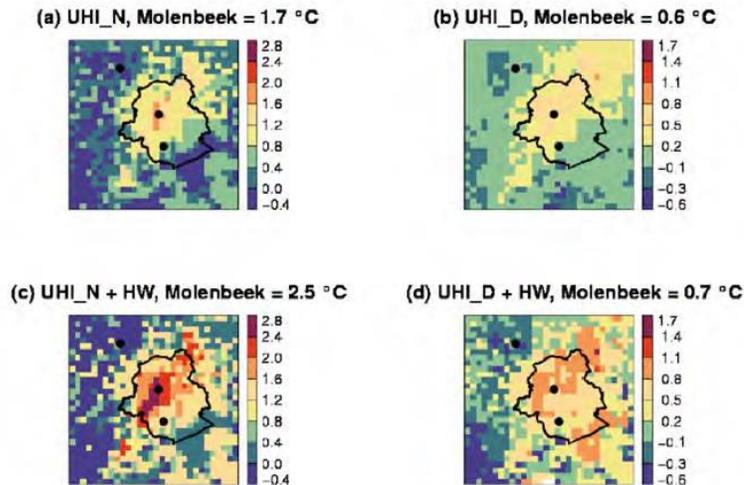


Figure 39 (IRM, 2020, figure 4.7) – Répartition spatiale de l'îlot de chaleur urbain moyen sur 30 ans (1981-2010) pour la Région de Bruxelles-Capitale pendant la nuit (UHI_N = a, c) et le jour (UHI_D = b, d). Les chiffres du haut montrent (a, b) l'îlot de chaleur urbain dans des conditions climatiques moyennes, et les chiffres du bas (c, d) montrent l'îlot de chaleur urbain pendant les vagues de chaleur (HW).

- **pour atténuer les effets des îlots de chaleur urbains**, en supplément des pistes d'adaptation évoquées dans la section précédente, des solutions recommandées ou développées à l'étranger sont explorées et évaluées dans Fardeau (2023) et Gaaloul (2021) ;
- finalement, une étude publiée dans *The Lancet* (lungman et al., 2023) a exploré le nombre de décès qui pourrait être évité lors d'épisodes d'îlots de chaleur urbains en augmentant la couverture végétale dans 93 villes européennes, dont Charleroi. Les résultats indiquent que la température moyenne dans les villes peut diminuer jusqu'à 1,3°C (moyenne de 0,4°C) et ainsi éviter la mort de plus de 2 600 personnes en atteignant 30 % de couverture végétale.

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS : VERS LA RÉSILIENCE DU TERRITOIRE

Dans son dernier rapport, le Haut Conseil pour le Climat français résume les enjeux de la façon suivante : « *Alors que l'exposition accrue de la population, des écosystèmes, des infrastructures et des activités économiques aux conséquences [du changement climatique] présente des risques majeurs pour la société, il devient crucial que l'action climatique protège efficacement les ménages et les entreprises. Celle-ci doit **tenir le cap de la décarbonation et renforcer l'adaptation** pour anticiper les caractéristiques à venir d'un climat qui se réchauffe vite* » (Haut Conseil pour le Climat, 2024). Alors que les enjeux de décarbonation n'ont pas été abordés dans la présente étude, le besoin de comprendre l'évolution du climat à l'échelle locale de Charleroi Métropole, en fonction de l'évolution du climat global, était central. Pour rappel, **l'objectif est, à l'aide de projections climatiques, de tirer le débat public local vers ces questions d'adaptation, de renforcer le développement de services climatiques et de mesures d'adaptation pertinentes pour le territoire de Charleroi Métropole.**

Pour évaluer l'évolution du climat à l'échelle locale en fonction du réchauffement global, des projections climatiques à haute résolution (5 km) ont été réalisées sur le territoire de Charleroi Métropole (découpé en quatre zones) à l'aide du modèle régional MAR v3.14. Celui-ci a été validé, à l'exception de rares biais, pour sa capacité à reproduire le climat présent en Wallonie. Le modèle régional MAR a été forcé par cinq modèles globaux (ESM) sélectionnés pour leur pertinence sur le territoire européen. Les couples MAR-ESM génèrent également peu de biais à l'échelle wallonne concernant les variables étudiées. **Ces projections climatiques sont résumées dans un catalogue de 53 variables liées aux températures et aux précipitations, disponible à la fin du présent document.**

Chaque couple MAR-ESM a généré des données journalières pour la période de référence (1995-2014) et trois périodes de 20 ans correspondant à trois niveaux de réchauffement global d'ici la fin du siècle (+2°C, +3°C et +4°C). Les données générées par chaque variable ont été ensuite agrégées, pour calculer les moyennes et écart-types annuels ou saisonniers, par zone, par niveau de réchauffement et par couple MAR-ESM. Finalement, une moyenne de l'ensemble des couples MAR-ESM a été calculée pour chaque période et chaque zone. Cette méthodologie permet de neutraliser la variabilité potentiellement importante de certains modèles et de définir une plage d'incertitudes. Au-delà des valeurs moyennes, des années ou saisons plus chaudes/froides ou plus sèches/humides ne sont pas à exclure étant donné que les moyennes sont calculées sur une période de 20 ans. En effet, des variations annuelles importantes peuvent exister au cours d'une période de 20 ans, même si la compensation entre les années présentant des tendances inverses peut aboutir à des variations moyennes non significatives.

Les tendances simulées pour les variables de températures sont sans équivoque : un climat global plus chaud entraînera le « réchauffement » significatif de l'ensemble des variables de température à l'échelle locale : augmentation des températures moyennes, minimales et maximales ; augmentation du nombre de jours d'été et diminution du nombre de jours de gel ; augmentation du nombre de jours de vigilance canicule et du nombre de vagues de chaleur de 5, 7, 10 et 15 jours ; augmentation du nombre de jours où la combinaison température-humidité génère un inconfort thermique, léger ou important. La majorité des variations deviennent **statistiquement significatives** à partir d'un réchauffement global de +2°C et **l'amplitude des variations augmente avec des niveaux de réchauffement supérieurs**. Ce réchauffement concerne l'ensemble des zones (sans différence significative) et l'ensemble des saisons, principalement l'été (et l'hiver pour les jours de gel).

Les tendances simulées pour les variables de précipitations sont par contre plus complexes à identifier, en raison de la variabilité interannuelle importante des précipitations en Belgique sur la période de référence, qui rend les **variations moyennes simulées statistiquement non significatives** (à l'exception de quelques variables pour quelques zones et un réchauffement global de +4°C). Même si les tendances ne sont pas significatives et bien que certains couples MAR-ESM se contredisent pour certaines variables, des tendances globales se dégagent et ne contredisent pas la littérature scientifique à d'autres échelles géographiques (IPCC, 2021 ; IRM, 2020 ; Fettweis et al., 2023) : une augmentation du cumul annuel de précipitations ; une augmentation du cumul de précipitations en hiver et une diminution en été ; une augmentation du nombre de jours de fortes précipitations en hiver et une diminution en été ; une augmentation des jours de très fortes précipitations sur l'ensemble des saisons ; une diminution du cumul maximal sur un et cinq jours en été et une augmentation pour les autres saisons ; une augmentation du nombre de jours secs consécutifs en été et une diminution pour les autres saisons.

Sur la base de ces tendances, **le précédent chapitre a brièvement énuméré certains risques importants pour le territoire de Charleroi Métropole (pour la santé, l'agriculture et les forêts)**, avec une attention particulière pour les épisodes de canicules et leurs impacts sur les populations, en particulier pour les publics les plus vulnérables.

Face à ces risques multiples, l'atténuation et l'adaptation sont toutes deux étroitement liées. Alors que l'atténuation est centrale pour limiter le réchauffement global à des niveaux où l'adaptation est encore possible, **cette dernière devient un enjeu de sécurité publique et de bonne gouvernance pour ne pas s'enliser dans la gestion de crises répétitives et onéreuses. L'adaptation des territoires doit ainsi être considérée comme un investissement et non comme une dépense courante**. Les collectivités doivent être exemplaires et chaque entreprise,

chaque famille doivent s'adapter dès que possible (The Shift Project, 2022). Pour y arriver, plusieurs recommandations peuvent être formulées :

- **communiquer vers la société civile et le monde économique en mettant en avant une résilience du territoire porteuse de nombreux bénéfices au regard des risques** : l'enjeu central est de développer un territoire capable d'absorber les impacts des extrêmes climatiques, pour limiter les impacts sur la vie des citoyen.ne.s et l'activité économique. « *La résilience [...] peut devenir un projet commun fédérateur et enthousiasmant pour des concitoyen.ne.s souvent désabus.e.és* » (The Shift Project, 2022). Dans ce contexte, il est urgent d'intégrer le constat pour se lancer dans la création de nouveaux récits afin de « *renouveler nos imaginaires collectifs* » (ADEME, s.d.). Il ne s'agit donc pas de stimuler l'action par la peur, ce qui est globalement inefficace, mais par le renforcement des **intérêts collectifs et individuels**, via la mise en avant des bénéfices liés à l'action comme le développement d'une économie prospère ou notre santé (Gemenne, 2024) ;
- **amplifier la formation des élus, des citoyen.ne.s et des entreprises aux enjeux de l'adaptation**. « *La formation des élus [...] est une priorité. Le partage aux autres parties prenantes du territoire conditionnera la fécondité du dialogue, la compréhension et la qualité des arbitrages politiques* » (The Shift Project, 2022). Par exemple, des outils comme OCARA (*Operational Climate Adaptation and Resilience Assessment*) permettent aux entreprises de développer leur résilience face aux aléas climatiques (Carbone 4, 2021). Une incompréhension des enjeux peut par contre mener à des mesures de *maladaptation* ;
- **développer la culture du risque à l'échelle locale, basée sur une science robuste**. « *La connaissance des risques [...] est primordiale dans nos sociétés. La réduction des risques naturels ne peut se faire que moyennant la réduction de la vulnérabilité au travers des mesures d'anticipation, le développement de la culture de la prévention et le renforcement de la perception [des risques climatiques], la mise en place de politiques adéquates (notamment via l'aménagement du territoire) et la diffusion rapide de l'information [systèmes d'alerte] pour la gestion et l'évaluation des catastrophes* » (Ozer, 2019).

Le développement d'une culture du risque adaptée aux changements climatiques, la formation de l'ensemble des acteurs de la société civile, et la création de nouveaux récits fédérateurs ne pourront se réaliser qu'à l'aide du développement de **services climatiques**¹⁶ adaptés aux réalités des territoires, des citoyen.ne.s et des secteurs économiques. C'est un des objectifs que s'est donné le Centre Climat et les organisations partenaires à travers les futurs résultats de l'initiative CORDEX.be Il actuellement en cours. Dans ce contexte, ce mémoire constitue un exemple de service climatique pour les territoires qui pourrait être standardisé et affiné à l'avenir.

¹⁶ Les **services climatiques** « *sont basés sur des informations climatiques qui aident les individus et les organisations dans leur prise de décision via la collecte et la génération de données pour le climat passé, actuel et futur, ainsi que le développement de produits tels que des cartes, des résultats d'analyses de risques et de vulnérabilité* » (IRM, 2020).

6. ANNEXES

Annexe 1 – Échelles de modélisation climatique sur la Belgique

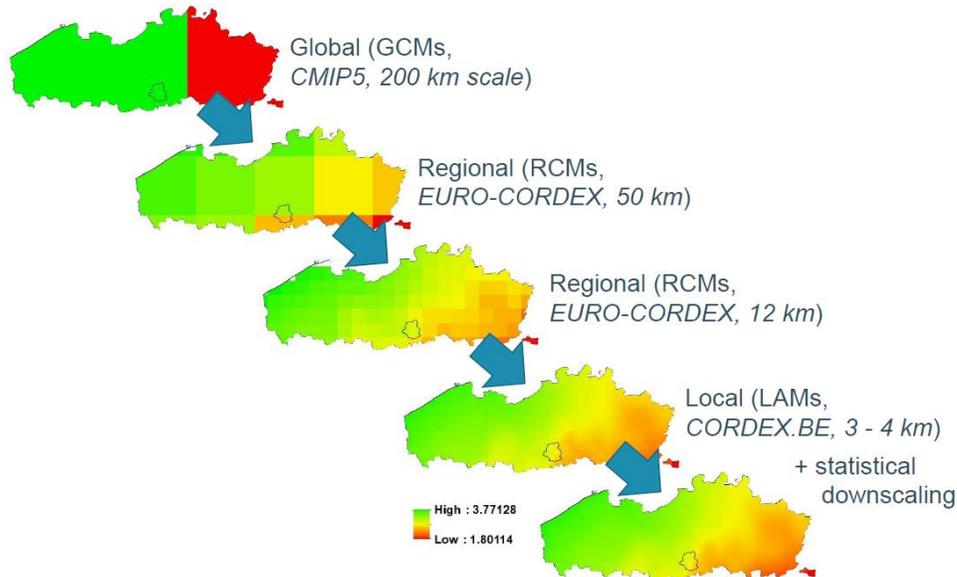


Figure 40 (Willems, 2024) – Échelles de modélisation climatique sur la Belgique.

Annexe 2 – Validation de MAR-ERA par rapport aux observations sur la Wallonie

		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 26 – Fettweis et al. (2023, 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.

Annexe 3 – Validation des MAR-ESM vs MAR-ERA sur la Wallonie (températures)

		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
	Été	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
	Été	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
	Été	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 27 – Fettweis et al. (2023, Tableau 6) – Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs aux températures. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.

Annexe 4 – Validation des MAR-ESM vs MAR-ERA sur la Wallonie (précipitations)

		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
	Été	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
	Été	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
	Été	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
	Été	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
	Été	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
	Été	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
	Été	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 28 – Fettweis et al. (2023, Tableau 7) – Biais absolus standardisés moyennés sur la Wallonie pour les indicateurs relatifs aux précipitations. En rouge/bleu : biais significatif positif/négatif.

Annexe 5 – Humidex : tableau des valeurs et échelle d'inconfort thermique

T° C ↓	taux d'humidité de l'air →															
	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
42°	48	50	52	55	57	59	62	64	66	68	71	73	75	77	80	82
41°	46	48	51	53	55	57	59	61	64	66	68	70	72	74	76	79
40°	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71	73	75
39°	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	66	68	70	72
38°	42	44	45	47	49	51	53	55	58	58	60	62	64	66	67	69
37°	40	42	44	45	47	49	51	52	54	56	58	59	61	63	65	66
36°	39	40	42	44	45	47	49	50	52	54	55	57	59	60	62	63
35°	37	39	40	42	44	45	47	48	50	51	53	54	56	58	59	61
34°	36	37	39	40	42	43	45	46	48	49	51	52	54	55	57	58
33°	34	36	37	39	40	41	43	44	46	47	48	50	51	53	54	55
32°	33	34	36	37	38	40	41	42	44	45	46	48	49	50	52	53
31°	32	33	34	35	37	38	39	40	42	43	44	45	47	48	49	50
30°	30	32	33	34	35	36	37	39	40	41	42	43	45	46	47	48
29°	29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	42	43	45	46
28°	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
27°	27	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
26°	26	26	27	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37	38	39
25°	25	25	26	27	27	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37
24°	24	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	33	33	34	35
23°	23	23	23	24	25	25	26	27	28	28	29	30	31	32	32	33
22°	22	22	22	22	23	24	25	25	26	27	27	28	29	30	30	31

humidex égal ou inférieur à 29 = sensation de confort
humidex compris entre 30 et 34 = sensation d'inconfort
humidex compris entre 35 et 39 = sensation d'inconfort important
humidex compris entre 40 et 45 = danger avéré pour la santé
humidex compris entre 46 et 53 = danger élevé pour la santé
humidex égal ou supérieur à 54 = danger de mort

Figure 41 – HUMIDEX : tableau des valeurs et échelle d'inconfort thermique.

Source : Météo-Paris.com

Lien : <https://www.meteo-paris.com/actualites/chaleur-une-perception-differente-selon-l-humidite-et-les-individus>

Annexe 6 – Heat Index : tableau des valeurs et échelle d'inconfort thermique

HEAT INDEX °F (°C)													
The heat index is an accurate measure of how hot it really feels when the affects of humidity are added to high temperature.													
Temp.	RELATIVE HUMIDITY (%)												
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
110	136												
(47)	(58)												
108	130	137											
(43)	(54)	(58)											
106	124	130	137										
(41)	(51)	(54)	(58)										
104	119	124	131	137									
(40)	(48)	(51)	(55)	(58)									
102	114	119	124	130	137								
(39)	(46)	(48)	(51)	(54)	(58)								
100	109	114	118	124	129	136							
(38)	(43)	(46)	(48)	(51)	(54)	(58)							
98	105	109	113	117	123	128	134						
(37)	(41)	(43)	(45)	(47)	(51)	(53)	(57)						
96	101	104	108	112	116	121	126	132					
(36)	(38)	(40)	(42)	(44)	(47)	(49)	(52)	(56)					
94	97	100	103	106	110	114	119	124	129	135			
(34)	(36)	(38)	(39)	(41)	(43)	(46)	(48)	(51)	(54)	(57)			
92	94	96	99	101	105	108	112	116	121	126	131		
(33)	(34)	(36)	(37)	(38)	(41)	(42)	(44)	(47)	(49)	(52)	(55)		
90	91	93	95	97	100	103	106	109	113	117	122	127	132
(32)	(33)	(34)	(35)	(36)	(38)	(39)	(41)	(43)	(45)	(47)	(50)	(53)	(56)
88	88	89	91	93	95	98	100	103	106	110	113	117	121
(31)	(31)	(32)	(33)	(34)	(35)	(37)	(38)	(39)	(41)	(43)	(45)	(47)	(49)
86	85	87	88	89	91	93	95	97	100	102	105	108	112
(30)	(29)	(31)	(31)	(32)	(33)	(34)	(35)	(36)	(38)	(39)	(41)	(42)	(44)
84	83	84	85	86	88	89	90	92	94	96	98	100	103
(29)	(28)	(29)	(29)	(30)	(31)	(32)	(32)	(33)	(34)	(36)	(37)	(38)	(39)
82	81	82	83	84	84	85	86	88	89	90	91	93	95
(28)	(27)	(28)	(28)	(29)	(29)	(29)	(30)	(31)	(32)	(32)	(33)	(34)	(35)
80	80	80	81	81	82	82	83	84	84	85	86	86	87
(27)	(27)	(27)	(27)	(27)	(28)	(28)	(28)	(29)	(29)	(29)	(30)	(30)	(31)

Category	Heat Index	Possible heat disorders for people in high risk groups
Extreme Danger	130°F or higher (54°C or higher)	Heat stroke or sunstroke likely.
Danger	105 - 129°F (41 - 54°C)	Sunstroke, muscle cramps, and/or heat exhaustion likely. Heatstroke possible with prolonged exposure and/or physical activity.
Extreme Caution	90 - 105°F (32 - 41°C)	Sunstroke, muscle cramps, and/or heat exhaustion possible with prolonged exposure and/or physical activity.
Caution	80 - 90°F (27 - 32°C)	Fatigue possible with prolonged exposure and/or physical activity.

Figure 42 – Heat Index : tableau des valeurs et échelle d'inconfort thermique.

Source : National Weather Service (NWS)

Lien : <https://www.weather.gov/ffc/hichart>

Annexe 7 – Wet Bulb Temperature : graphique des valeurs humidité vs température

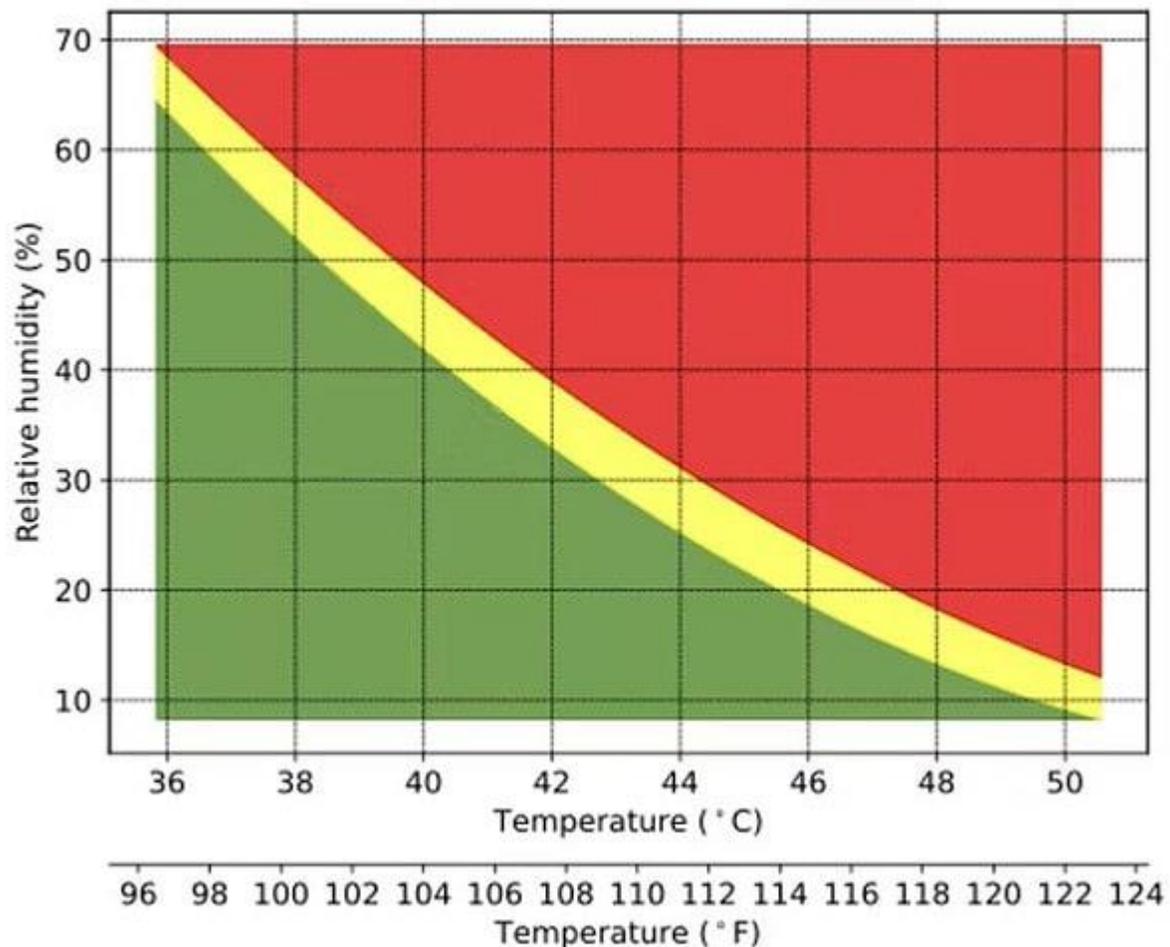


Figure 43 – Wet Bulb Temperature : combinaison température-humidité relative menant à un inconfort thermique.

« Graphique décrivant la relation entre la température de l'air et l'humidité relative jusqu'aux limites critiques, au-dessus desquelles la température corporelle augmente. Le vert indique les conditions où le stress thermique est compensable ou gérable par le corps humain. La zone rouge indique les scénarii non gérables par le corps humain et la zone jaune est une zone dangereuse. »

Source : W. Larry Kenney

Lien : <https://www.nhpr.org/environment/2022-12-09/outside-inbox-whats-a-wet-bulb-temperature-limit>

Annexe 8 – Population (2021) par commune de Charleroi Métropole

Commune	Population (2021)
Aiseau-Presles	10790
Anderlues	12429
Beaumont	7120
Cerfontaine	4998
Chapelle-lez-Herlaimont	14735
Charleroi	201837
Châtelet	35567
Chimay	9647
Courcelles	31053
Couvin	13800
Erquennes	10013
Farciennes	12251
Fleurus	22975
Fontaine-l'Evêque	17959
Froidchapelle	4011
Gerpennes	12735
Ham-sur-Heure-Nalinnes	13655
Les Bons Villers	9463
Lobbès	5861
Merbes-le-Château	4228
Momignies	5310
Montigny-le-Tilleul	10130
Philippeville	9244
Pont-à-Celles	17337
Sambreville	28318
Seneffe	11407
Sivry-Rance	4798
Thuin	14787
Viroinval	5677
Walcourt	18355
Total	580490

Tableau 29 – Population par commune (2021).

Source : Statbel – Chiffres de population par commune, au 1/1/2021

Lien : <https://statbel.fgov.be/fr/themes/census/population/population#Figures>

Une carte des communes est disponible à l'annexe 9

Annexe 9 – Carte des communes de Charleroi Métropole

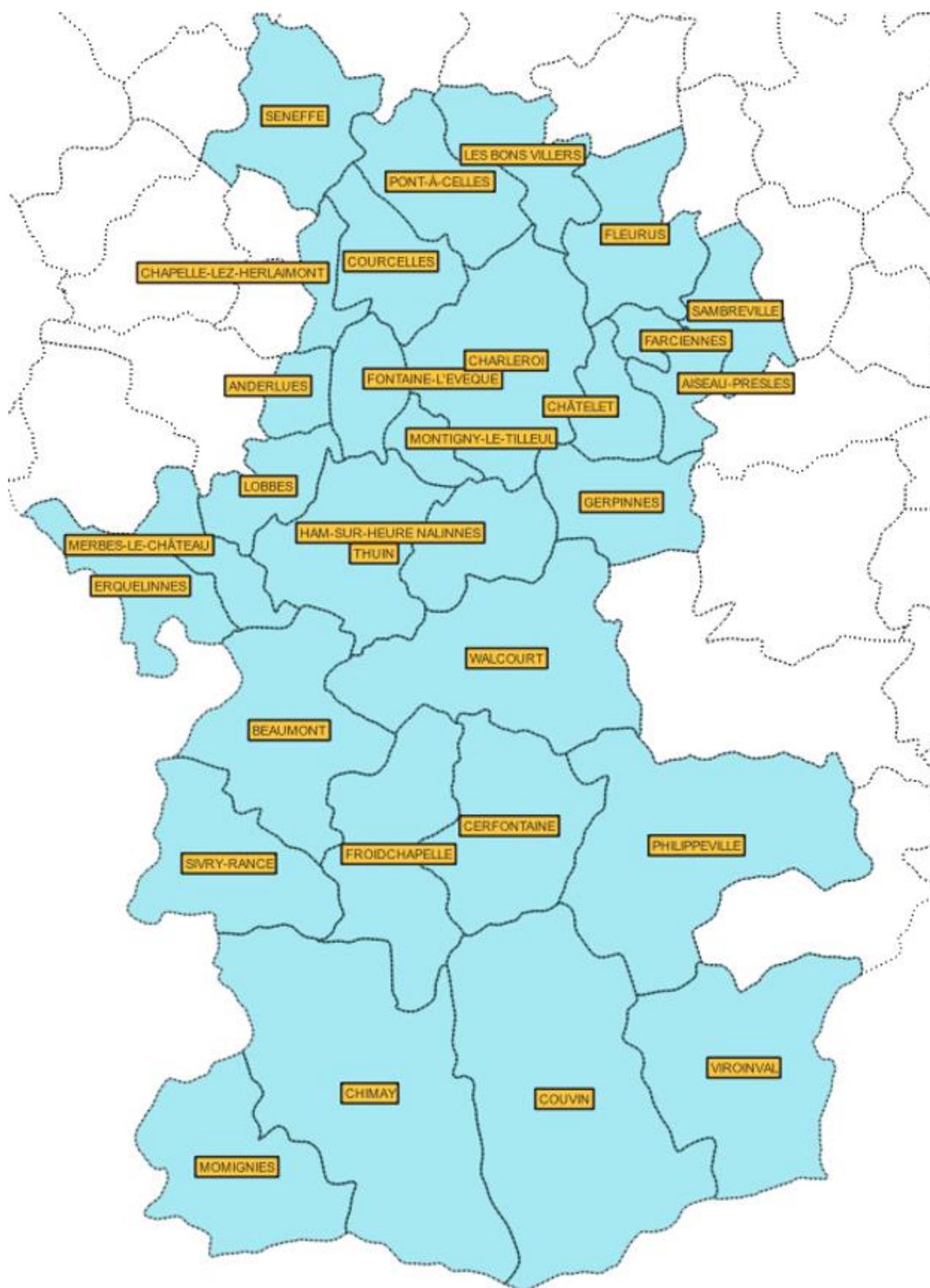


Figure 44 – Carte des 30 communes de Charleroi Métropole.

Source : carte générée via QGIS

7. BIBLIOGRAPHIE

7.1. Littérature scientifique

- Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Turrubiates, R. F. M., Pegenaute, F., Herrmann, F. R., Robine, J. M., Basagaña, X., Tonne, C., Antó, J. M., & Achebak, H. (2023). Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nature Medicine*, 29(7), 1857-1866. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>
- Bechtold, P., Bazile, E., Guichard, F., Mascart, P., & Richard, E. (2001). Amass-flux convection scheme for regional and global models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127 (573), 869-886. <https://doi.org/10.1002/qj.49712757309>
- Brun, É., David, P., Sudul, M., & Brunot, G. (1992). A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 38 (128), 13-22. <https://doi.org/10.3189/S0022143000009552>
- 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>
- Clarke, B., Otto, F., Stuart-Smith, R., & Harrington, L. (2022). Extreme weather impacts of climate change : an attribution perspective. *Environmental Research Climate*, 1(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6e7d>
- Diaconescu, E., Sankare, H., Chow, K., Murdock, T. Q., & Cannon, A. J. (2023). A short note on the use of daily climate data to calculate Humidex heat-stress indices. *International Journal of Climatology*, 43(2), 837–849. <https://doi.org/10.1002/joc.7833>
- 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>
- Doutreloup, S., Fettweis, X., Rahif, R., Elnagar, E., Pourkiaei, M. S., Amaripadath, D., & Attia, S. (2022). Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR : typical and extreme meteorological year and heatwaves. *Earth System Science Data*, 14(7), 3039-3051. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3039-2022>
- Doutreloup, S., Wyard, C., Amory, C., Kittel, C., Erpicum, M., Fettweis, X. (2019). Sensitivity to Convective Schemes on Precipitation Simulated by the Regional Climate Model MAR over Belgium (1987–2017). *Atmosphere*. 2019; 10(1):34. <https://doi.org/10.3390/atmos10010034>
- Fettweis X., Wyard C., Doutreloup S., Belleflamme, A. (2017). Noël 2010 en Belgique: neige en Flandre et pluie en Haute-Ardenne. <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=4568&file=1>
- Gallee, H., & Schayes, G. (1994). Development of a three-dimensional meso-primitive equation model : katabatic winds simulation in the area of Terra Nova Bay. *Monthly Weather Review*, 122, 671-685. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0671:DOATDM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0671:DOATDM>2.0.CO;2)
- Gallée, H., Ghélin, O. F. d., & Broeke, M. R. v. d. (1995). Simulation of atmospheric circulation during the gimex 91 experiment using a meso-gamma primitive equations model. *Journal of Climate*, 8 (11), 2843-2859. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<2843:SOACDT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<2843:SOACDT>2.0.CO;2)

- Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., von Storch, J.-S., Brüggemann, N., Haak, H., & Stössel, A. (2019). Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3241–3281. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>
- Hauser, M., Engelbrecht, F., & Fischer, E. M. (2022). Transient global warming levels for CMIP5 and CMIP6 (v0.3.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7390473>
- Hewitt, C., Mason, S., & Walland, D. (2012). The Global Framework for Climate Services. *Nature Climate Change*, 2(12), 831-832. <https://doi.org/10.1038/nclimate1745>
- Hosokawa, Y., Casa, D. J., Trtanj, J. M., Belval, L. N., Deuster, P. A., Giltz, S. M., Grundstein, A. J., Hawkins, M. D., Huggins, R. A., Jacklitsch, B., Jardine, J. F., Jones, H., Kazman, J. B., Reynolds, M. E., Stearns, R. L., Vanos, J. K., Williams, A. L., & Williams, W. J. (2019). Activity modification in heat: critical assessment of guidelines across athletic, occupational, and military settings in the USA. *International journal of biometeorology*, 63(3), 405–427. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01673-6>
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC (2018): Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24.
- 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.
- IPCC (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- IPCC (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- lungman, T., Cirach, M., Marando, F., Barboza, E. P., Khomenko, S., Masselot, P., Quijal-Zamorano, M., Mueller, N., Gasparrini, A., Urquiza, J., Heris, M., Thondoo, M., & Nieuwenhuijsen, M. (2023). Cooling

- cities through urban green infrastructure : a health impact assessment of European cities. *The Lancet*, 401(10376), 577-589. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(22\)02585-5](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(22)02585-5)
- Kittel, C. (2021). Present and future sensitivity of the Antarctic surface mass balance to oceanic and atmospheric forcings: insights with the regional climate model MAR. Thèse. Orbi ULiège. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/258491>
- Ozer, P. (2019). Les risques naturels. In S. Brunet, C. Fallon, P. Ozer, N. Schiffino, ... A. Thiry, Risques, planification d'urgence et gestion de crise (pp. 95-118). Bruxelles, Belgium: La Chartre. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/239760>
- Ridder, K. D., & Gallée, H. (1998). Land surface–induced regional climate change in southern Israel. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 37 (11), 1470-1485. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<1470:LSIRCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<1470:LSIRCC>2.0.CO;2)
- Scafetta, N. (2021). Testing the CMIP6 GCM Simulations versus Surface Temperature Records from 1980–1990 to 2011–2021 : High ECS Is Not Supported. *Climate*, 9(11), 161. <https://doi.org/10.3390/cli9110161>
- Scafetta, N. (2024). Impacts and risks of “realistic” global warming projections for the 21st-century. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101774. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101774>
- Scholzen, C., & Fettweis, X. (April 2016). First steps of the regional climate model MAR over the Euro-CORDEX domain [Poster presentation]. European Geosciences Union - General Assembly 2016, Vienne, Austria. <https://hdl.handle.net/2268/196182>
- Seland, Ø., Bentsen, M., Seland Graff, L., Olivie, D., Toniazzo, T., Gjermundsen, A., Debernard, J. B., Gupta, A. K., He, Y., Kirkevåg, A., Schwinger, J., Tjiputra, J., Schancke Aas, K., Bethke, I., Fan, Y., Griesfeller, J., Grini, A., Guo, C., Ilicak, M., ... Schulz, M. (2020). The Norwegian Earth System Model, NorESM2 – Evaluation of theCMIP6 DECK and historical simulations [Preprint]. *Climate and Earth System Modeling*. <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-378>
- Sherwood, S. C., & Huber, M. (2010). An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 107(21), 9552-9555. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913352107>
- Sobolowski, S., Somot, S., Fernandez, J., Evin, G., Maraun, D., Kotlarski, S., et al. (2023). EURO-CORDEX CMIP6 GCM Selection & Ensemble Design: Best Practices and Recommendations. Retrieved from <https://zenodo.org/record/7673400>
- Stull, R. B. (2011). Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, 50(11), 2267-2269. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-11-0143.1>
- 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>
- Termonia, P., Van Schaeystbroeck, B., De Cruz, L., De Troch, R., Caluwaerts, S., Giot, O., Hamdi, R., Vannitsem, S., Duchêne, F., Willems, P., Tabari, H., Van Uytven, E., Hosseinzadehtalaei, P., Van Lipzig, N., Wouters, H., Vanden Broucke, S., Van Ypersele, J., Marbaix, P., Villanueva-Birriel, C., Pottiaux, E. (2018a). The CORDEX.be initiative as a foundation for climate services in Belgium. *Climate Services*, 11, 49-61. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.05.001>

- Termonia, P., Van Schaeybroeck, B., De Cruz, L., De Troch, R., Giot, O., Hamdi, R., Vannitsem, S., Duchêne, F., Willems, P., Tabari, H., Van Uytven, E., Hosseinzadehtalaei, P., Van Lipzig, N., Wouters, H., Vanden Broucke, S., Demuzere, M., van Ypersele, J.-P., Marbaix, P., Villanueva-Birriel, C., Pottiaux, E. (2018b). Combining regional downscaling expertise in Belgium: CORDEX and beyond. (Final report - BR/143/A2/CORDEX.be, BRAIN-be). Brussels, Belgium: Politique Scientifique Fédérale (Belgique) = Belgian Federal Science Policy. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/226991>
- Thibaut, K., Schiffino, N., & Ozer, P. (2023). Sécheresse : urgence climatique ou urgence de la planification? Perception du management de crise en Belgique. *VertigO*, Volume 23 Numéro 3. <https://doi.org/10.4000/11pd6>
- Timmermans, G., Doutreloup, S., Fettweis, X., & Attia, S. (2023). Simulation de l'évolution à long terme (1981-2100) des canicules à bruxelles sur base du modèle Atmosphérique régional (mar). *Bulletin - Société Géographique de Liège*, 73-87. <https://doi.org/10.25518/0770-7576.7020>
- Tradowsky, J.S., Philip, S.Y., Kreienkamp, F. *et al.* Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021. *Climatic Change* 176, 90 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03502-7>
- Van Schaeybroeck, B., Mendoza Paz, S., & Willems, P. (2021). *CICADA.be: Coherent Integration of climate projections into Climate ADaptation pLanning tools for BELgium. Final Report.* Brussels: Belgian Science Policy Office. (BRAIN-be - Belgian Research Action through Interdisciplinary Networks).
- Vecellio, D. J., Wolf, S. T., Cottle, R. M., & Kenney, W. L. (2022). Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project). *Journal Of Applied Physiology*, 132(2), 340-345. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00738.2021>
- 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>

7.2. Ressources clés non publiées

- Fettweis, X., Denis, T., Fiol, L. (2023). 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. Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable (ICEDD).
- PwG - Plateforme wallonne pour le GIEC. (2022). Synthèse sur l'adaptation au changement climatique en Wallonie : Un point sur la situation actuelle et les défis futurs (Version 1). https://plateforme-wallonne-giec.be/assets/documents/Adaptation/PwG-SyntheseAdaptation_2022_rapport_rev1.pdf
- Termonia, P., Vandelanotte, K., Serras, F., Van Schaeybroeck, B., Brajkovic, J., Caluwaerts, S., Fettweis, X., Ghilain, N., Van de Vyver, H., van Lipzig, N. (2024). CORDEX.be II: Scenarios & Global Climate Model Selection. <https://cordex.meteo.be/uploads/media/65c2539c1eba1/cordex-be-ii-scenario-report.html?v20231106-1421>

7.3. Autres ressources

- ADEME. (s.d.). La puissance des récits. <https://communication-responsable.ademe.fr/la-puissance-des-recits>
- Anderson, D. (2016). *weathermetrics: Functions to convert between weather metrics* [R package]. Consulté sur <https://cran.r-project.org/web/packages/weathermetrics/index.html>

- AWAC. (s.d.). *La démarche "Adapte ta commune"*. Consulté sur <https://awac.be/2021/08/23/la-demarche-adapte-ta-commune/>
- Baudewijn, M. (2023). Détermination d'un indice de sécheresse atmosphérique des forêts en Belgique. Unpublished master's thesis, Université de Liège, Liège, Belgique, 2023. <https://hdl.handle.net/2268/319914>
- C3S (Copernicus Climate Change Service). (2023). *European State of the Climate 2023*. Consulté sur <https://climate.copernicus.eu/esotc/2023>
- C3S (Copernicus Climate Change Service). (2024). *[Global surface air temperature – Daily average]* [Graphique]. Consulté le 14/8/2024 sur <https://pulse.climate.copernicus.eu/>
- Carbon Brief. (2018). *Timeline: The history of climate modelling*. Consulté sur <https://www.carbonbrief.org/timeline-history-climate-modelling/>
- Carbon Brief. (2019). *CMIP6: The next generation of climate models explained*. Consulté sur <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained/>
- Carbon Brief. (2022). *Mapped: How climate change affects extreme weather around the world*. Consulté sur <https://www.carbonbrief.org/mapped-how-climate-change-affects-extreme-weather-around-the-world/>
- Carbone 4. (2021). Guide méthodologique OCARA : Évaluer la résilience des territoires au changement climatique. <https://www.carbone4.com/guide-methodologique-ocara>
- Carbone 4. (2022). *Scénarios SSP et adaptation*. Consulté sur <https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>
- Casanueva, A. (2016). *wbt.Stull: Compute wet-bulb temperature following the Stull (2011) equation* [R package]. Consulté sur <https://rdrr.io/github/anacv/HeatStress/man/wbt.Stull.html>
- Centre Climat. (s.d.). *À propos du Centre Climat*. Consulté sur <https://www.climatecentre.be/fr/about>
- Centre Climat. (s.d.). *À propos du Centre Climat*. Consulté sur <https://www.climatecentre.be/fr/about>
- Charleroi Métropole. (2021). *Projet de Territoire, 2021*. Consulté sur https://territoire.charleroi-metropole.be/uploads/Projet_de_Territoire_CharleroiMetropole_compressed.pdf
- Charleroi Métropole. (2021). *Projet de Territoire, 2021*. Consulté sur https://territoire.charleroi-metropole.be/uploads/Projet_de_Territoire_CharleroiMetropole_compressed.pdf
- Charleroi Métropole. (2024). *État des lieux et perspectives, 2024*. Consulté sur <https://territoire.charleroi-metropole.be/espace-ressources/documentation-et-inspiration/axes-de-developpement-et-ecosystemes-de-charleroi-metropole-etat-des-lieux-et-perspectives>
- Charleroi Métropole. (2024). *État des lieux et perspectives, 2024*. Consulté sur <https://territoire.charleroi-metropole.be/espace-ressources/documentation-et-inspiration/axes-de-developpement-et-ecosystemes-de-charleroi-metropole-etat-des-lieux-et-perspectives>
- Charleroi Métropole. (s.d.). *Accueil | Charleroi Métropole*. Consulté sur <https://charleroi-metropole.be/fr/>
- Claessens, H. et al. (2017). Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes. Recommandations aux décideurs, propriétaires et gestionnaires – Version 2017 mise à jour sous la coordination de Sophie Himpens, Christian Laurent, et Didier Marchal :

<https://www.gembloux.ulg.ac.be/gestion-des-ressources-forestieres/2019/05/21/le-changement-climatique-etses-impacts-sur-les-forets-wallonnes-recommandation-aux-decideurs-proprietaires-et-gestionnaires/>

Climate Action Tracker (2023). *Warming Projections Global Update*. December 2023. Consulté en ligne: https://climateactiontracker.org/documents/1187/CAT_2023-12-05_GlobalUpdate_COP28.pdf

CORDEX. (s.d.). *What is regional downscaling?* Consulté sur <https://cordex.org/about/what-is-regional-downscaling/>

Data Novia. (s.d.). *Kruskal-Wallis Test in R*. Consulté sur <https://www.datanovia.com/en/lessons/kruskal-wallis-test-in-r/>

De Ridder, K. De, Couderé, K., Depoorter, M., Liekens, I., Pourria, X., Steinmetz, D., Vanuytrecht, E., Verhaegen, K., Wouters, H., 2020. Evaluation of the Socio-Economic Impact of Climate Change in Belgium. Study commissioned by the National Climate Commission <https://www.adapt2climate.be/wp-content/uploads/2020/09/seclim-be-2020-spm-fr.pdf>

Denis, T. (2023). Juillet 2021 vu par le modèle MAR. Unpublished master's thesis, Université de Liège, Liège, Belgique, 2023. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/18717>

Doutreloup, S. (2022). *GEOG2020 - Éléments de météorologie et climatologie. Topoclimatologie* [Diapositives].

ECCC – Environnement et changement climatique Canada. (2018). *Humidex*. Consulté le 15 juillet 2024 sur <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/meteo-saisonniere-dangereuse/aleas-meteorologiques-saison-chaude.html#toc8>

ECORES-TEC. (2011). *Région Wallonne - Étude adaptation au changement climatique*. Consulté sur https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/113405/1/rapport_adptation_changement_climatique_wallonie_fi nal.pdf

EEA – Agence européenne pour l'environnement. (2024). *Urban Adaptation Support Tool: Step 2.4*. Consulté sur <https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/knowledge/tools/urban-ast/step-2-4>

EURO-CORDEX. (s.d.). *Regional Climate Models*. Consulté sur <http://www.euro-cordex.be/meteo/view/en/29035803-Regional+Climate+Models.html>

Fardeau, A. (2023). Intégration de la problématique de l'îlot de chaleur urbain par les systèmes de l'aménagement. Unpublished master's thesis, Université Libre de Liège, 2023. <http://hdl.handle.net/2268.2/18856>

Fettweis, X. (2024). *Blocages anticycloniques/dépressionnaires sur l'Europe et la Belgique en 2023 et 2024* [Image] [Post]. LinkedIn. Consulté sur https://www.linkedin.com/posts/xavier-fettweis-362b73106_il-y-a-1-an-jour-pour-jour-on-se-plaignait-activity-7207412311131652096-kGN4

Furlan, M. (2023). Analyse de l'impact des vagues de chaleur sur la mortalité en milieu urbain : une revue de littérature. Unpublished master's thesis, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, 2023.

Gaaloul, H. (2021). La lutte contre l'îlot de chaleur urbain dans le contexte du changement climatique. Cas de la Région de Bruxelles Capitale. Unpublished master's thesis, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 2021. https://mem-envi.ulb.be/Memoires_en_pdf/MFE_20_21/MFE_Gaaloul_20_21.pdf

Gemenne, F. (2024). *La peur ne sert pas la cause du climat* [Vidéo TEDx]. Publiée le 2 juillet 2024. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=oNd1Da4Dsj0>

- Giorgi, F., Jones, C. and Asrar, G.R. (2009) Addressing Climate Information Needs at the Regional Level: The CORDEX Framework. World Meteorological Organization (WMO) Bulletin, 58, 175.
- Hayhoe, K. (2017). *Science 2017: Climate Science Special Report*. Texas Tech University. Consulté sur <https://science2017.globalchange.gov/chapter/4/>
- Idea Consult et Buur. (2018). *Schéma de développement Territorial de Charleroi Métropole – Diagnostic*. Disponible sur <https://territoire.charleroi-metropole.be/uploads/SDT-DIAGNOSTIC-A3-compressed.pdf>
- IPSL. (s.d.). *L'Institut Pierre-Simon Laplace*. Consulté sur <https://www.ipsl.fr/>
- IRM - Institut Royal Météorologique. (2020). *Rapport climatique*.
- IRM - Institut Royal Météorologique. (s.d. a). *Vague de chaleur*. Consulté le 15 juillet 2024 sur <https://www.meteo.be/fr/infos/dico-meteo/vague-de-chaleur>
- IRM - Institut Royal Météorologique. (s.d. b). *CORDEX simulations*. Consulté le 15 juillet 2024 sur <https://cordex.meteo.be/simulations>
- IRM - Institut Royal Météorologique. (s.d. c). *CORDEX context*. Consulté le 15 juillet 2024 sur <https://cordex.meteo.be/about/context>
- IRM - Institut Royal Météorologique. (s.d. d). *L'atmosphère*. Consulté le 15 juillet 2024 sur <https://www.meteo.be/fr/infos/dico-meteo/atmosphere>
- IWEPS - Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique. (2020). *Sécheresse en Wallonie : Perspectives pour l'avenir - Rapport de l'Observatoire du CAPRO (4ème rapport final)*. <https://www.iweps.be/wp-content/uploads/2020/09/CAPRO-4-secheresse-final2.pdf>
- Klinenberg, E. (2022). *Canicule, Chicago, été 1995*. Companyédition Editions deux-cent-cinq/Ecole urbaine.
- Louis, S. (2023). Développement d'un outil opérationnel de prévision d'apparition de gel printanier dans un vignoble wallon, à l'aide du modèle MAR. Unpublished master's thesis). Université de Liège, Liège, Belgique. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/17338>
- Masson-Delmotte, V. (2024). *Face au changement climatique*. Company édition CNRS/De Vive Voix.
- National Weather Service (NWS). (s.d.). *Heat index*. Consulté sur <https://www.weather.gov/ama/heatindex>
- Otto, F. E. L., van Oldenborgh, G. J., Haustein, K., Uhe, P., van Aalst, M., & Jones, R. G. (2017). *European heat, June 2017*. Consulté sur <https://www.worldweatherattribution.org/european-heat-june-2017/>
- Ozer, P., Cornet, Y., Delclite, A., & Demoulin, A. (2020). Risque naturel et perception des inondations en Wallonie : Enjeux actuels et perspectives. HyperGeo. <https://hypergeo.eu/risque-naturel/>
- Sartor, F. (2004). La surmortalité en Belgique au cours de l'été 2003. Institut scientifique de la santé publique, Section d'épidémiologie. IPH/EPI Reports No. 2004-009
- Sciensano. (2022). *La surmortalité durant l'été 2022*. <https://www.sciensano.be/fr/coin-presse/la-surmortalite-durant-lete-2022>

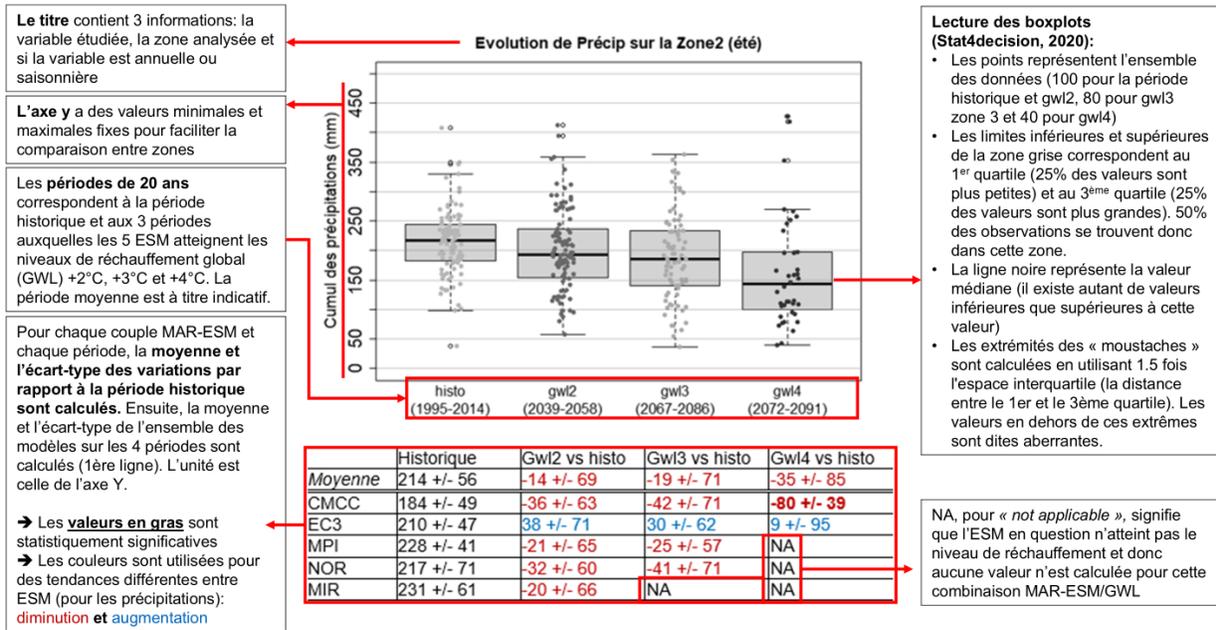
- SPW. (s.d. a). *La coordination régionale de la Convention des Maires*. Consulté le 18 juillet 2024 sur <https://lamppsw.wallonie.be/dgo4/conventiondesmaires/la-coordination-regionale-de-la-convention-des-maires>
- SPW. (s.d. b). *Outils pour diagnostiquer*. Consulté le 17 juillet 2024 sur <https://lamppsw.wallonie.be/dgo4/conventiondesmaires/outils-diagnostiquer>
- Sytra. (2022). *Approche Charleroi*. Consulté le 8 août 2024 sur <https://sytra.be/fr/publication/appro-charleroi/>
- The Shift Project. (2022). *Crises climatiques : Comment transformer nos territoires?* Synthèse. https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2022/10/The-Shift-Project_Crises-climat-comment-transformer-nos-territoires_Synthese_Octobre-2022.pdf
- ULiège. (s.d.). *Climatologie et Topoclimatologie*. Consulté sur https://www.spheres.uliege.be/cms/c_5607334/fr/climatologie-et-topoclimatologie?id=c_5607334
- Wagner, T. (2022). *Mourir de chaud : à quel degré la température devient-elle mortelle?* Consulté sur <https://bonpote.com/mourir-de-chaud-a-quel-degre-la-temperature-devient-elle-mortelle/>
- Wagner, T. (2024). *Les modèles climatiques sont-ils fiables ?* Consulté sur <https://bonpote.com/les-modeles-climatiques-sont-ils-fiables/>
- Willems, P. (31 mai 2024). Statistical downscaling of regional Belgian climate model projections to obtain local climate impact indicators [Conférence]. Publication of the Belgian climate projections and climate impact indicators. Uccle. <https://www.climatecentre.be/post/publication-of-the-belgian-climate-projections-and-climate-impact-indicators>
- WRCP. (2024). *WGCM and CMIP – World Climate Research Programme*. Consulté sur <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>
- WWA – World Weather Attribution. (s.d.). *Les événements météorologiques extrêmes et le changement climatique* [PDF]. Consulté sur https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/FR_WWA-Les-evenements-meteorologiques-extremes-et-le-changement-climatique.pdf

8. CATALOGUE DES VARIABLES

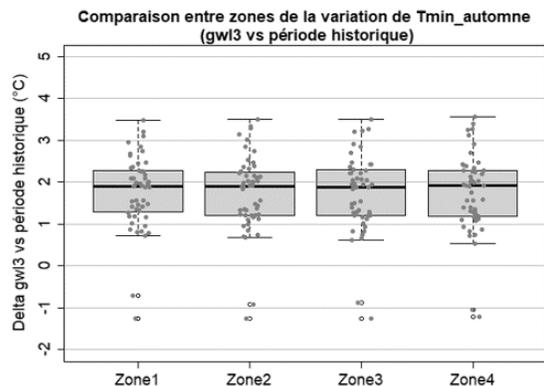
Comment lire les analyses du catalogue de variables ?

Dans ce chapitre dédié aux résultats, une page sera dédiée à l'étude de chaque variable sur des périodes annuelles et/ou saisonnières. Sur chaque page, seront représentés :

- un **graphique par zone d'étude** (soit 4 graphiques au total), décrivant l'évolution de la variable entre les différents niveaux de réchauffement global (GWL) et la période historique. La variable est donc calculée en termes absolus pour la colonne « histo » et les autres colonnes calculent la variation entre les GWL et la valeur de la période historique (ex : gw12 vs histo). La figure 32 décrit comment interpréter ces graphiques et se base sur la méthodologie développée au chapitre 2 ;



- ensuite, à l'aide du test de Kruskal-Wallis et de sa p-value (section 2.6.4), **une comparaison entre zones est réalisée pour la période gw13 vs histo** (à gauche sur la figure 33), +3°C à l'échelle globale étant le réchauffement global utilisé comme le plus probable aujourd'hui (voir section 2.3). Cette comparaison est destinée à identifier des variations significativement différentes entre zones. L'espace restant est réservé à l'interprétation qualitative des résultats.



Interprétations des résultats

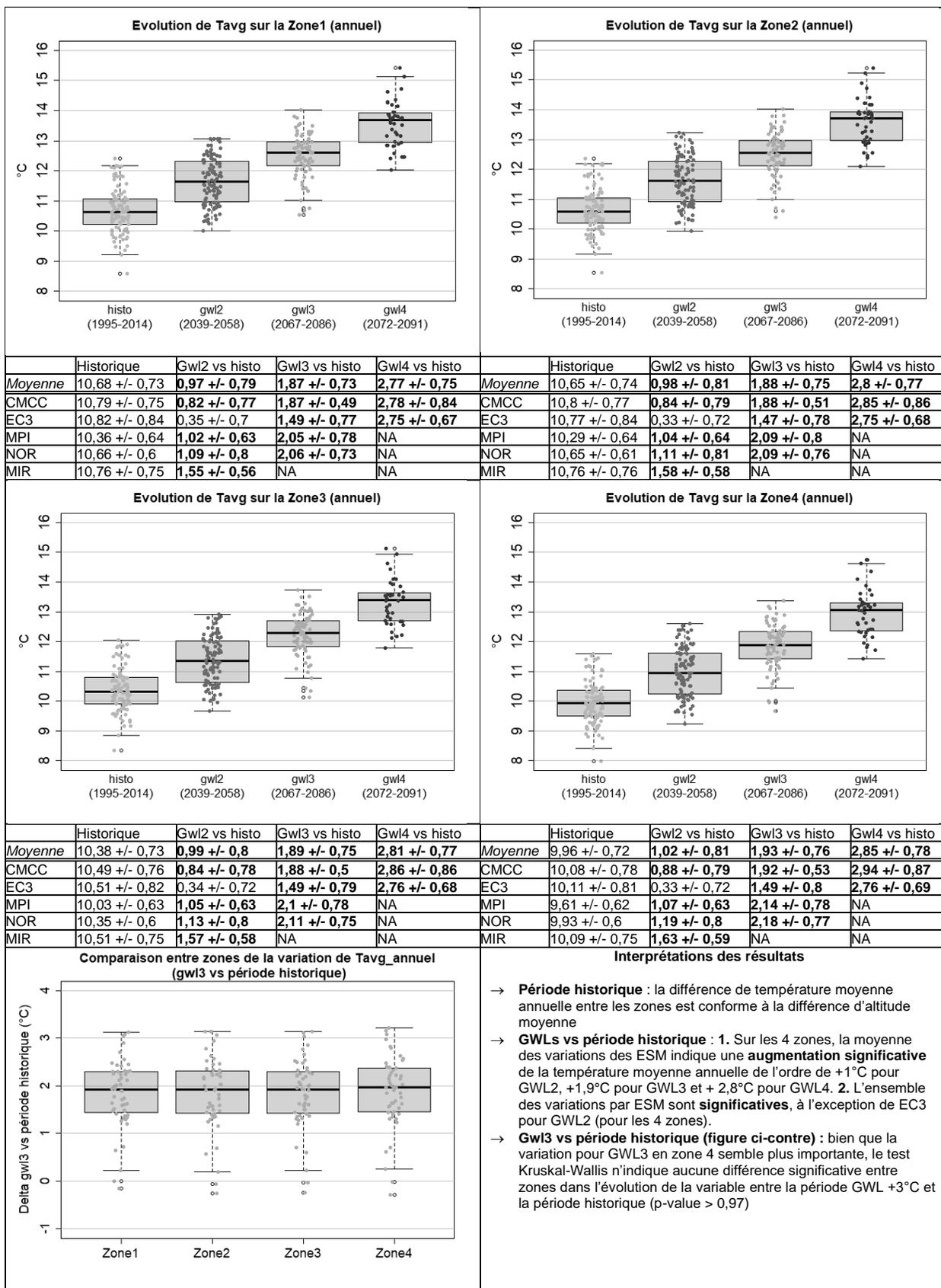
- **Période historique** : la différence de température minimale moyenne en automne entre les zones est conforme à la différence d'altitude moyenne
- **GWLs vs période historique** : 1. Sur les 4 zones, la moyenne des variations des ESM est de l'ordre de +0,95°C pour GWL2, +1,85°C pour GWL3 et + 2,75°C pour GWL4. 2. Les moyennes et l'ensemble des variations par ESM sont significatives, à l'exception de EC3 pour GWL2 (pour les 4 zones)
- **Gw13 vs période historique (figure ci-contre)** : bien que la variation pour GWL3 semble plus importante pour certaines zones, le test Kruskal-Wallis n'indique aucune différence significative entre zones dans l'évolution de la variable entre la période GWL +3°C et la période historique (p-value > 0,9)

Table des matières

Analyse de l'évolution de la température moyenne annuelle	125
Analyse de l'évolution de la température moyenne en été	126
Analyse de l'évolution de la température moyenne en hiver	127
Analyse de l'évolution de la température moyenne au printemps	128
Analyse de l'évolution de la température moyenne en automne	129
Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne en été	130
Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne en hiver.....	131
Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne au printemps.....	132
Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne en automne	133
Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne en été	134
Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne en hiver.....	135
Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne au printemps.....	136
Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne en automne	137
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours de gel	138
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours d'été	139
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours de vigilance canicule	140
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 5 jours.....	141
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 7 jours.....	142
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 10 jours.....	143
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 15 jours.....	144
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours où l'Humidex ≥ 30	145
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours où l'Humidex ≥ 40	146
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours où le Heat Index ≥ 27	147
Analyse de l'évolution où le Wet Bulb Temperature ≥ 19	148
Analyse de l'évolution du cumul annuel de précipitations	149
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations en été	150
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations en hiver	151
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations au printemps	152
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations en automne	153
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations en été	154
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations en hiver	155
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations au printemps	156

Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations en automne	157
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations en été	158
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations en hiver	159
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations au printemps	160
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations en automne	161
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations en été	162
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations en hiver	163
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations au printemps	164
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations en automne	165
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier en été	166
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier en hiver	167
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier au printemps	168
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier en automne	169
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours en été	170
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours en hiver	171
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours au printemps	172
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours en automne	173
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs en été	174
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs en hiver	175
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs au printemps	176
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs en automne	177

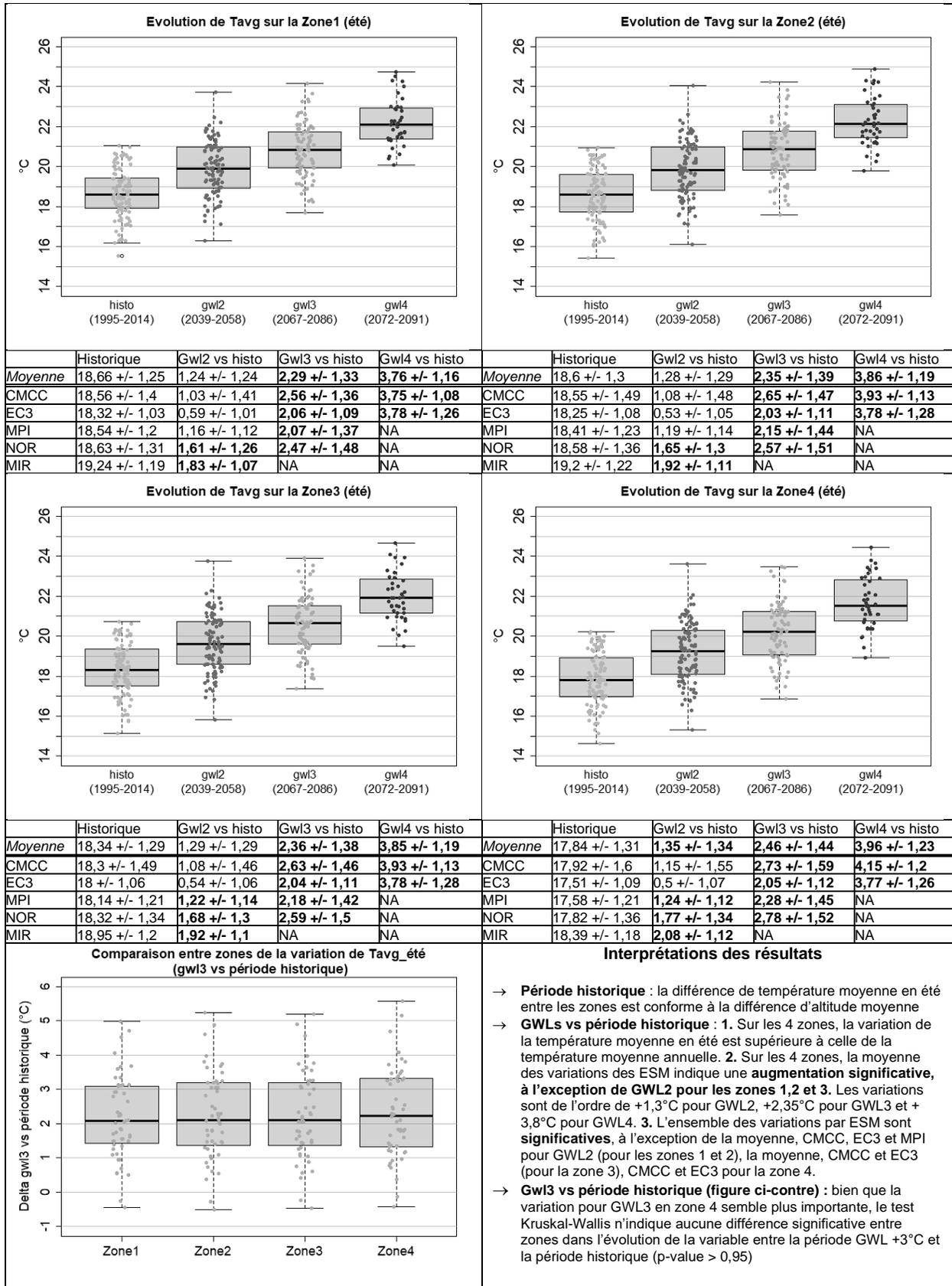
Analyse de l'évolution de la température moyenne annuelle



Légende:

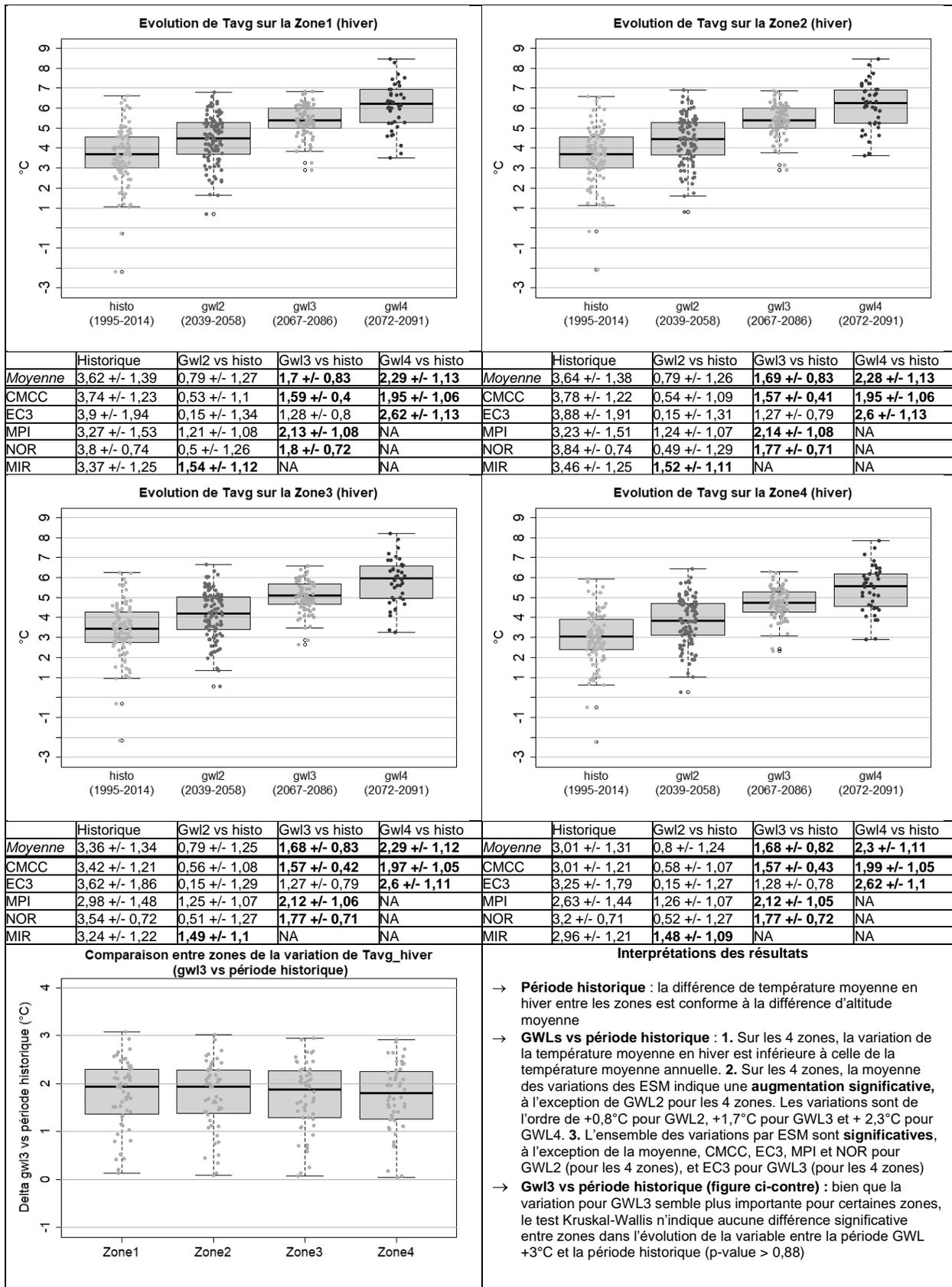
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température moyenne en été



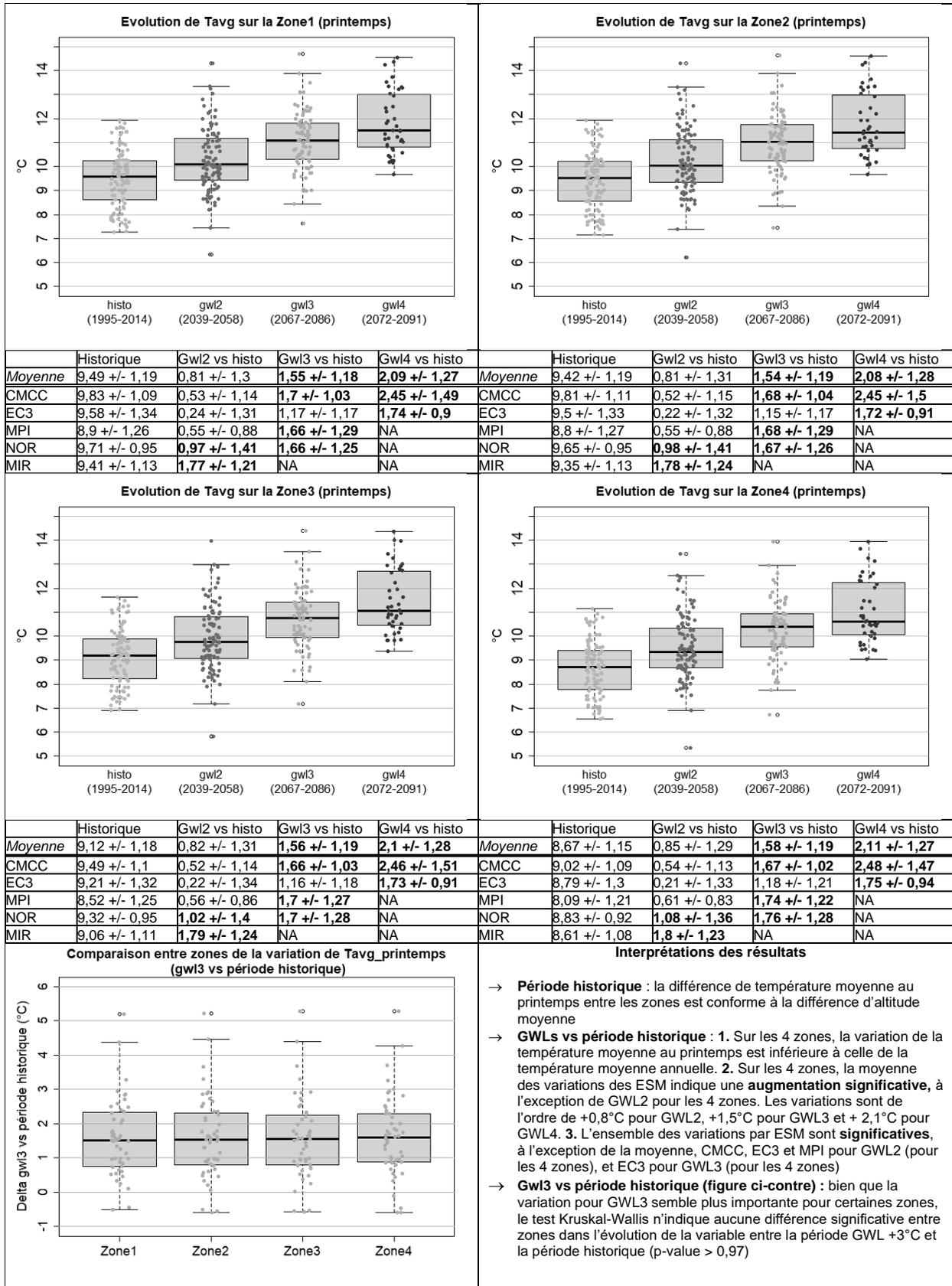
Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température moyenne en hiver



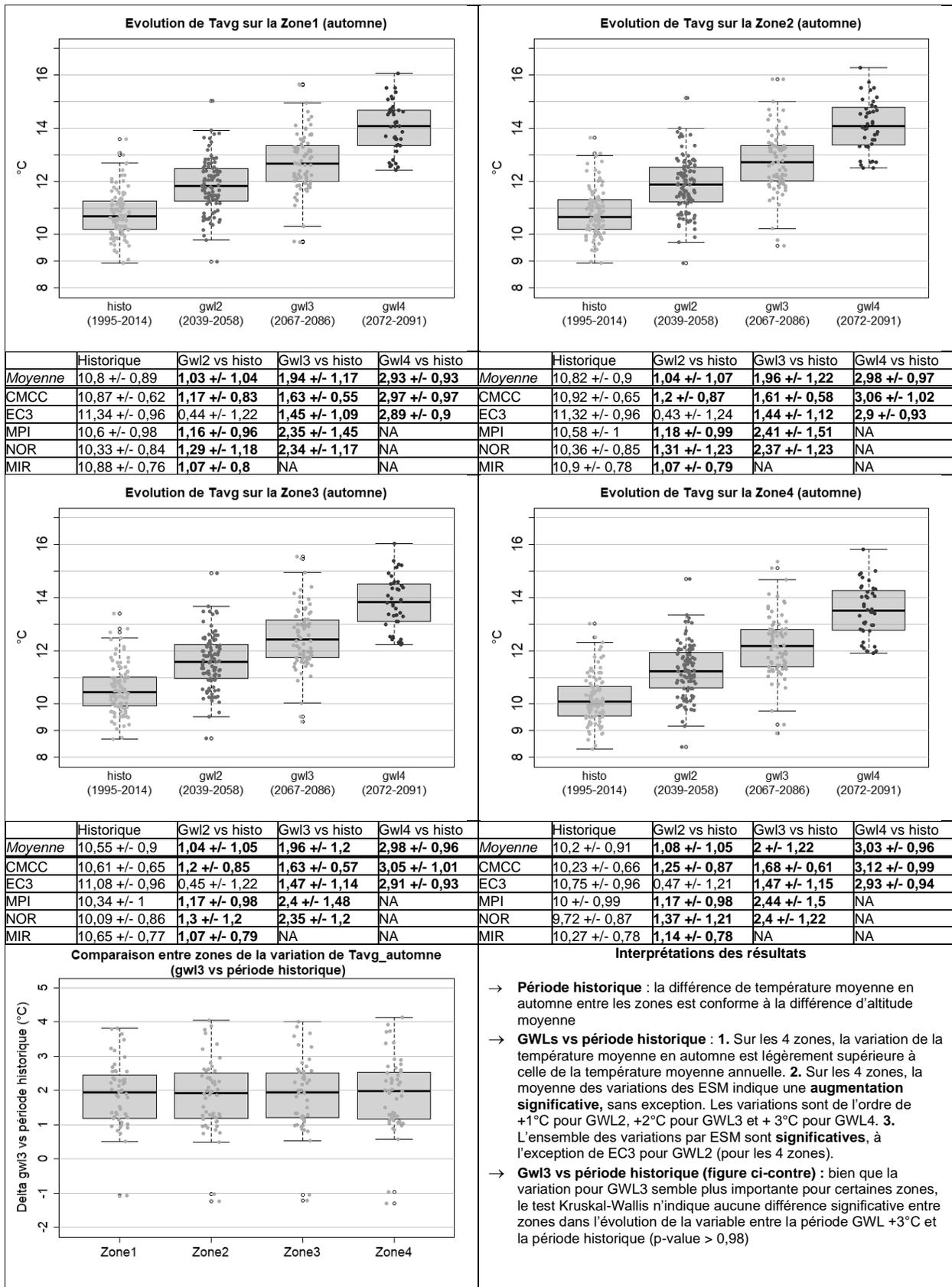
Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température moyenne au printemps



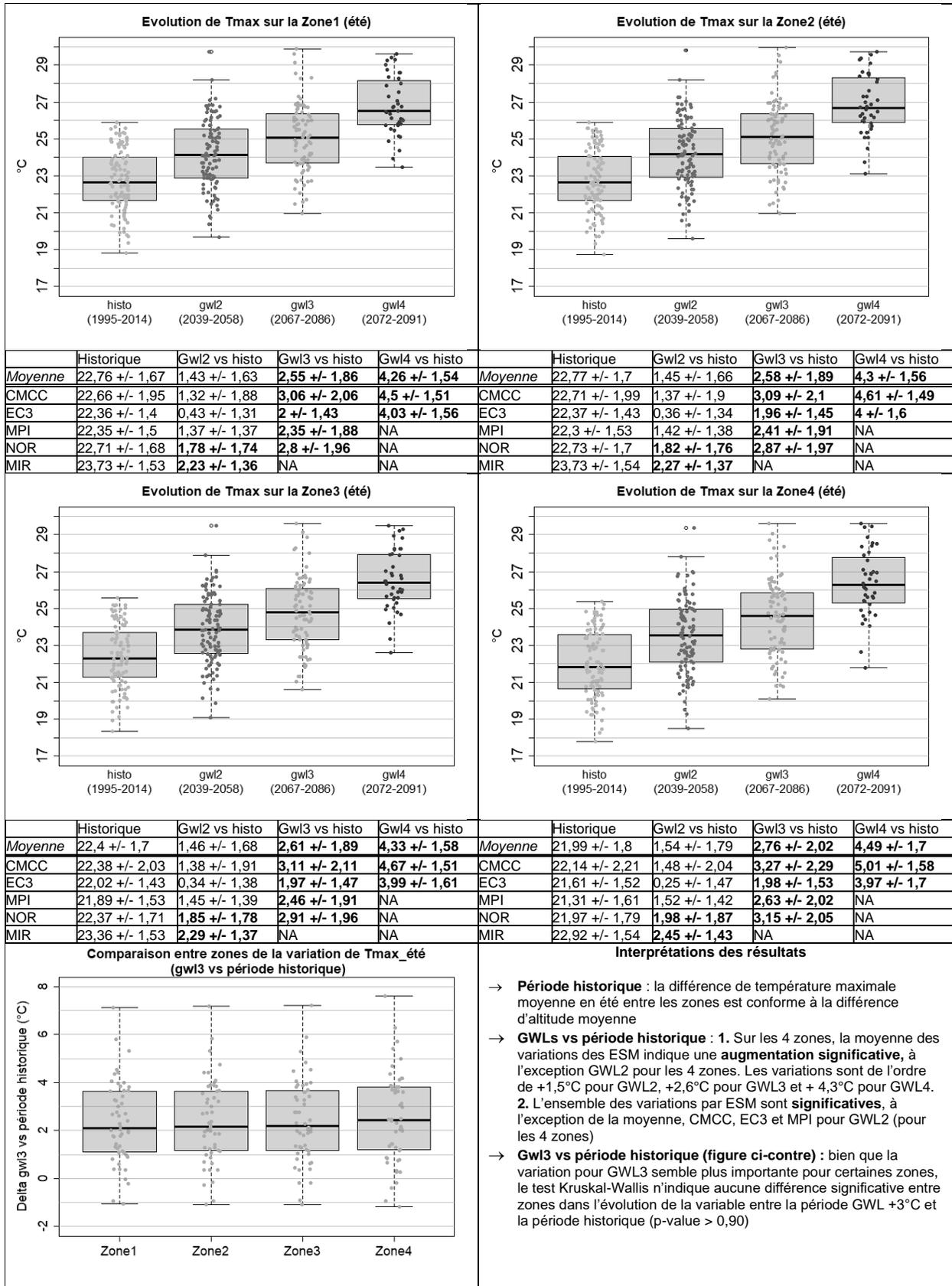
Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température moyenne en automne



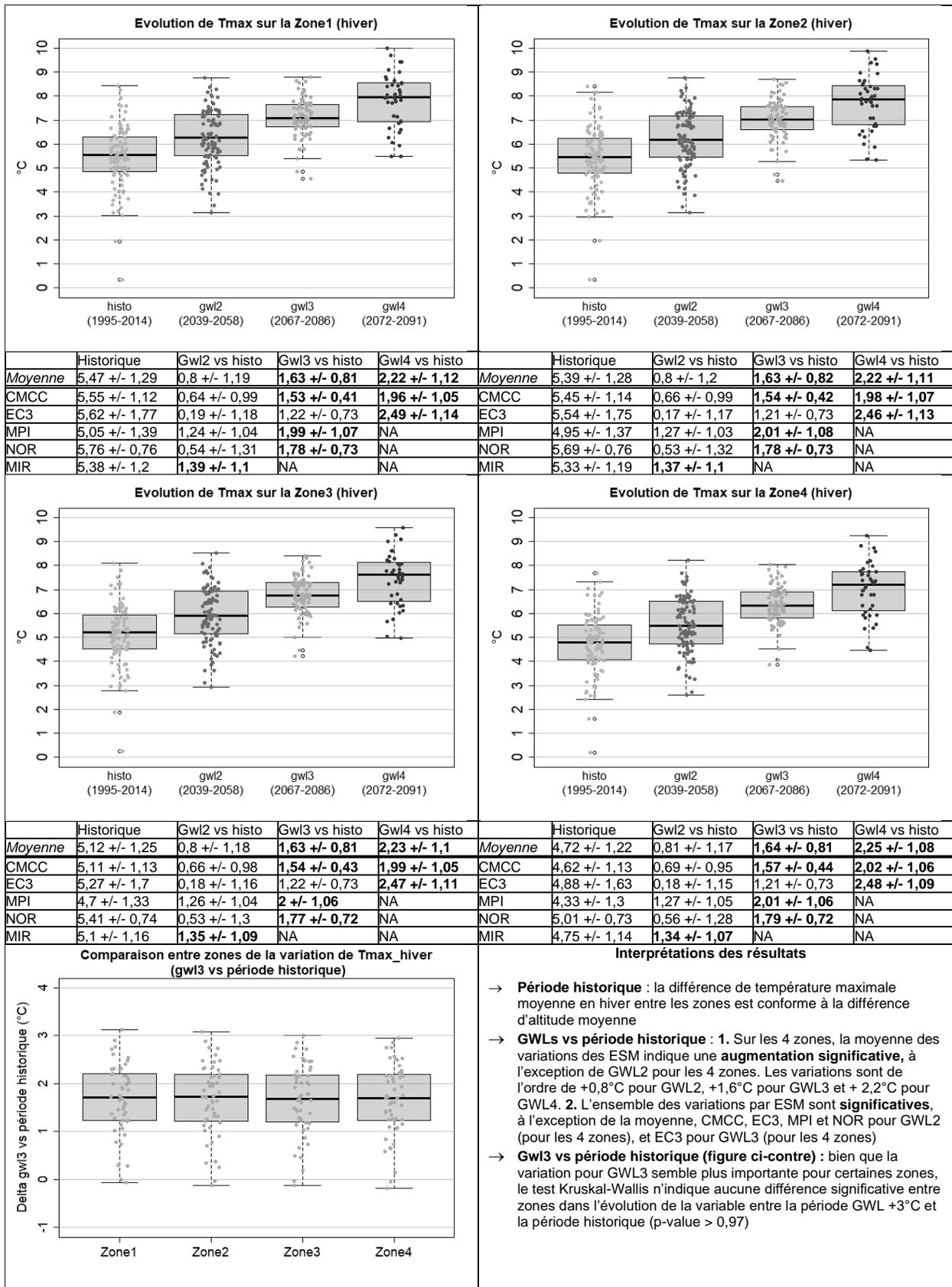
Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne en été



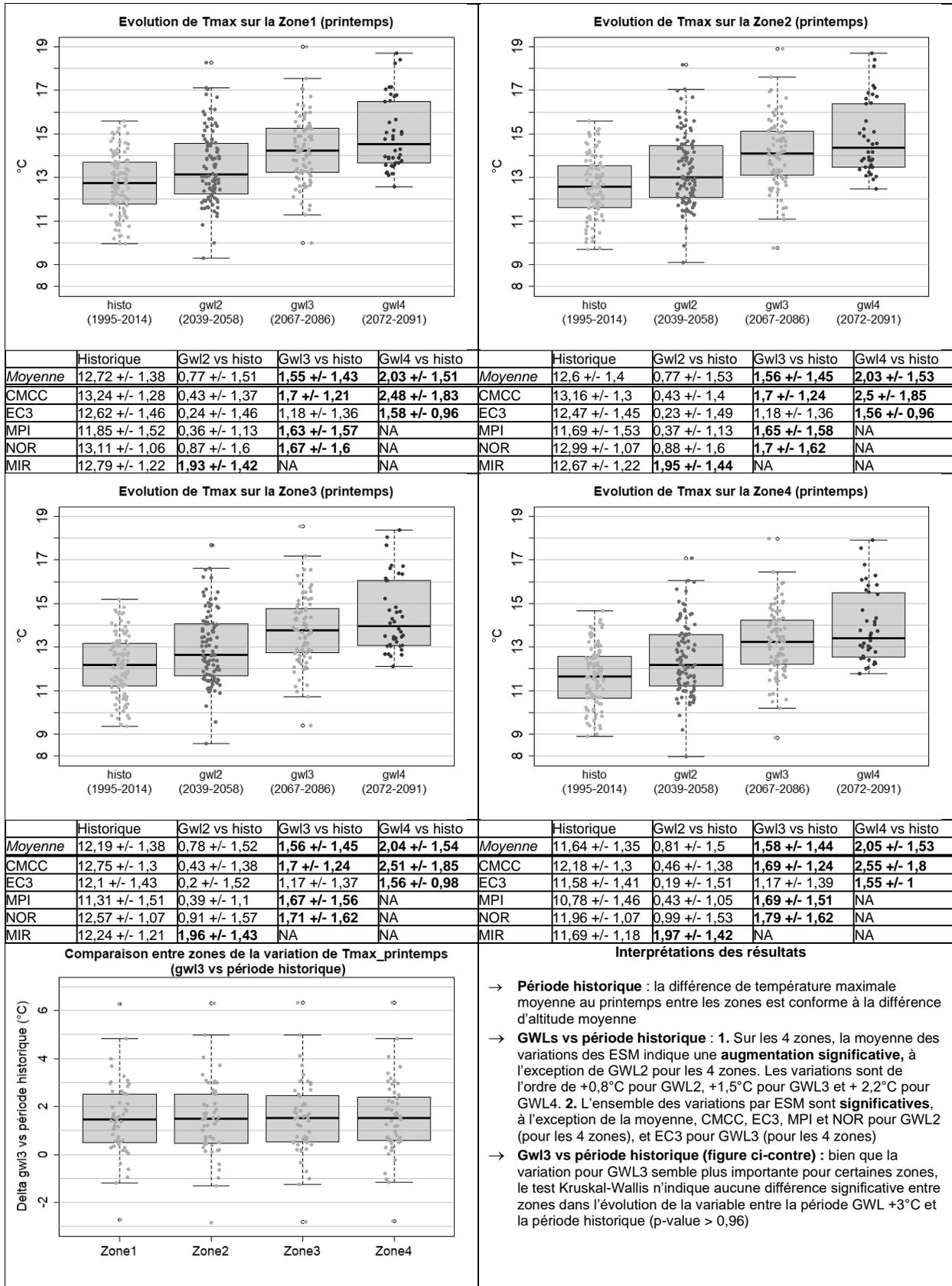
Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne en hiver



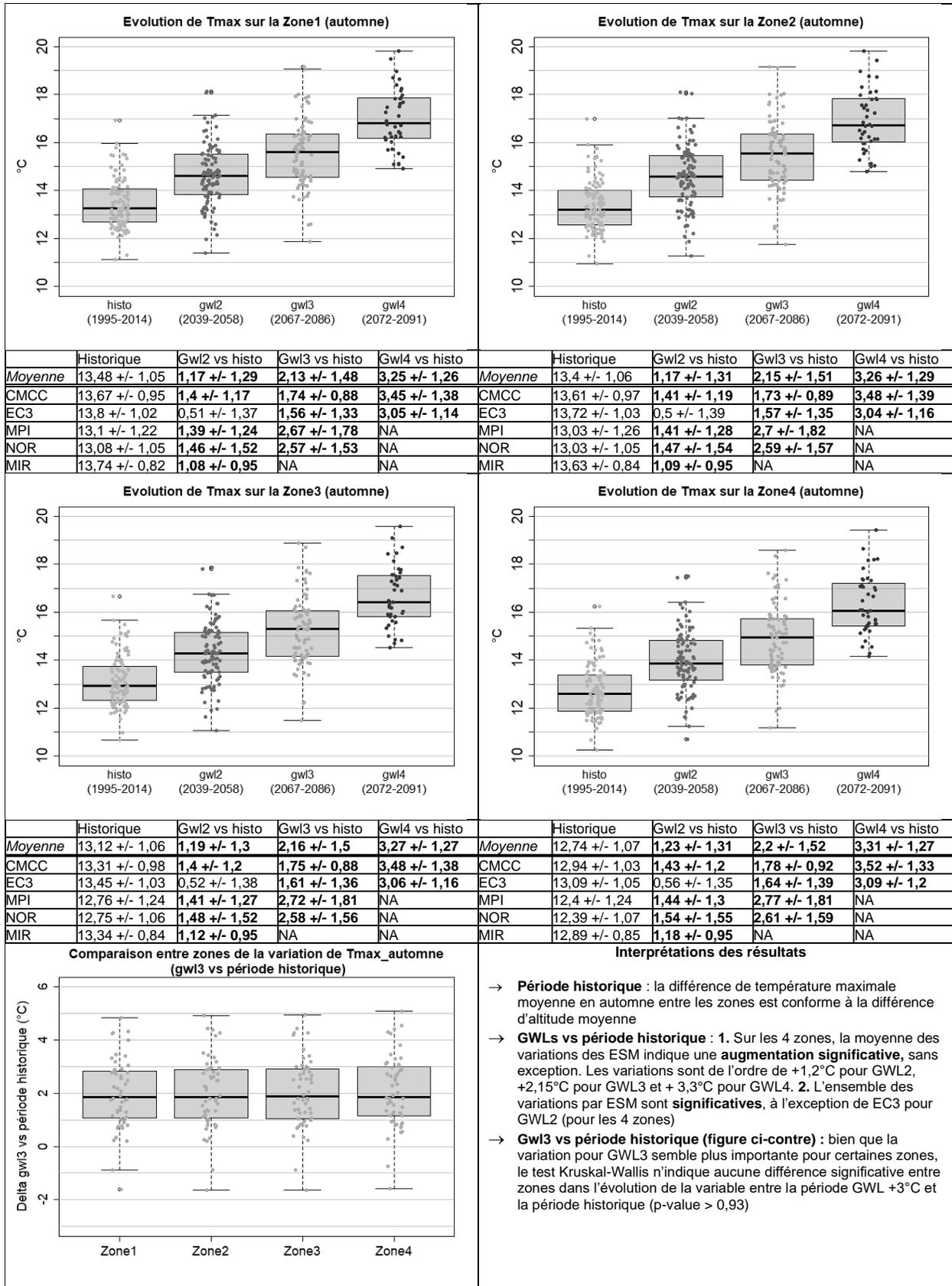
Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne au printemps



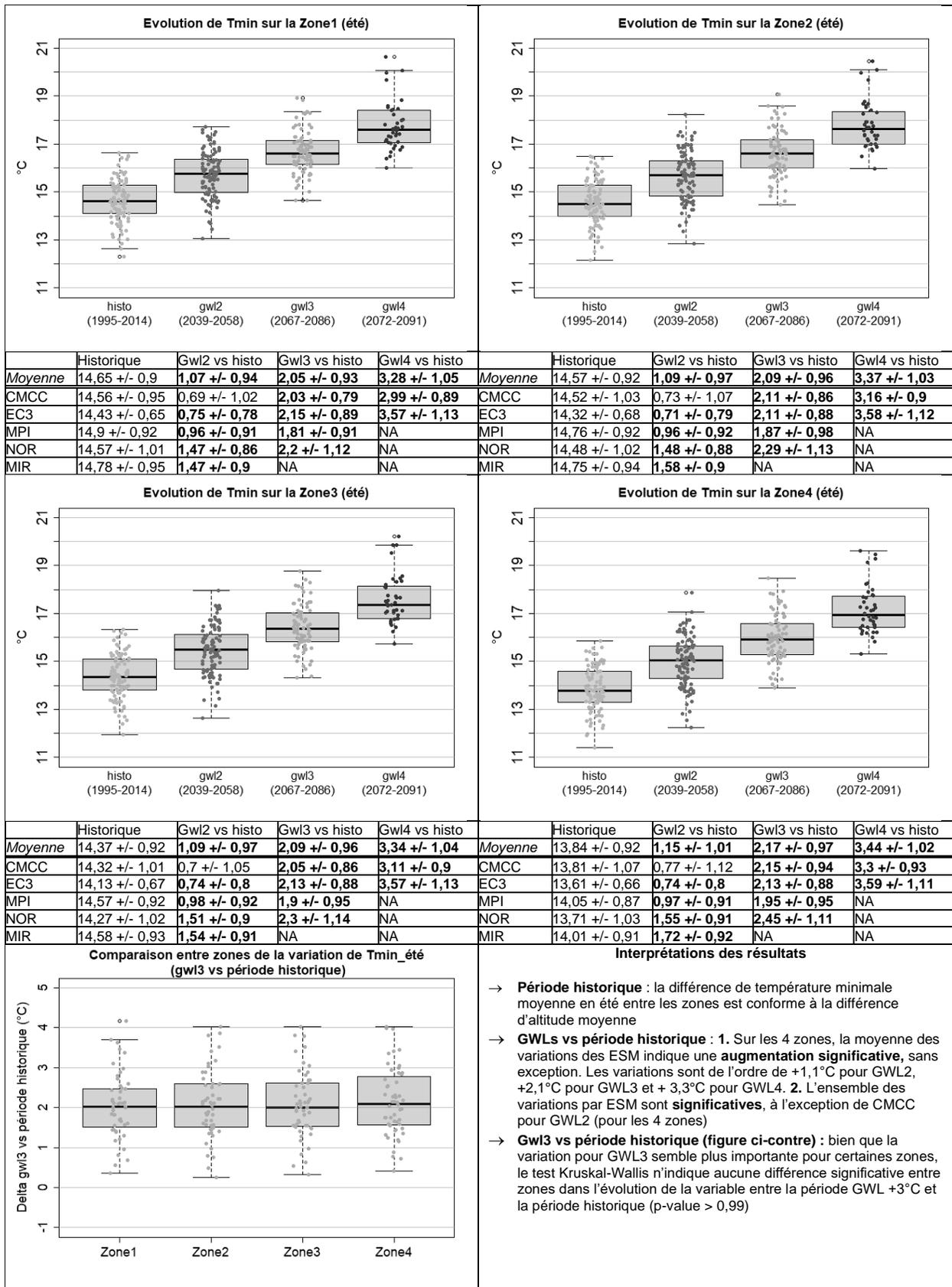
Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température maximale moyenne en automne



Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

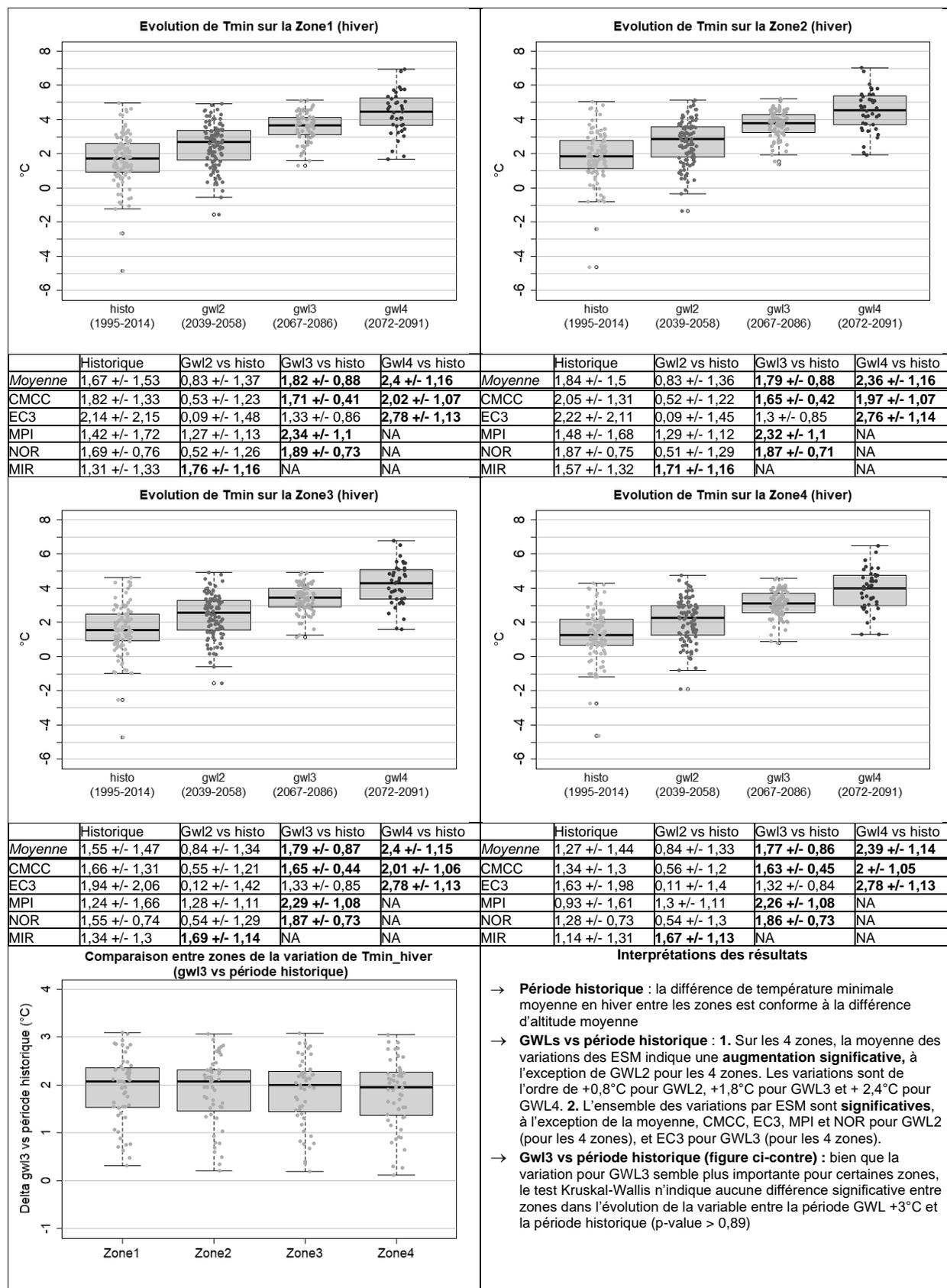
Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne en été



Légende:

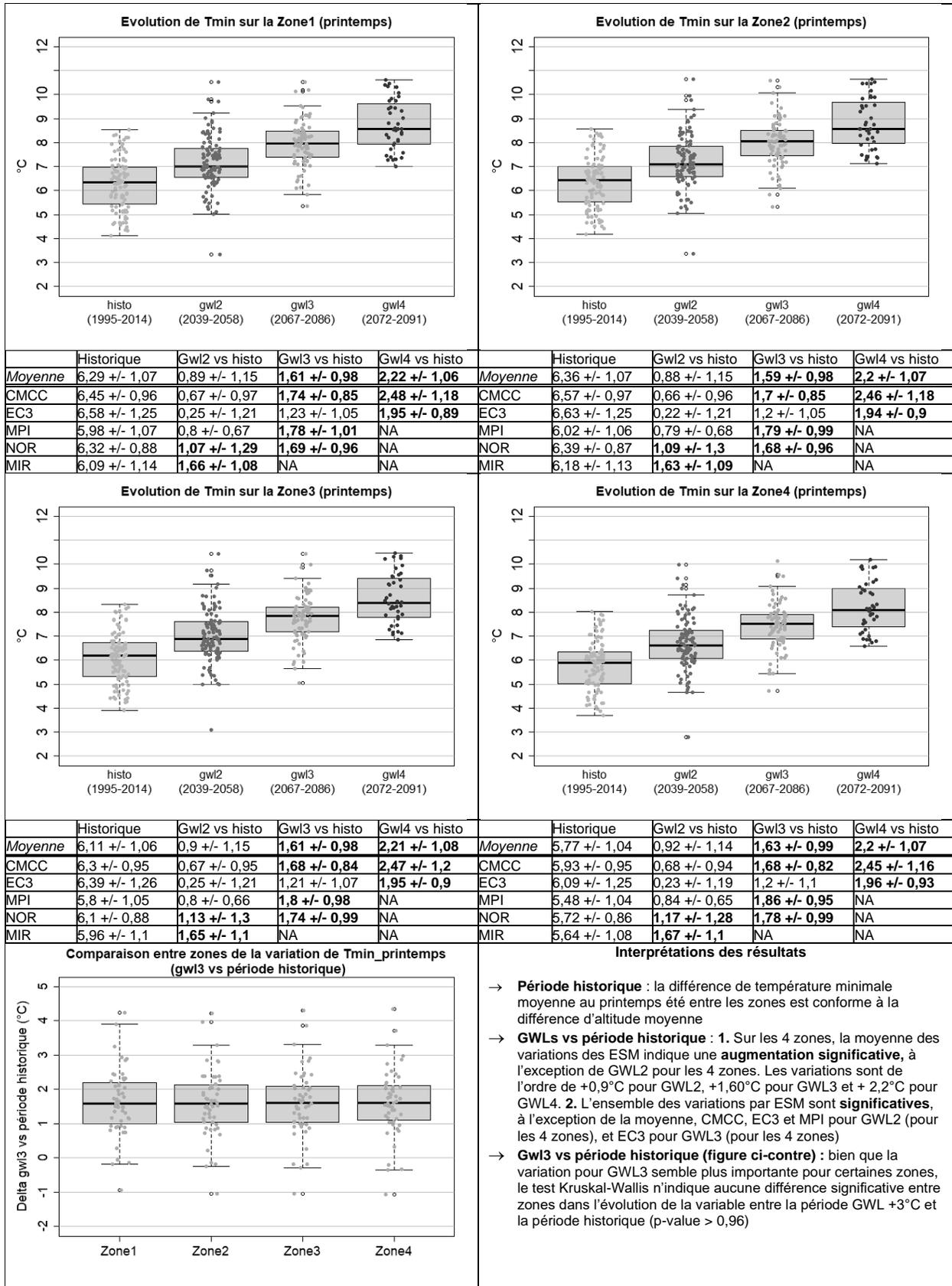
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne en hiver



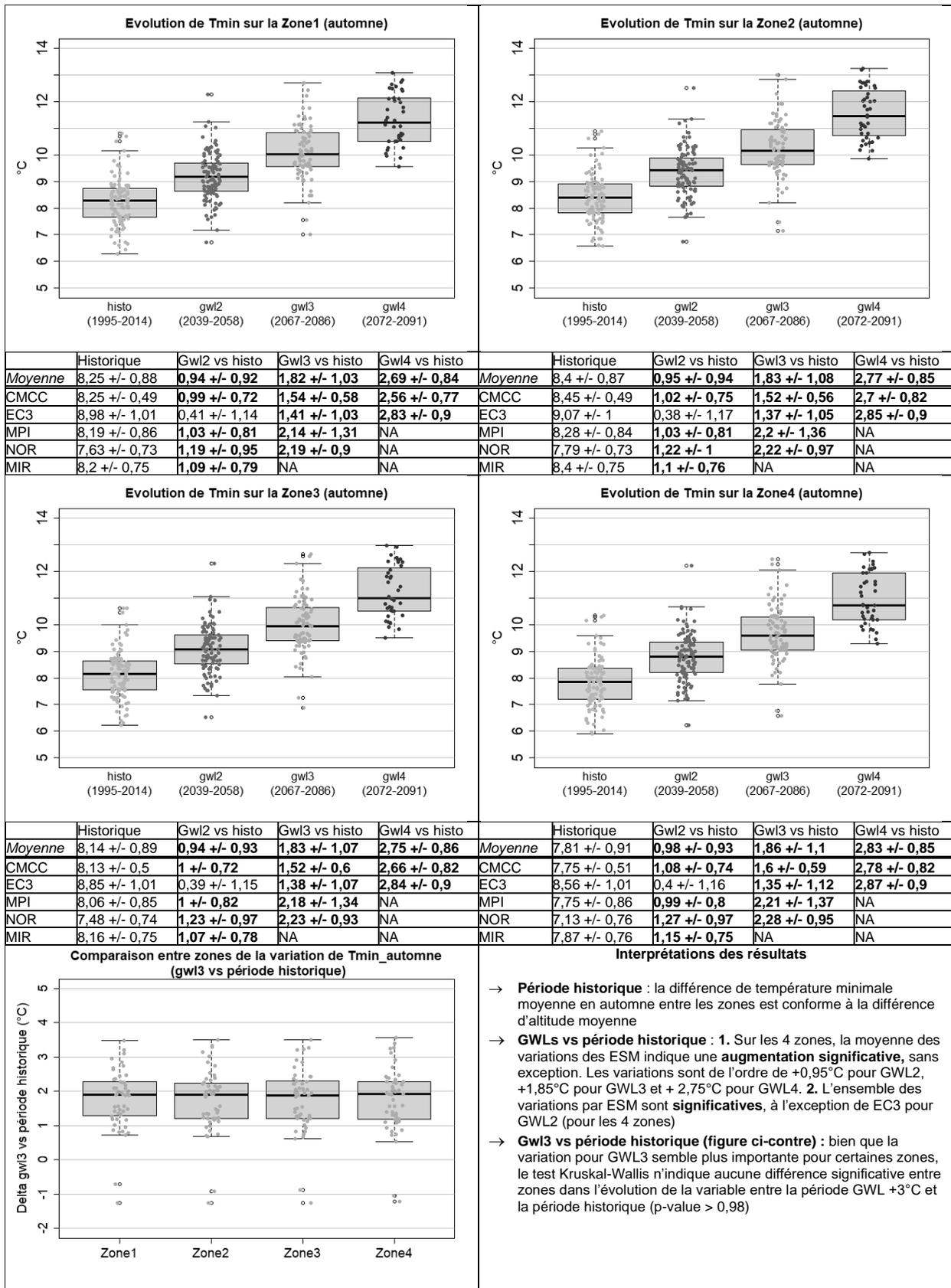
Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne au printemps



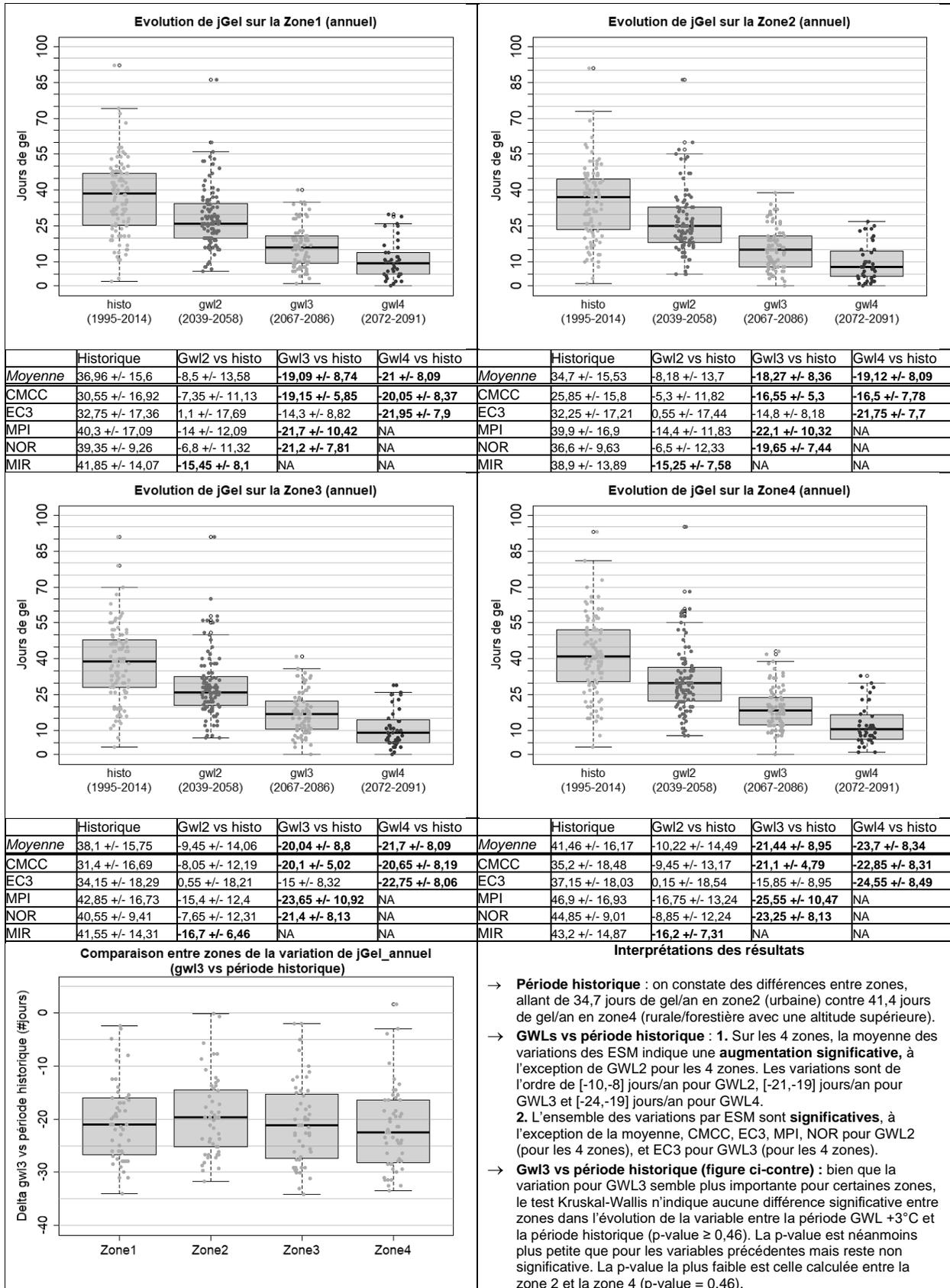
Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution de la température minimale moyenne en automne



Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

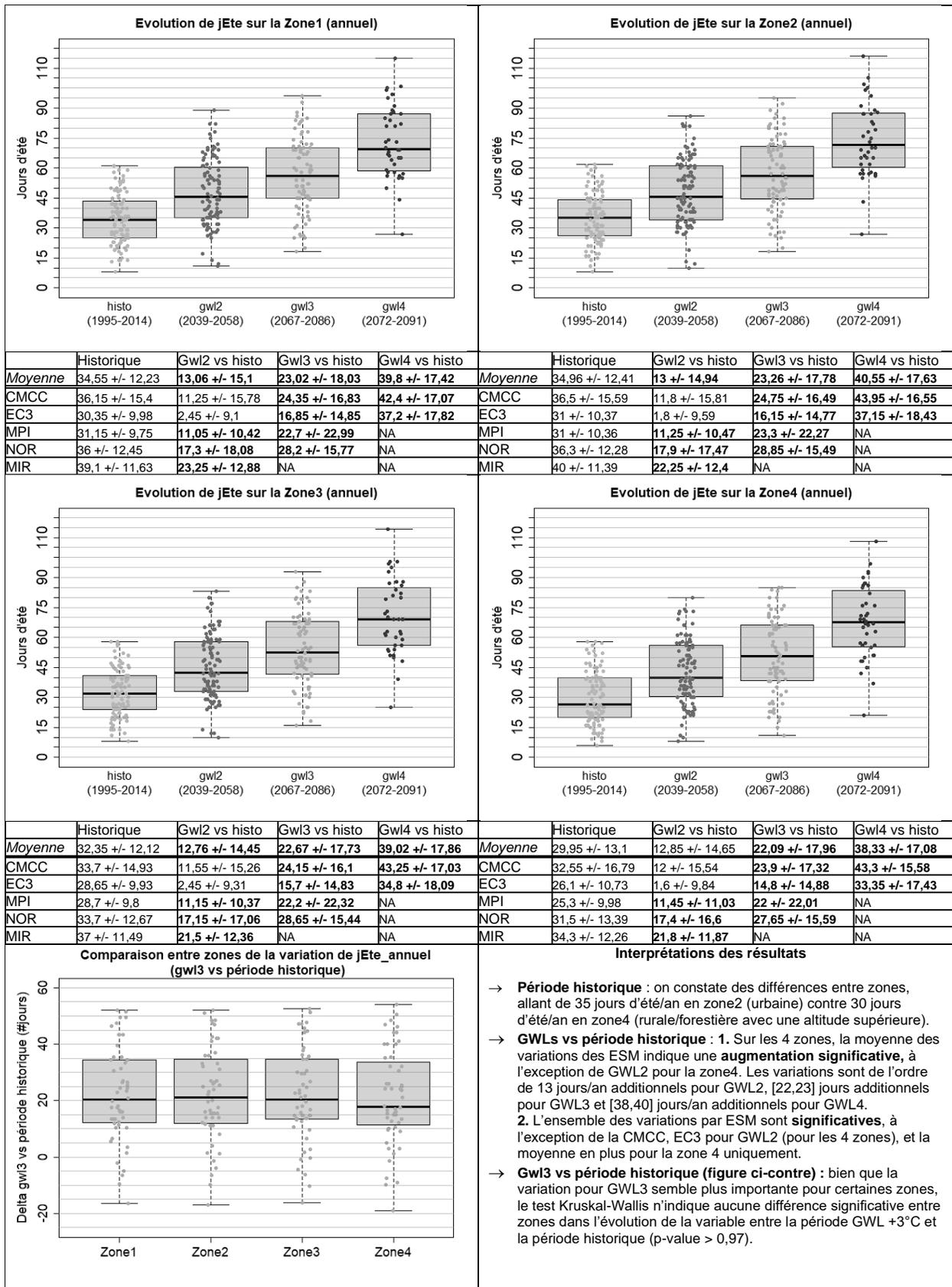
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours de gel



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative

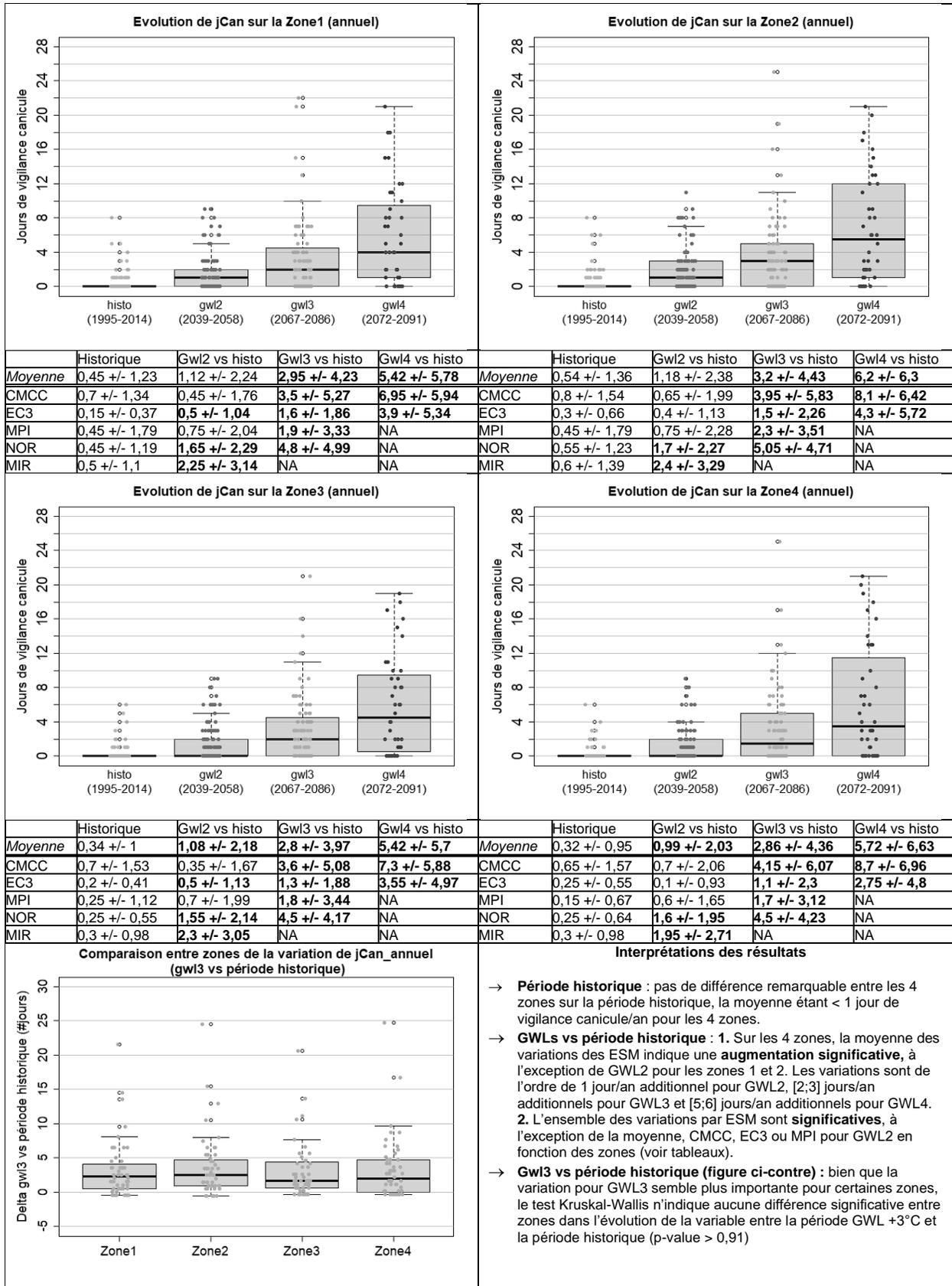
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours d'été



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative

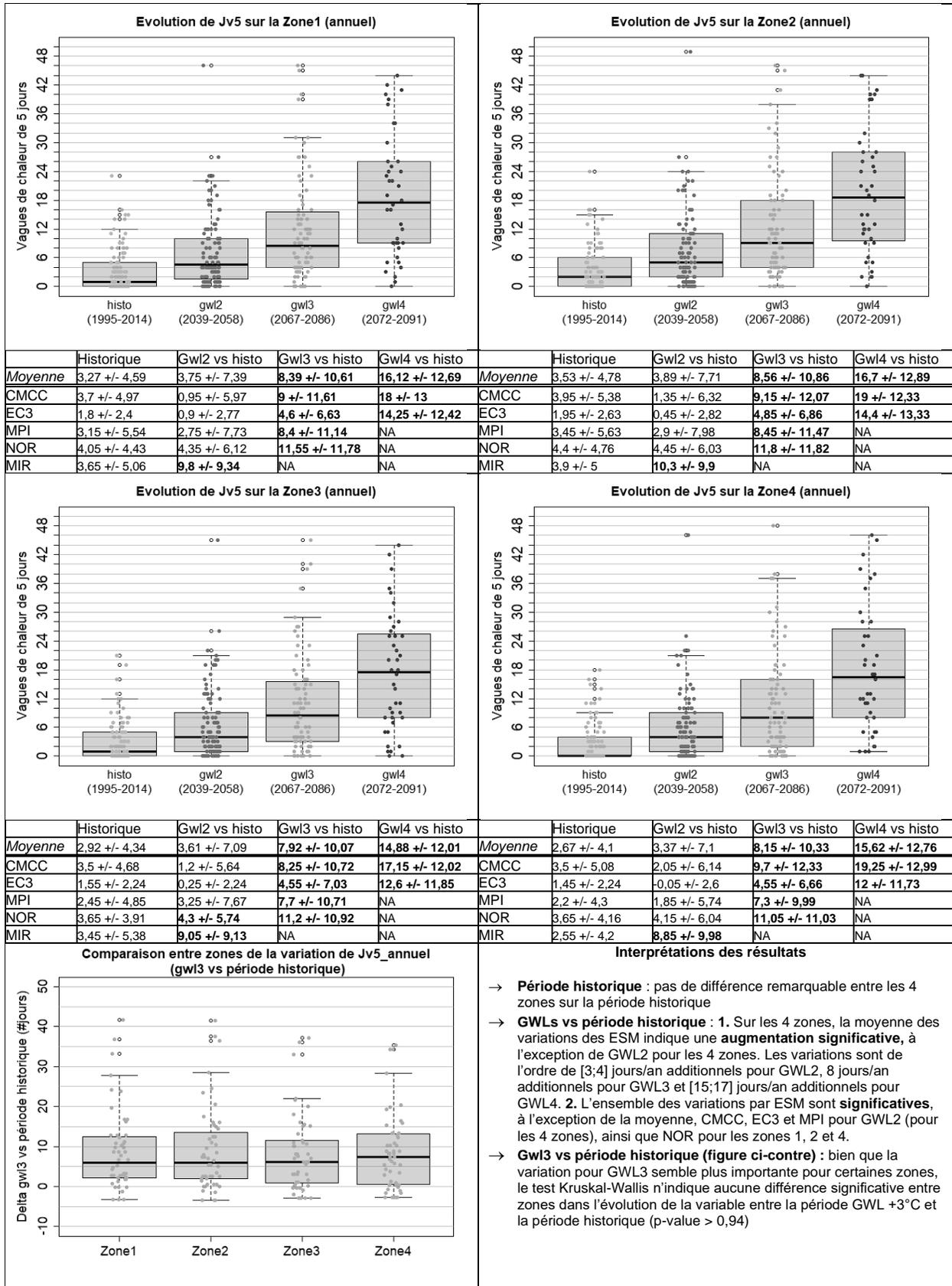
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours de vigilance canicule



Légende:

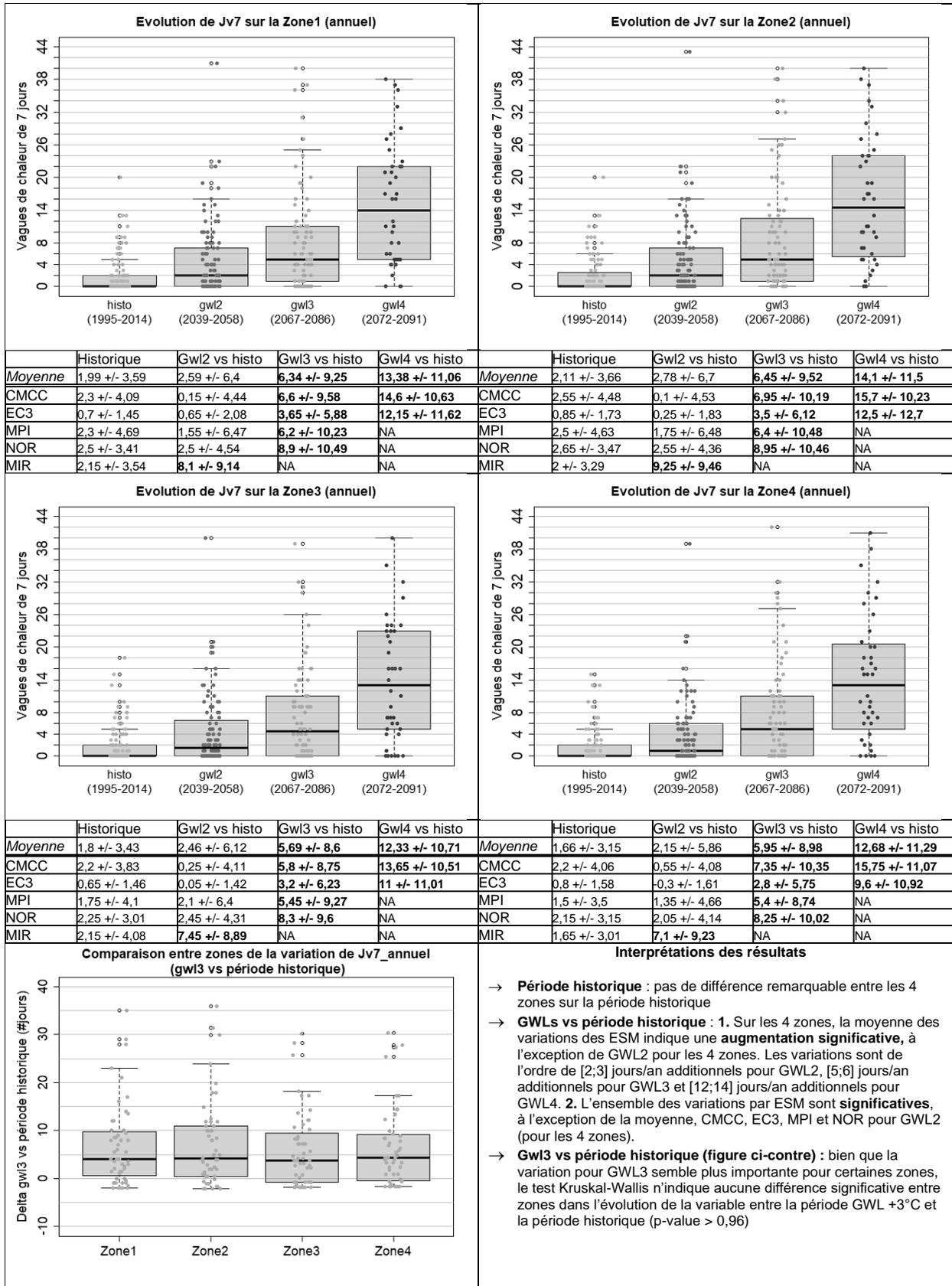
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 5 jours



Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

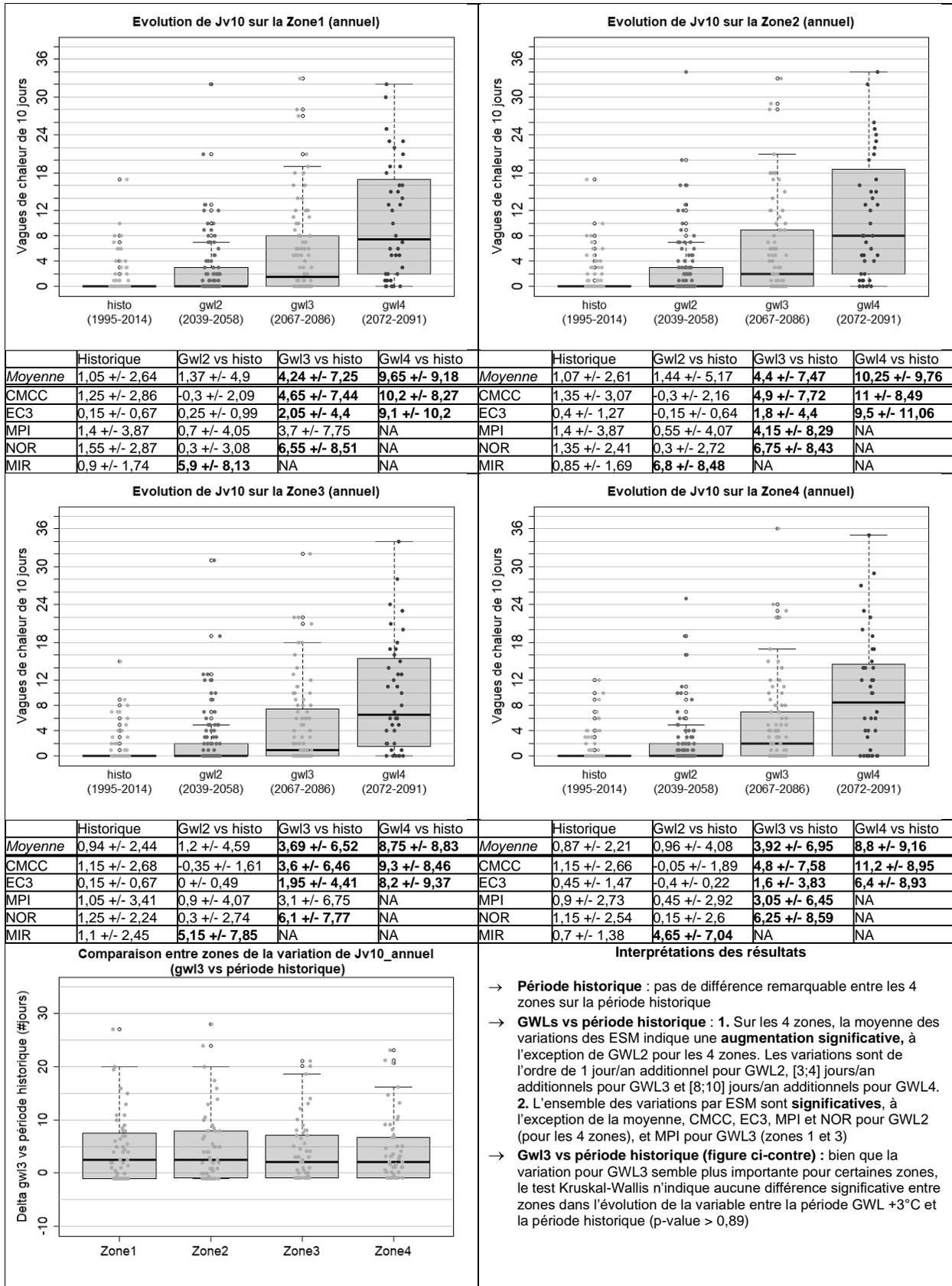
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 7 jours



Légende:

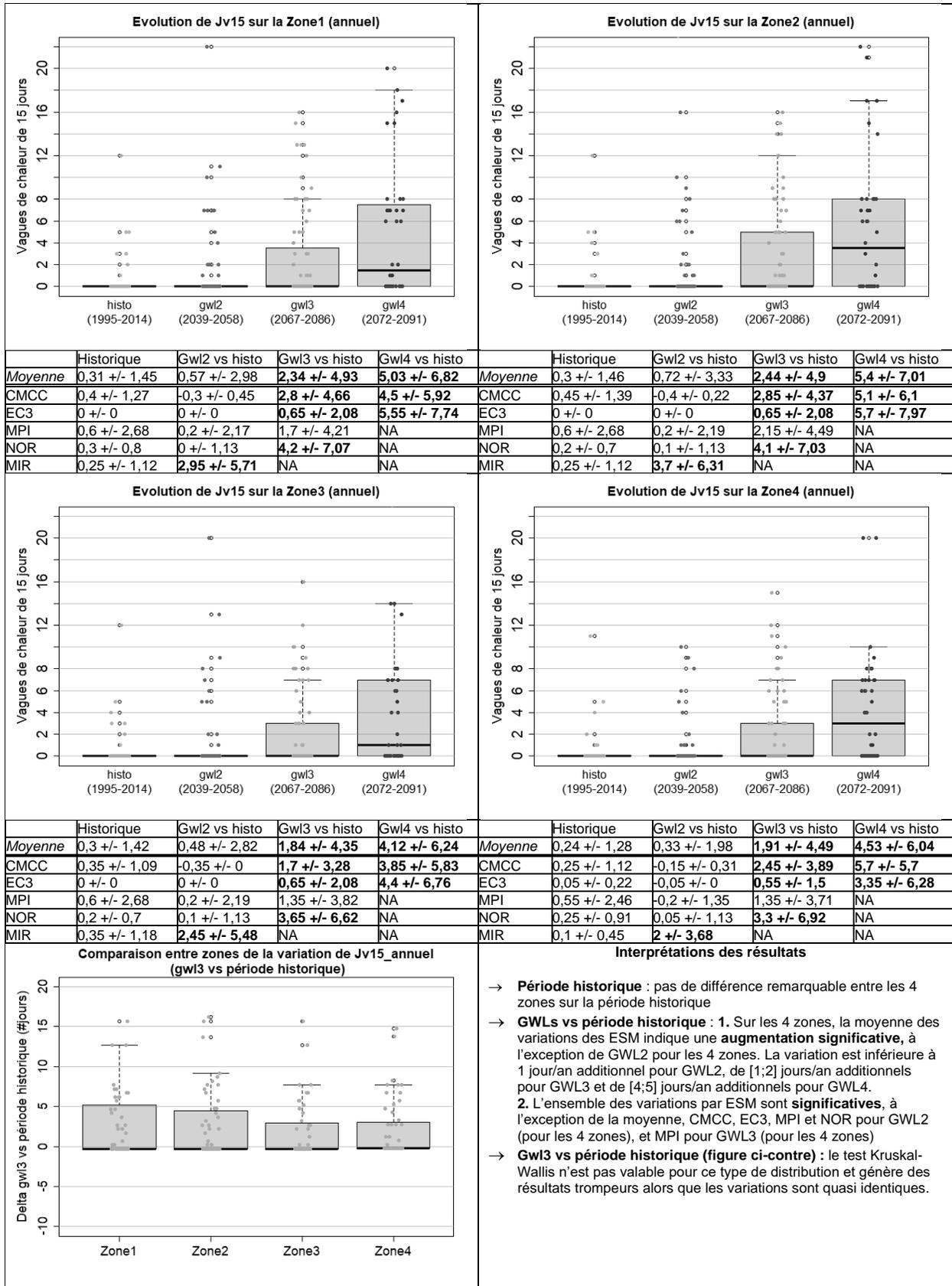
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 10 jours



Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

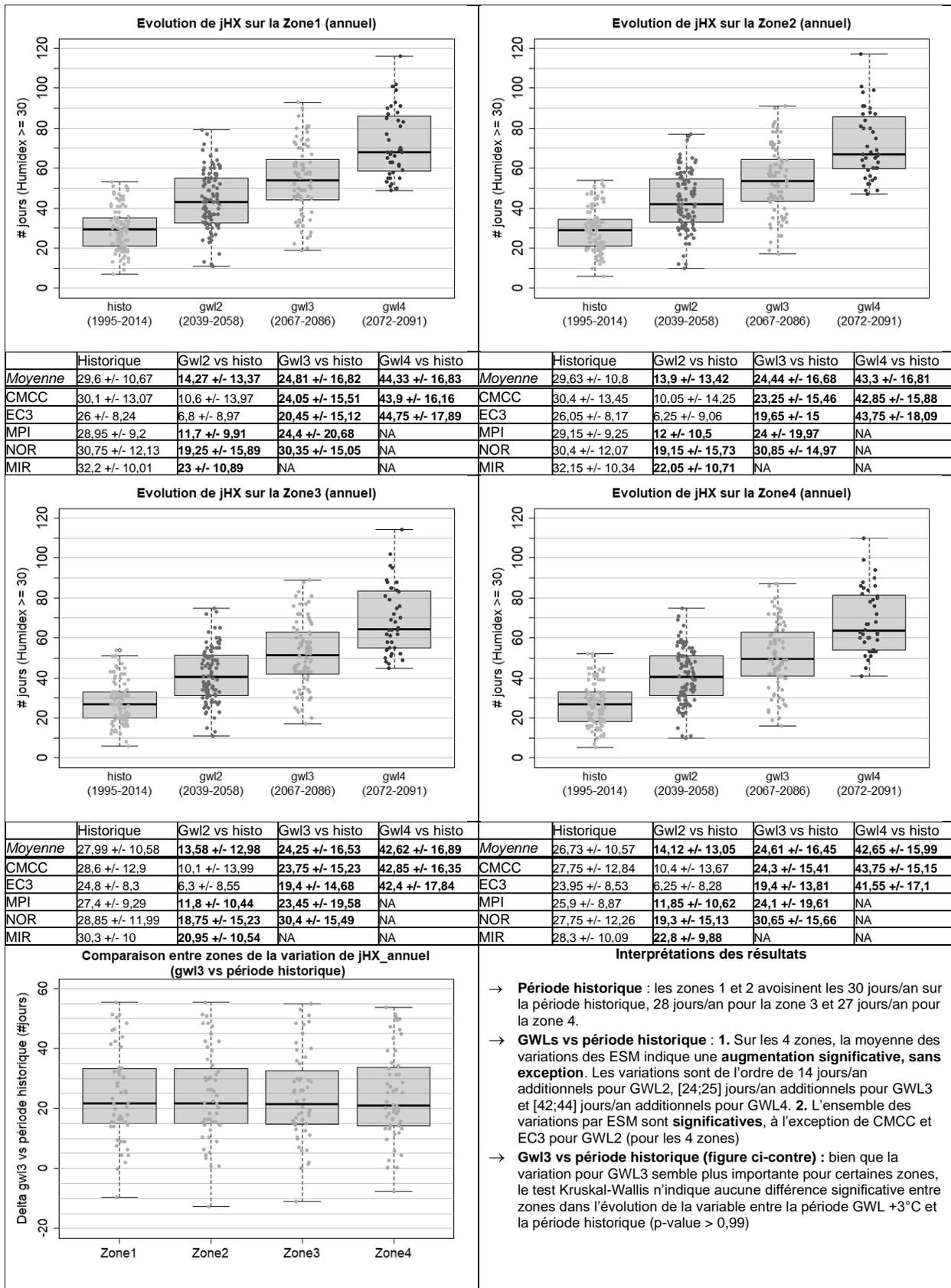
Analyse de l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur de 15 jours



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative

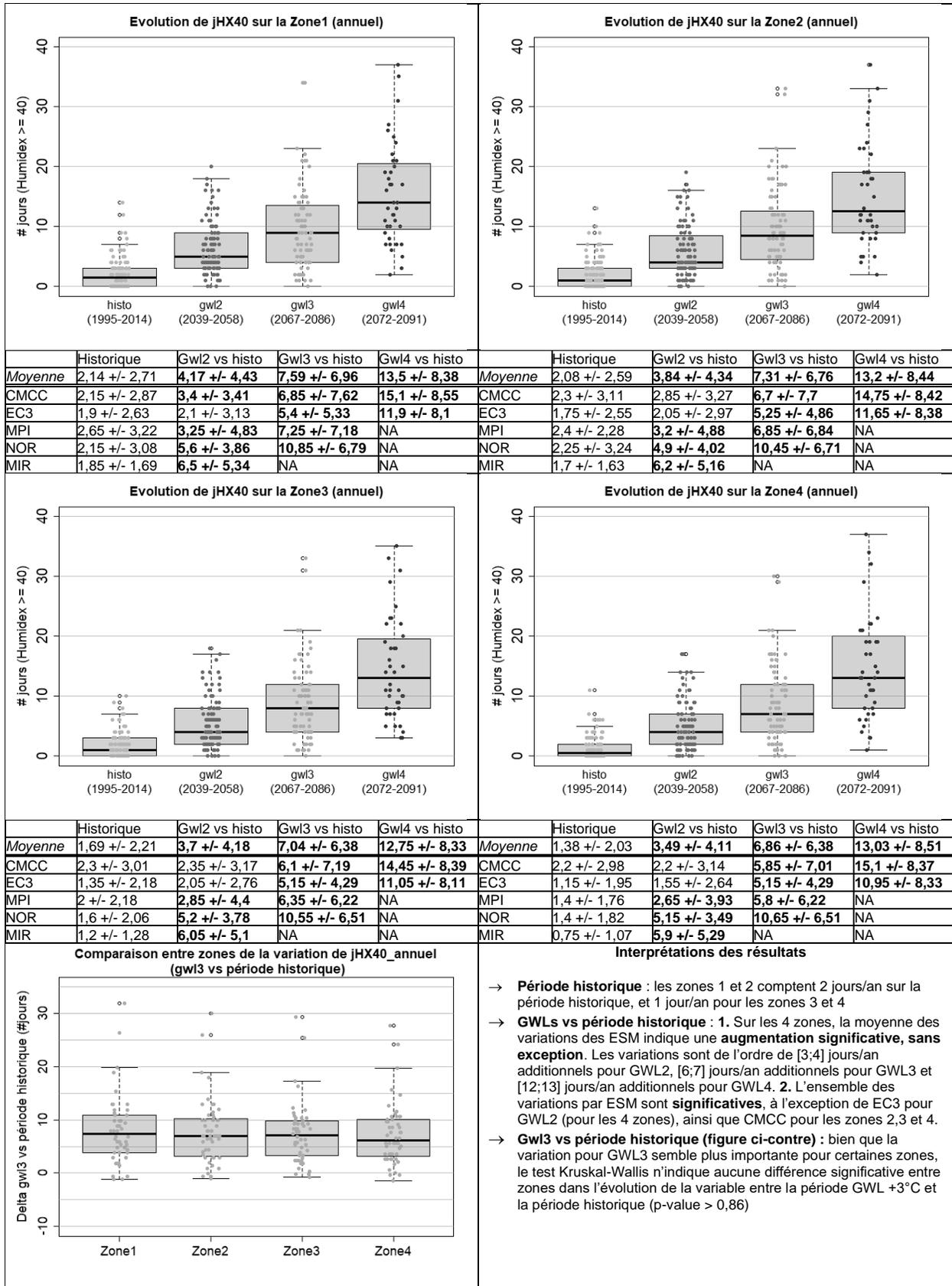
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours où l'Humidex ≥ 30



Légende:

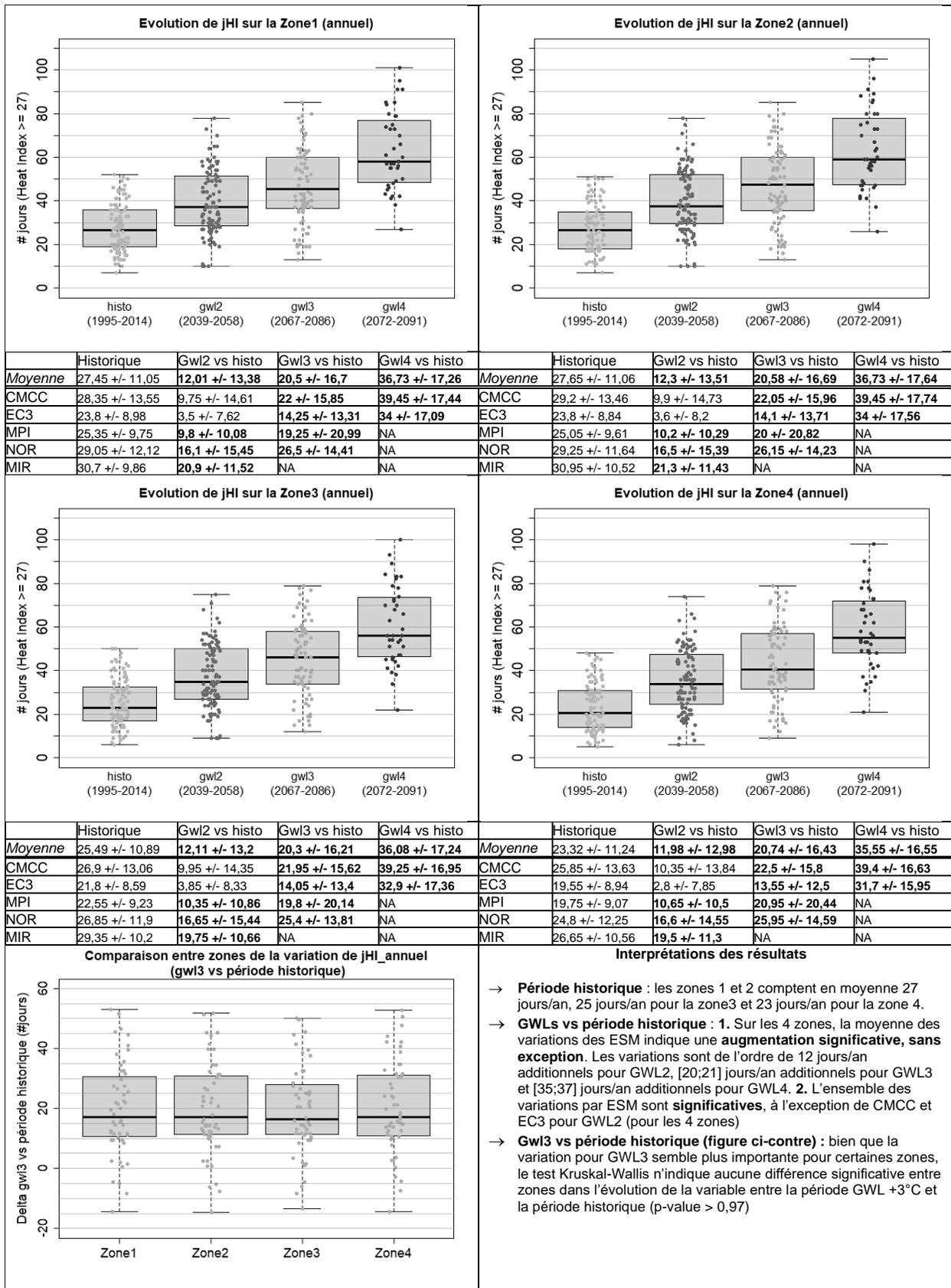
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours où l'Humidex ≥ 40



Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

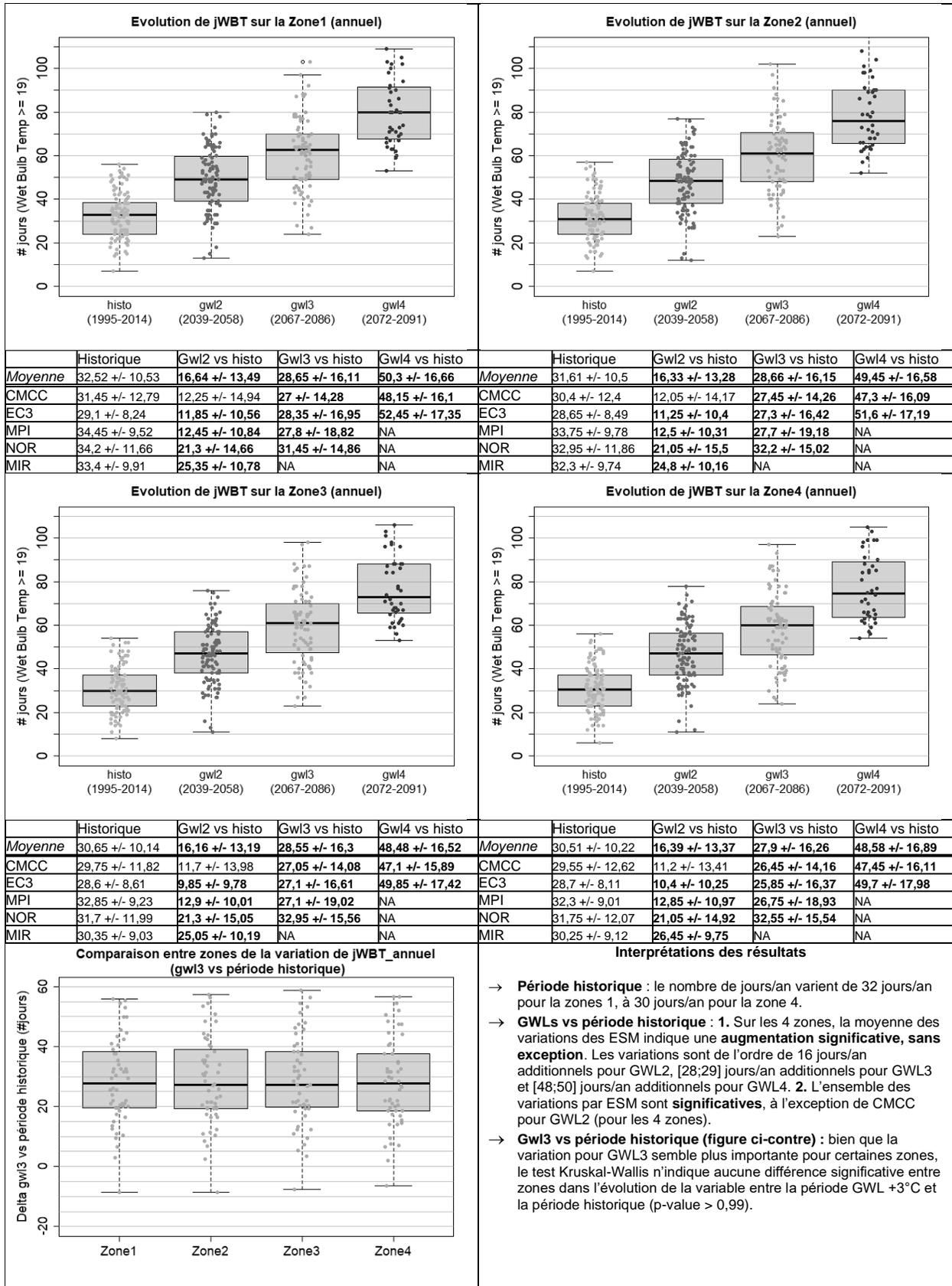
Analyse de l'évolution du nombre annuel de jours où le Heat Index ≥ 27



Légende:

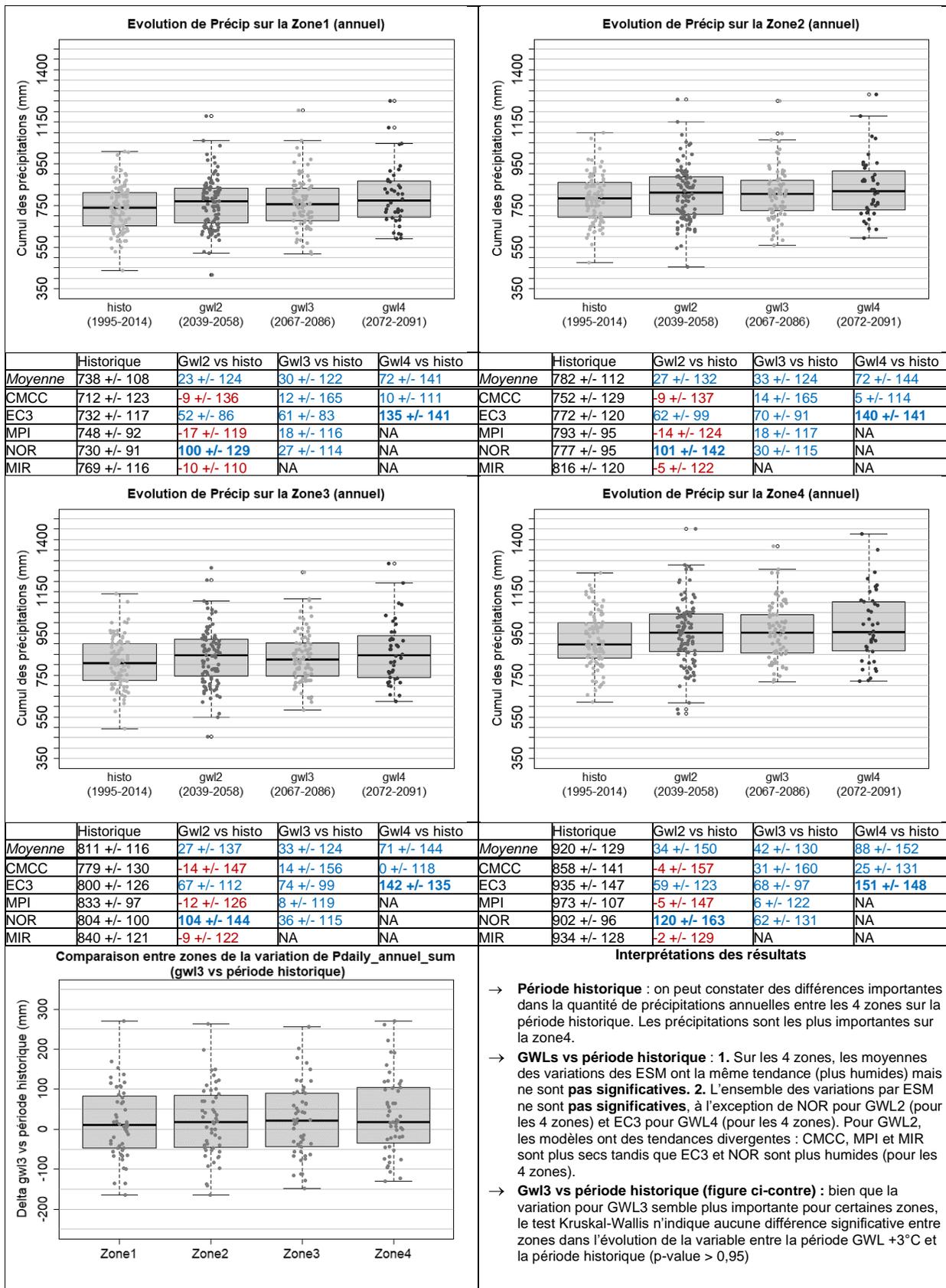
Valeur significative / Valeur non significative

Analyse de l'évolution où le Wet Bulb Temperature ≥ 19



Légende:
Valeur significative / Valeur non significative

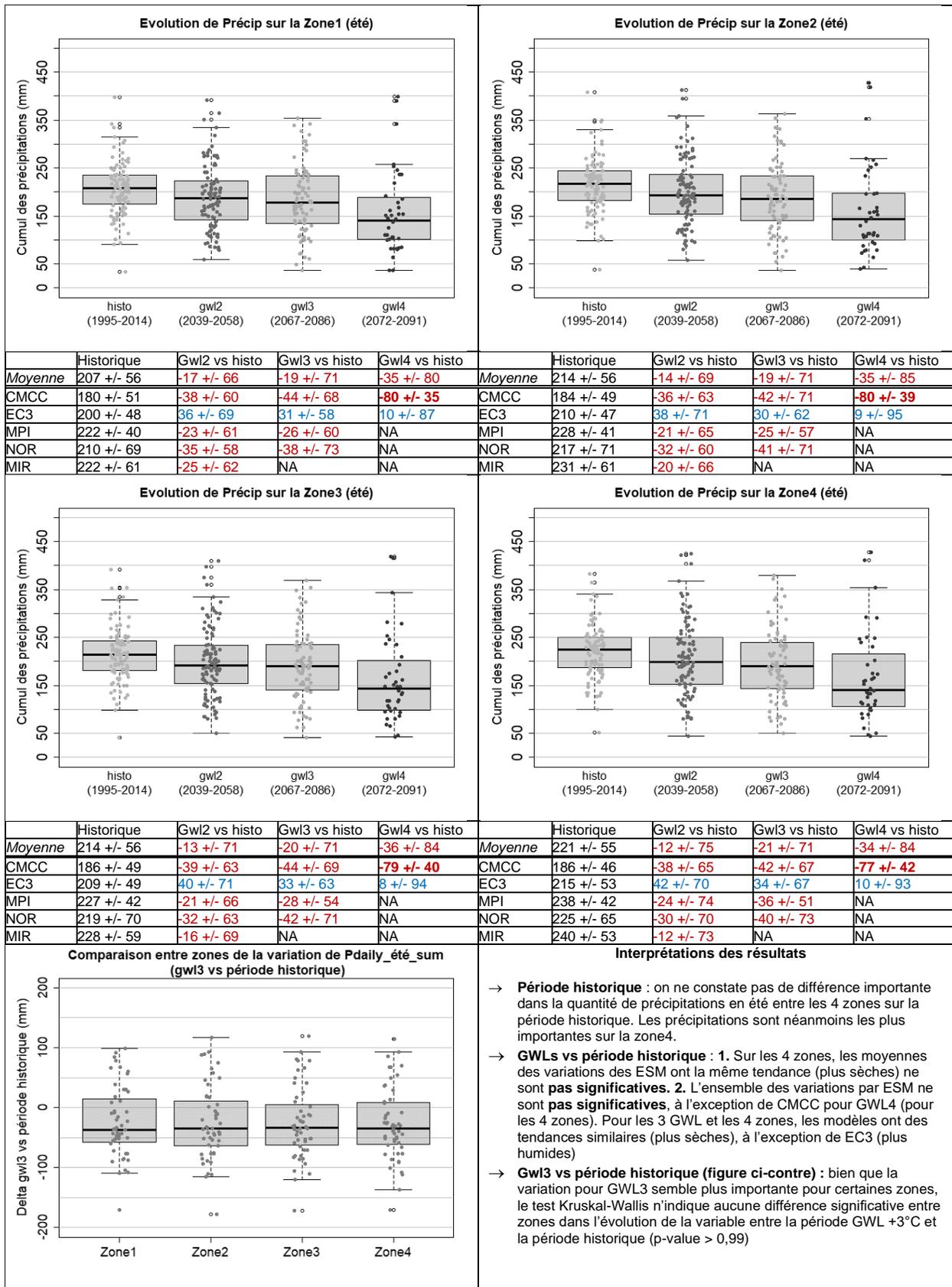
Analyse de l'évolution du cumul annuel de précipitations



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

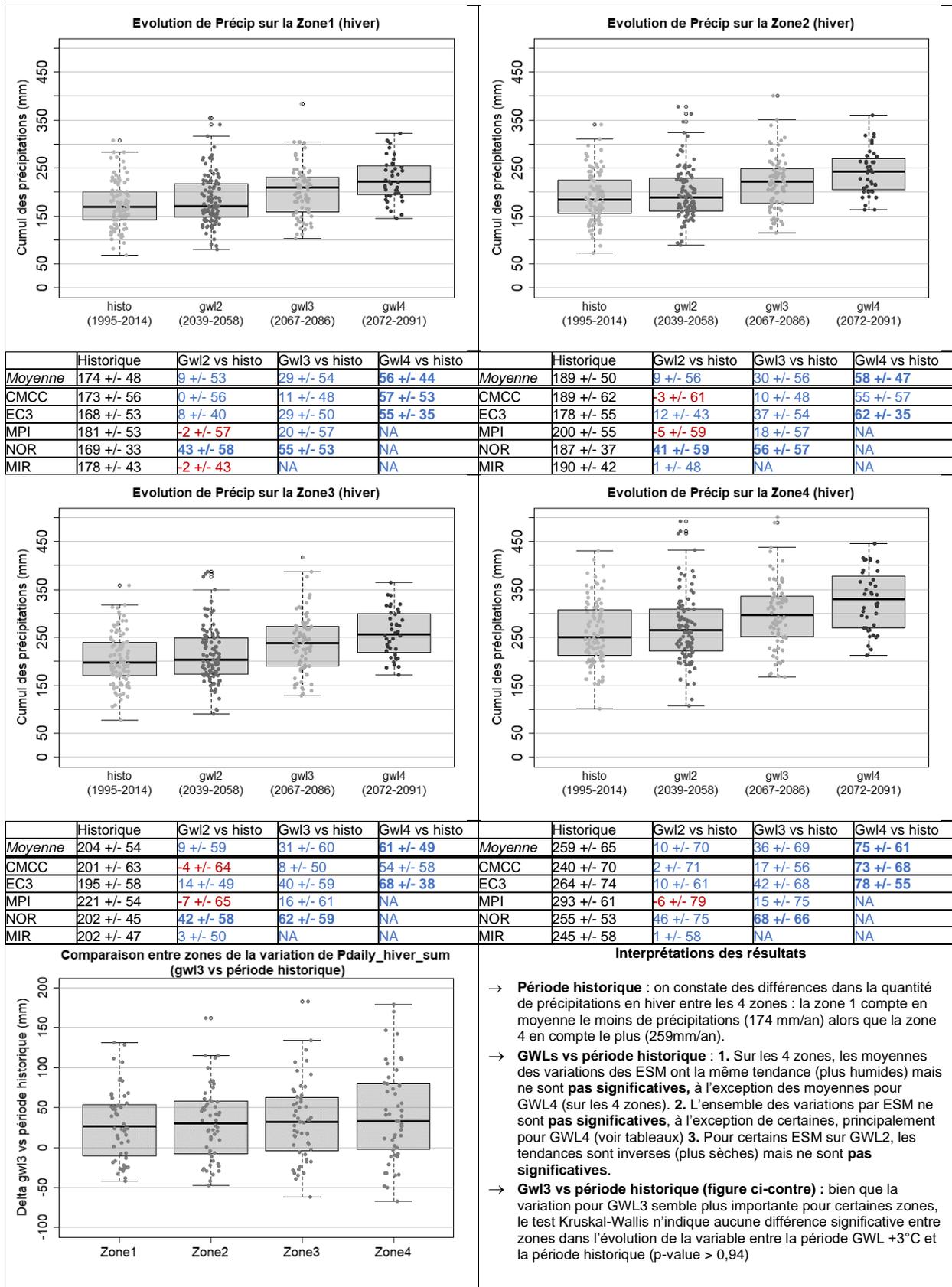
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations en été



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

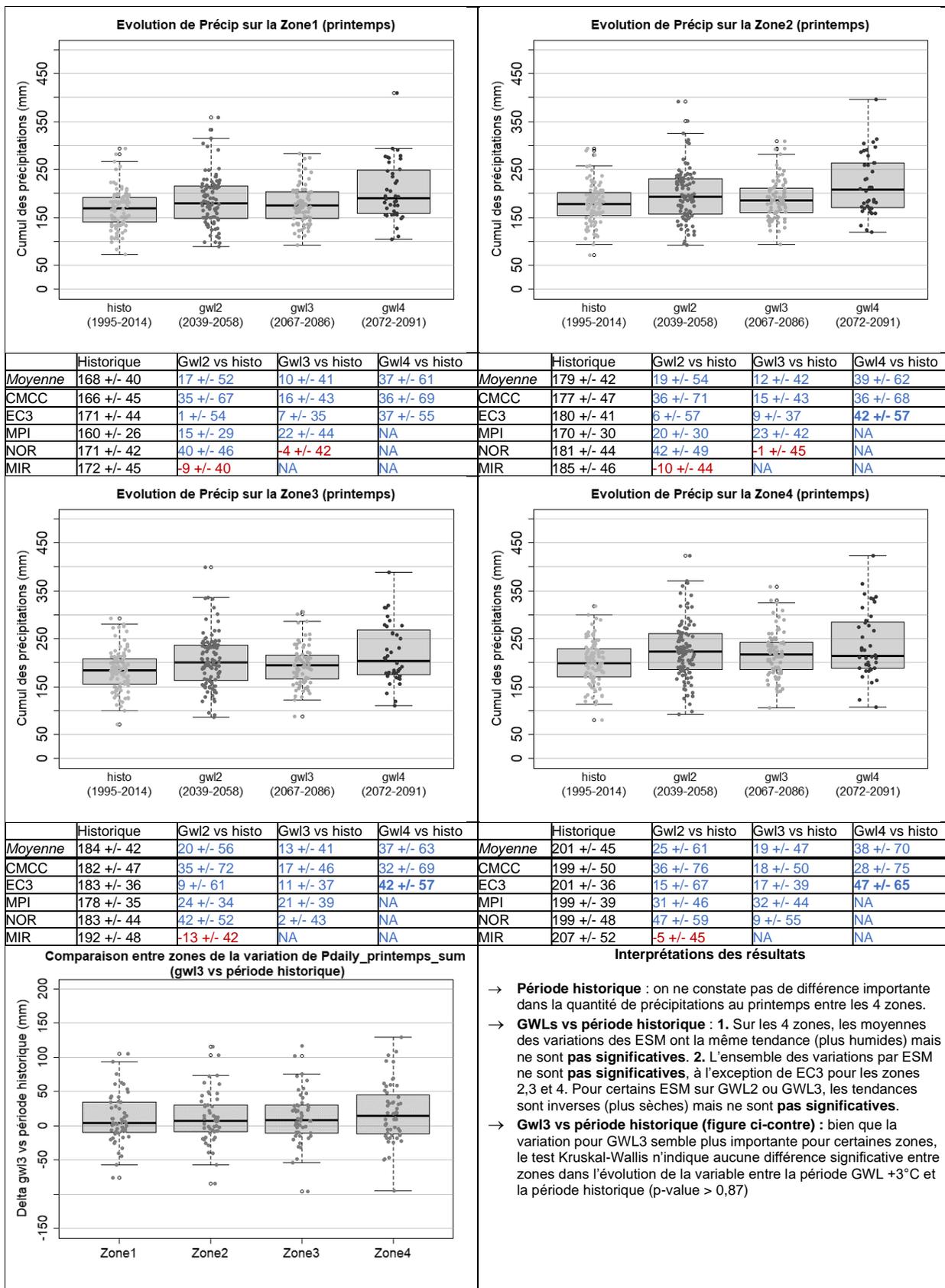
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations en hiver



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

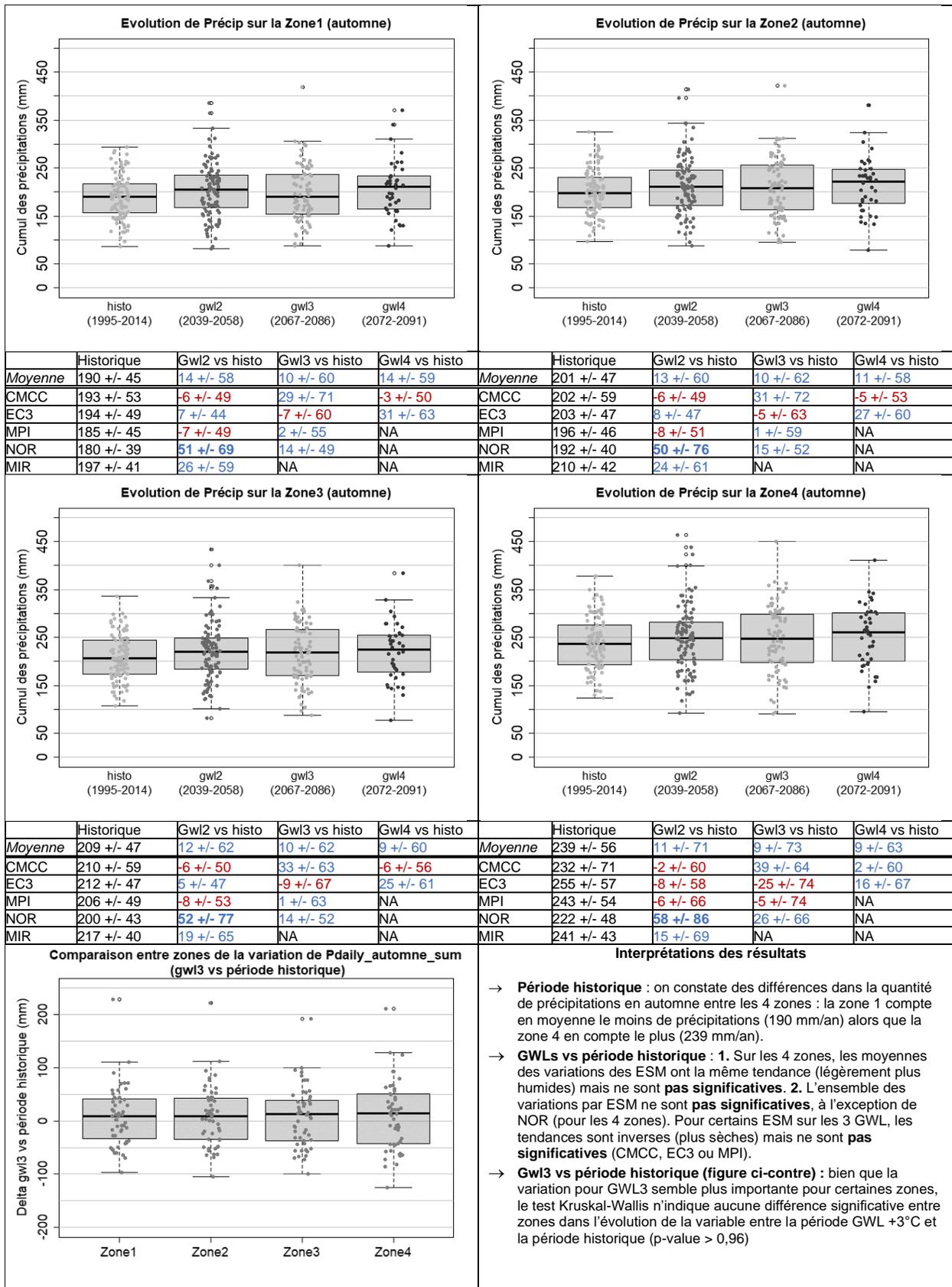
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations au printemps



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

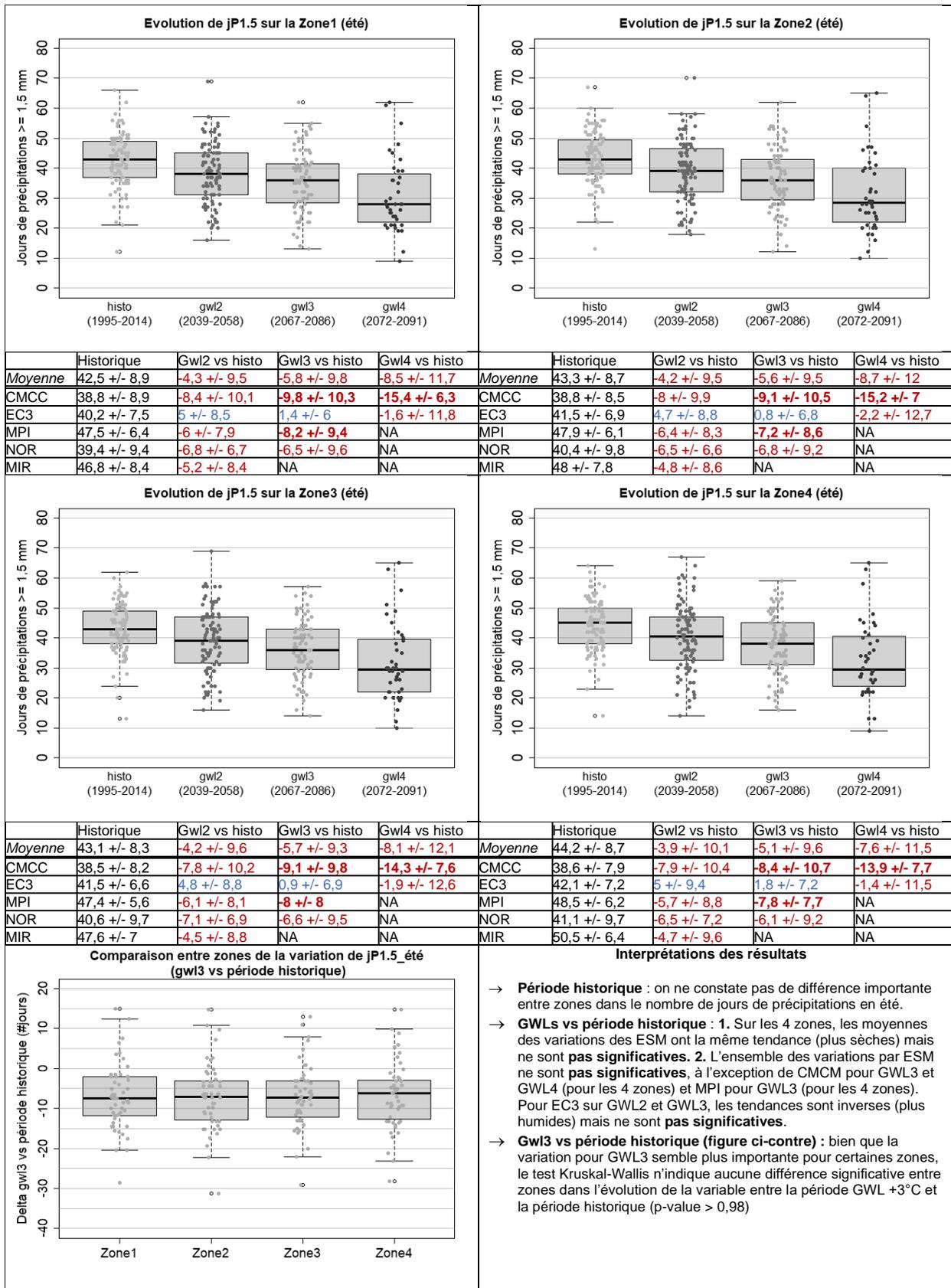
Analyse de l'évolution du cumul de précipitations en automne



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

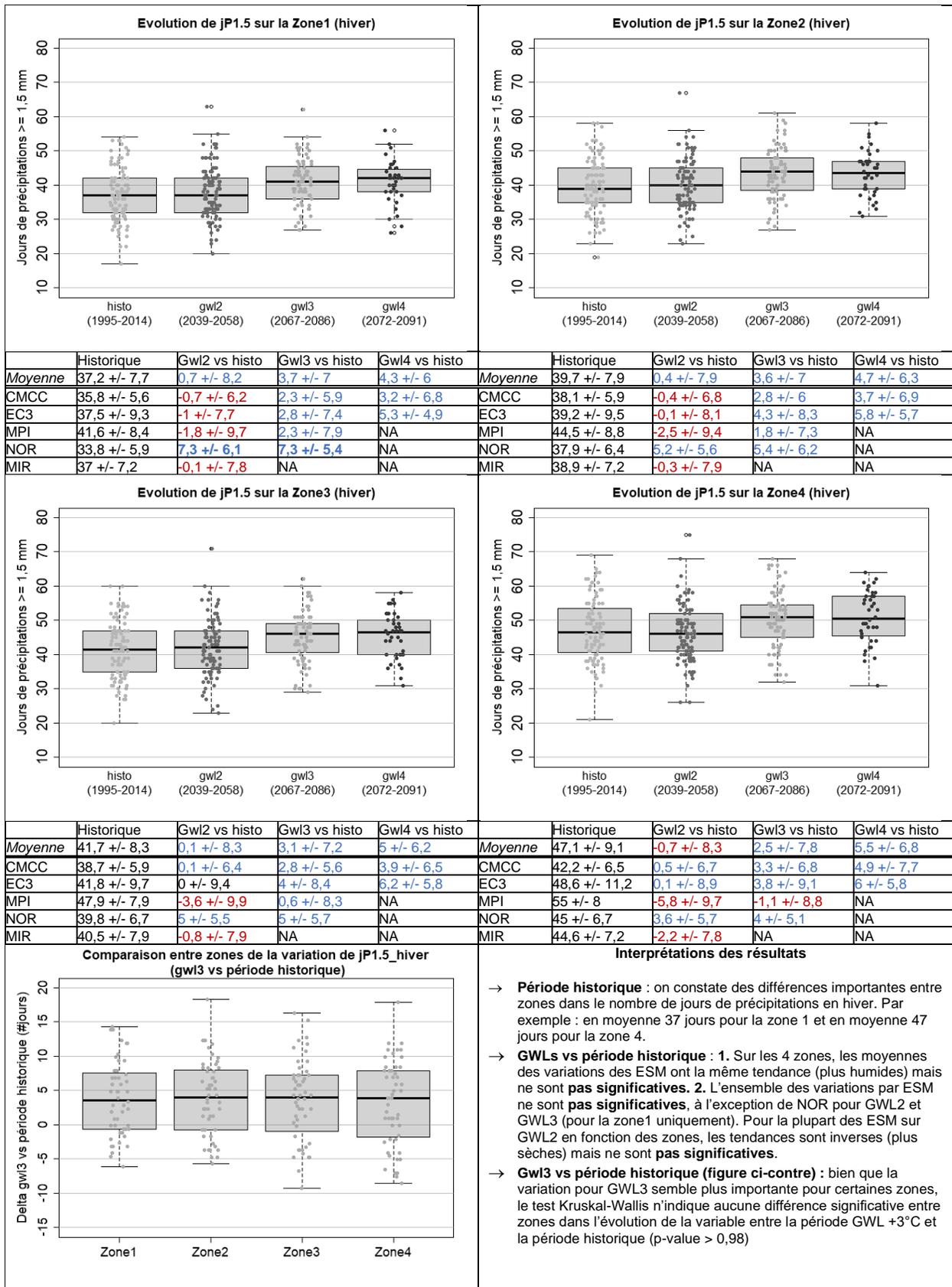
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations en été



Légende:

Valeur **significative** / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: **plus sec** / **plus humide**

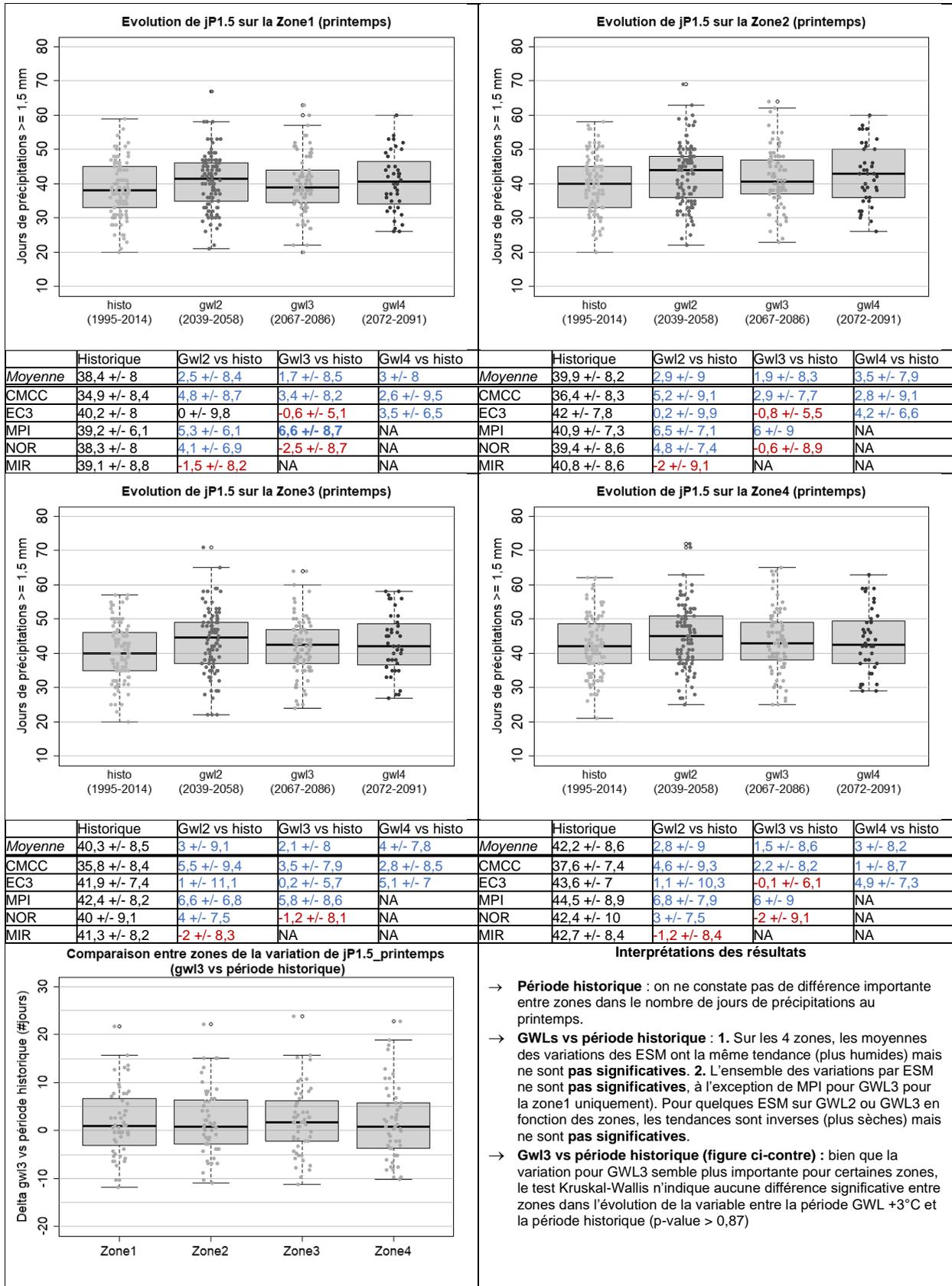
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations en hiver



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

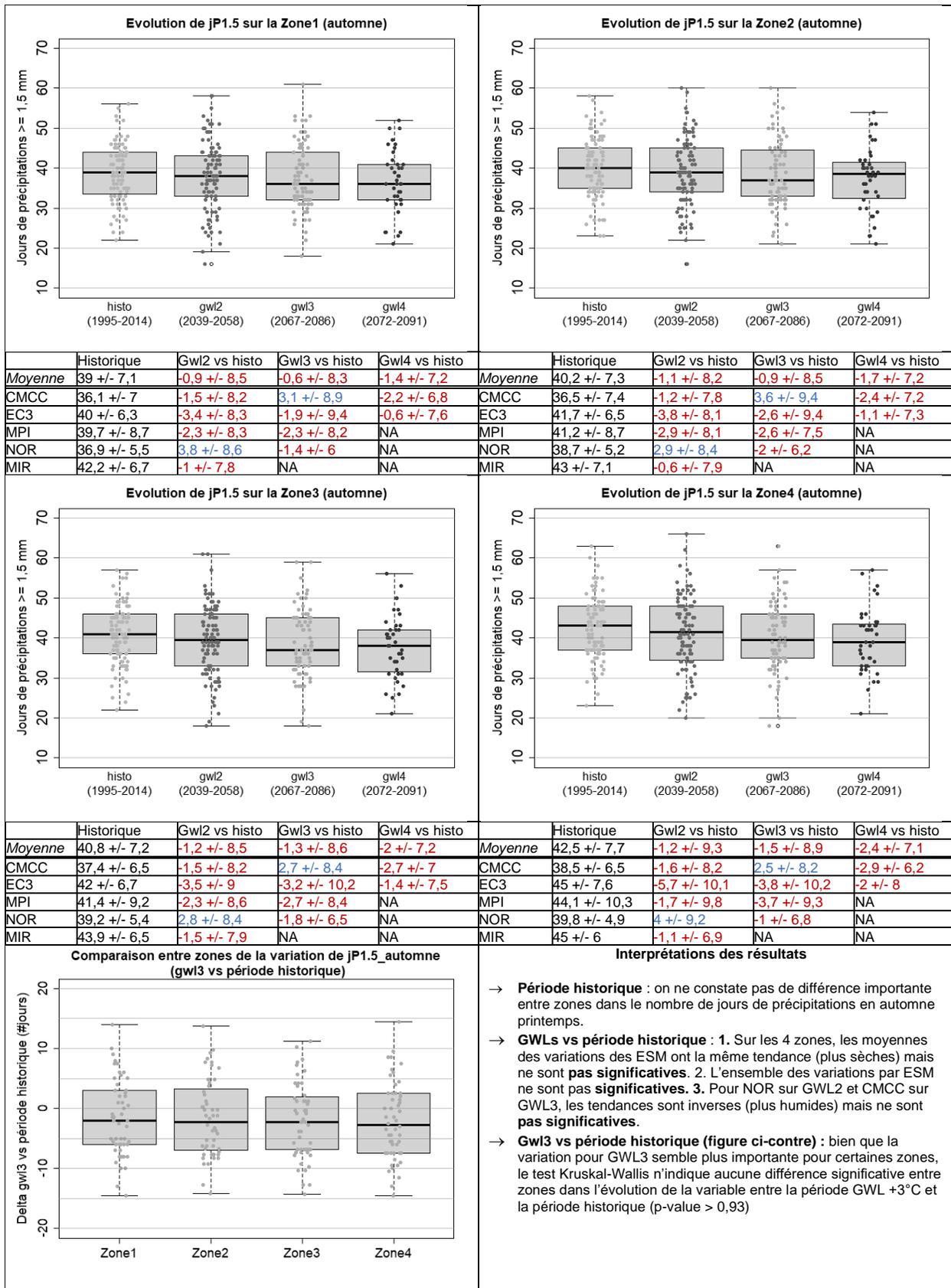
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations au printemps



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

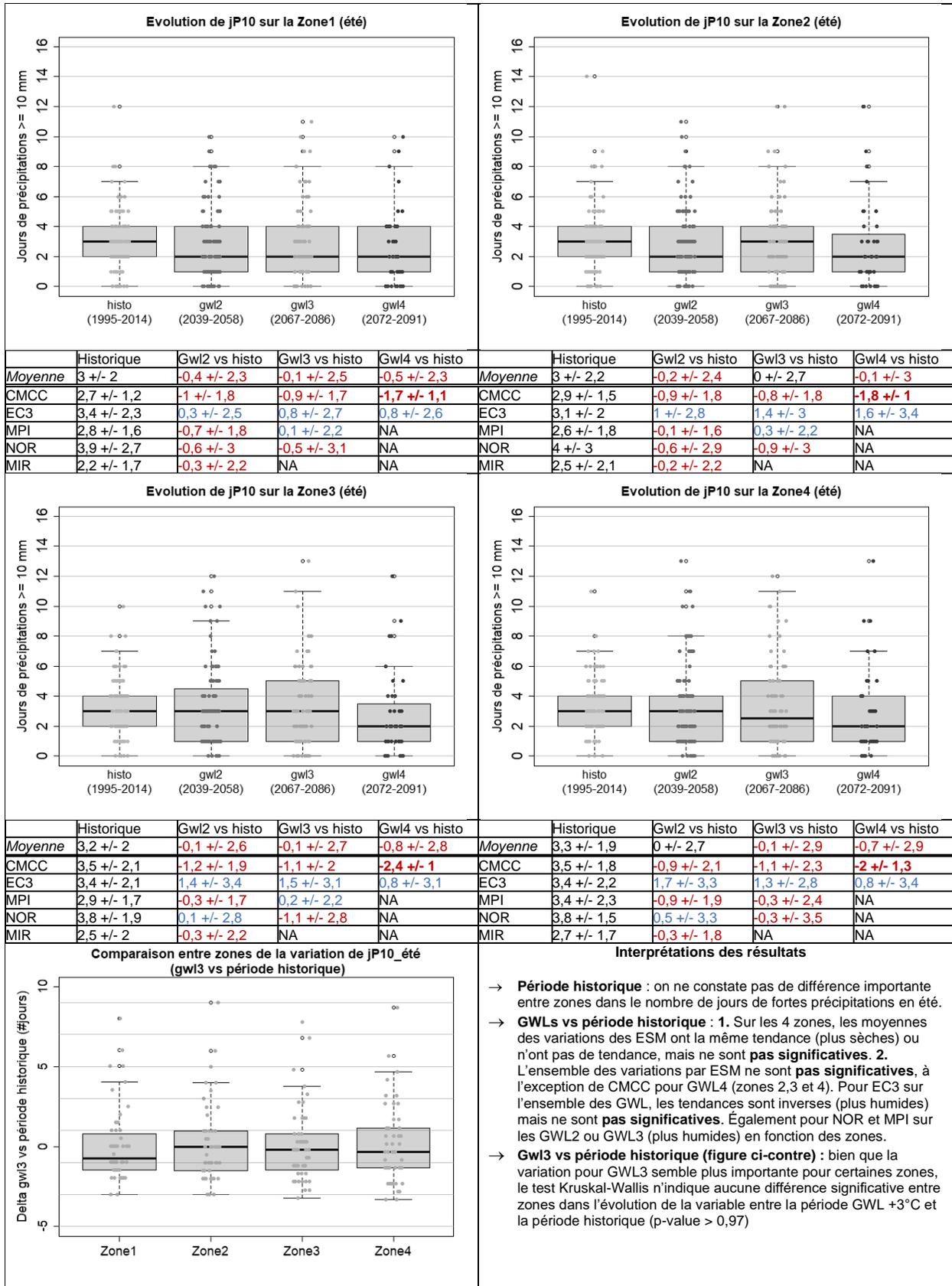
Analyse de l'évolution du # de jours de précipitations en automne



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

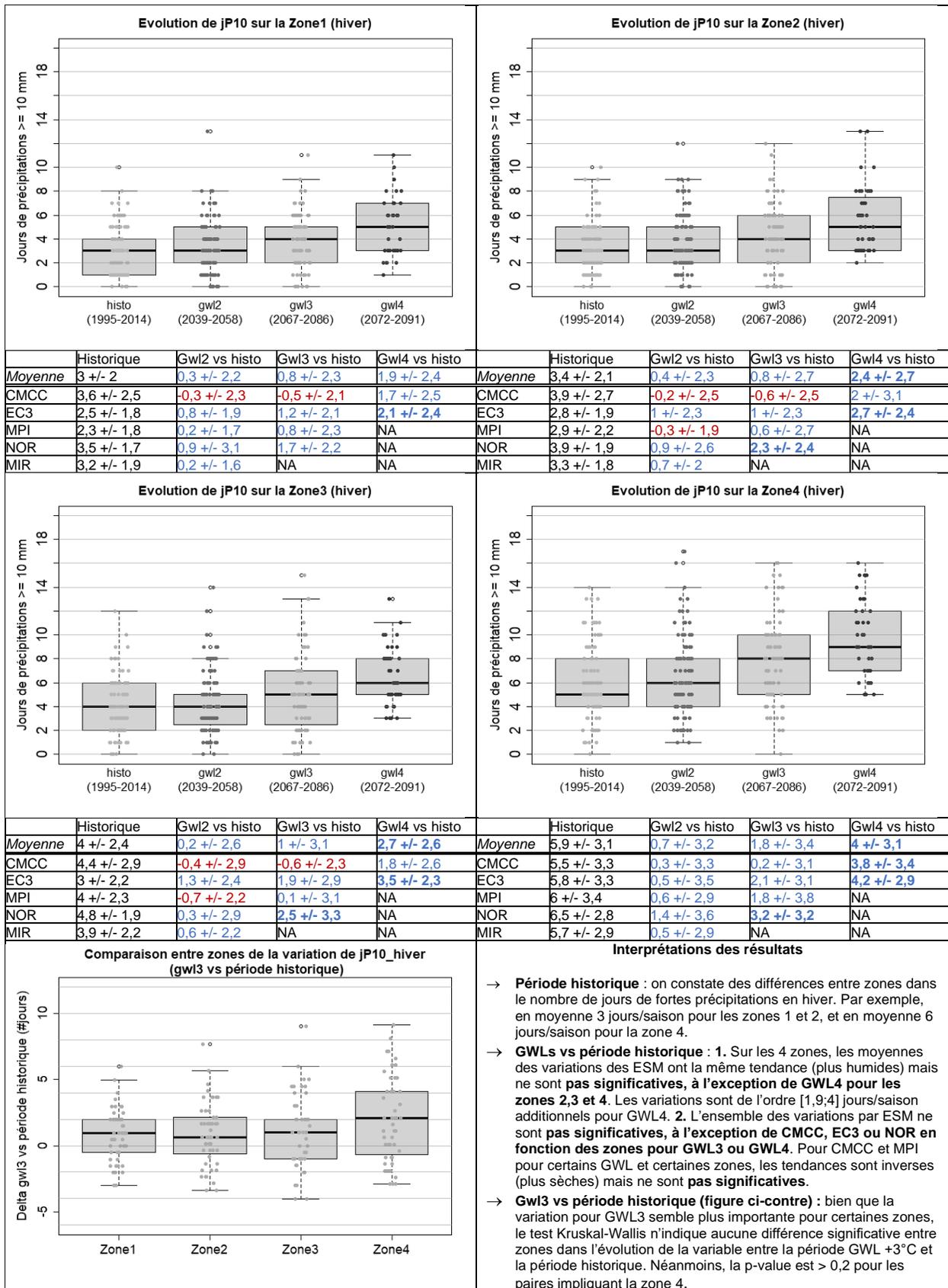
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations en été



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

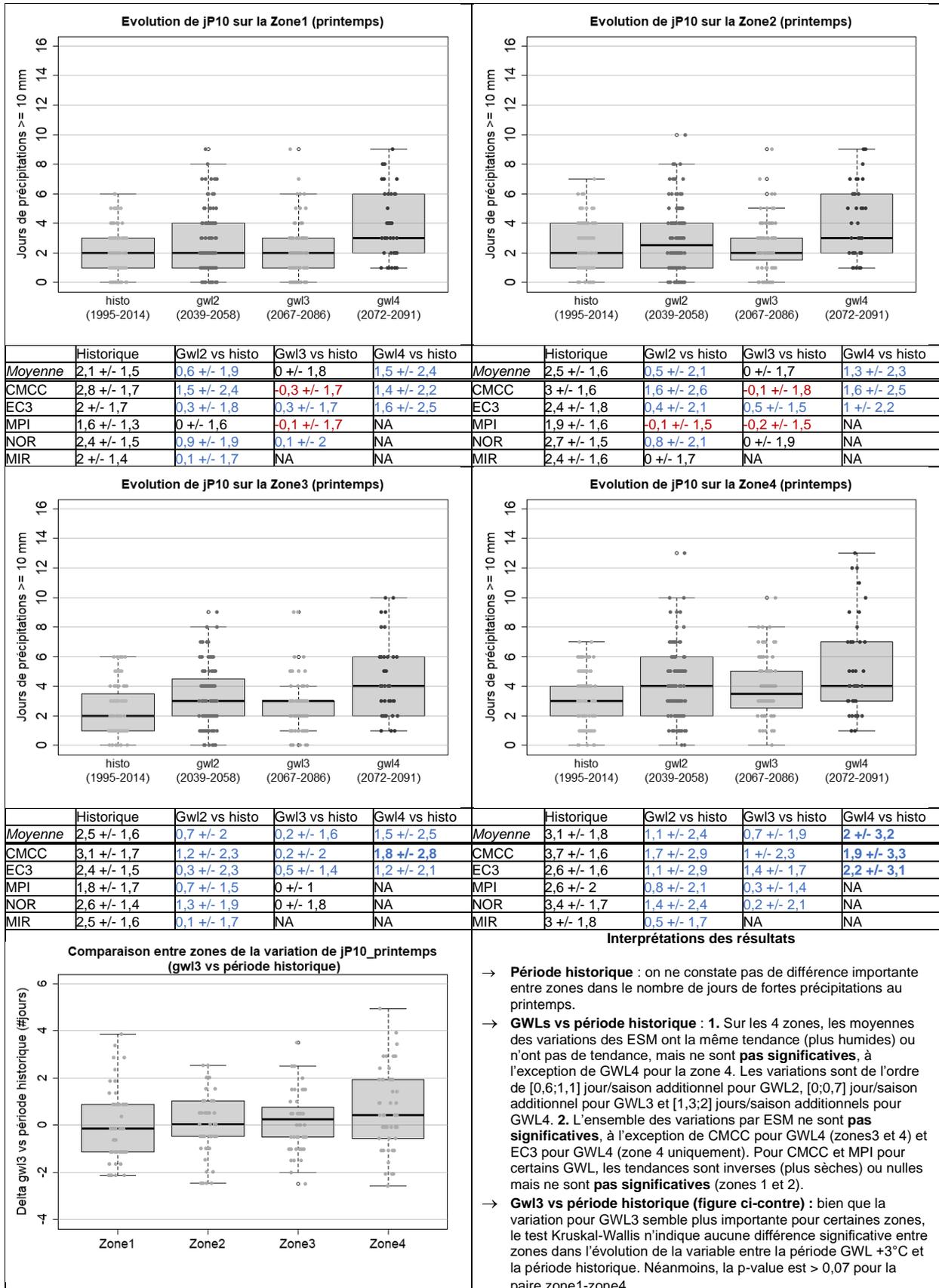
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations en hiver



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

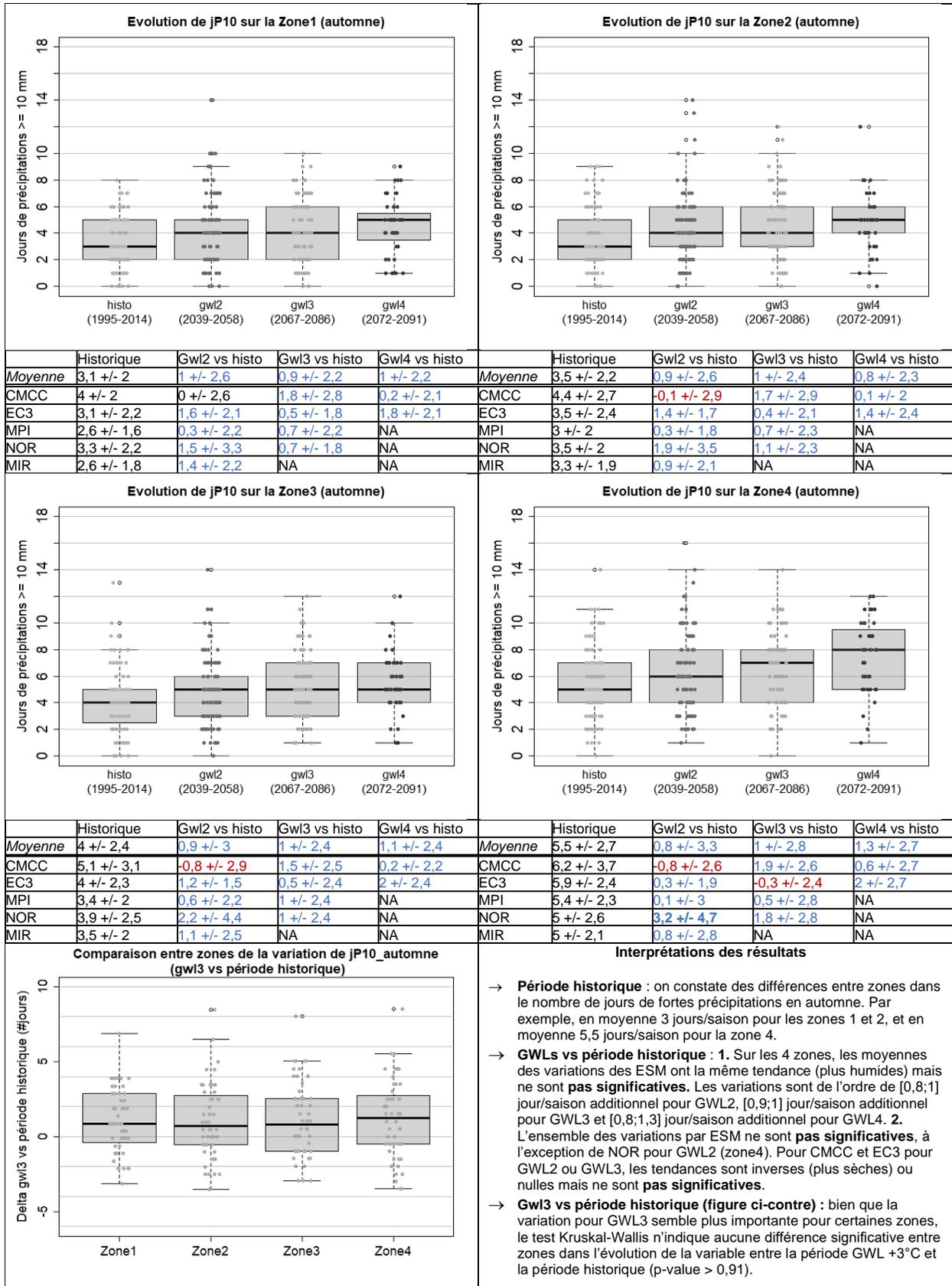
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations au printemps



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

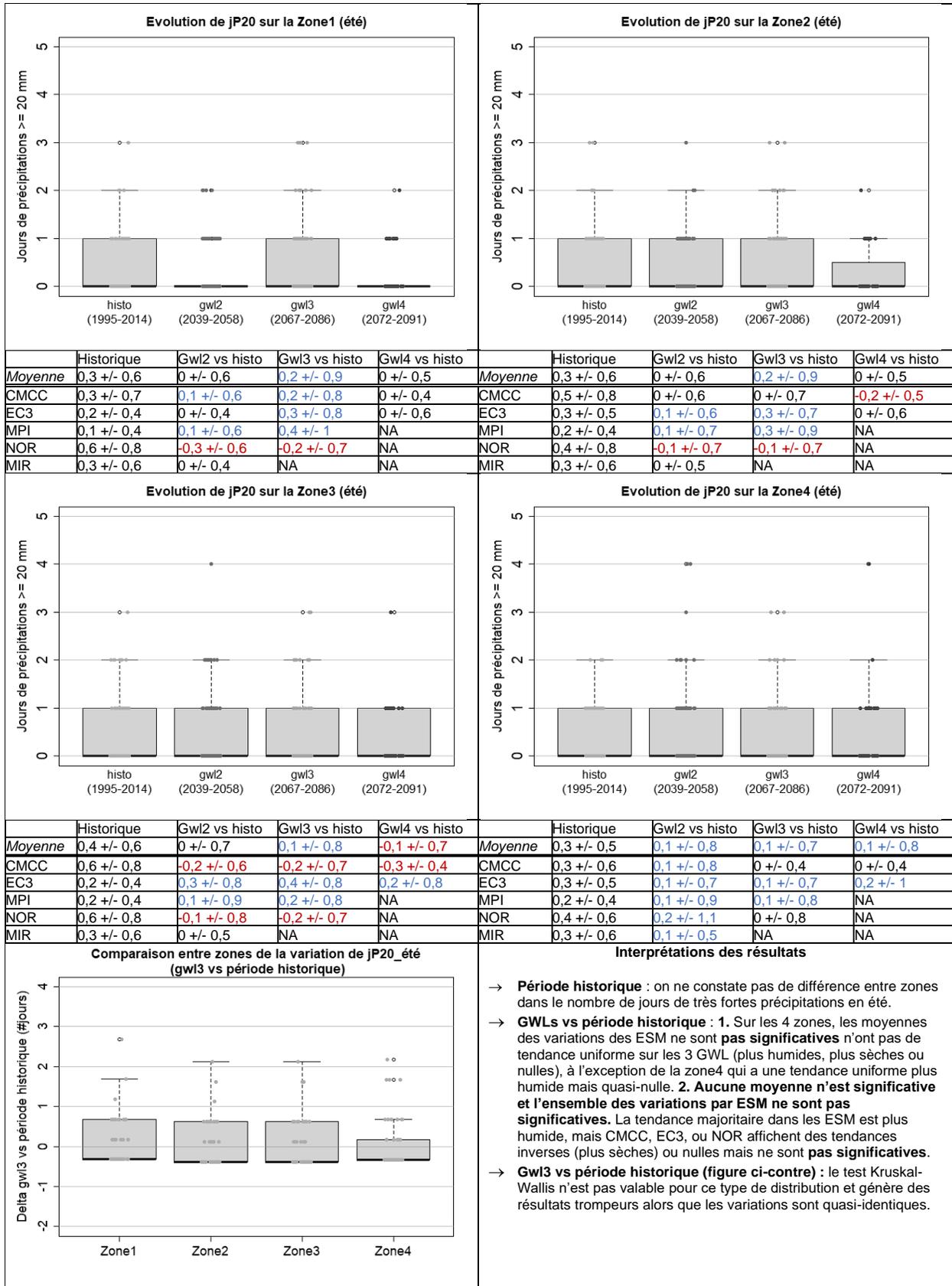
Analyse de l'évolution du # de jours de fortes précipitations en automne



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

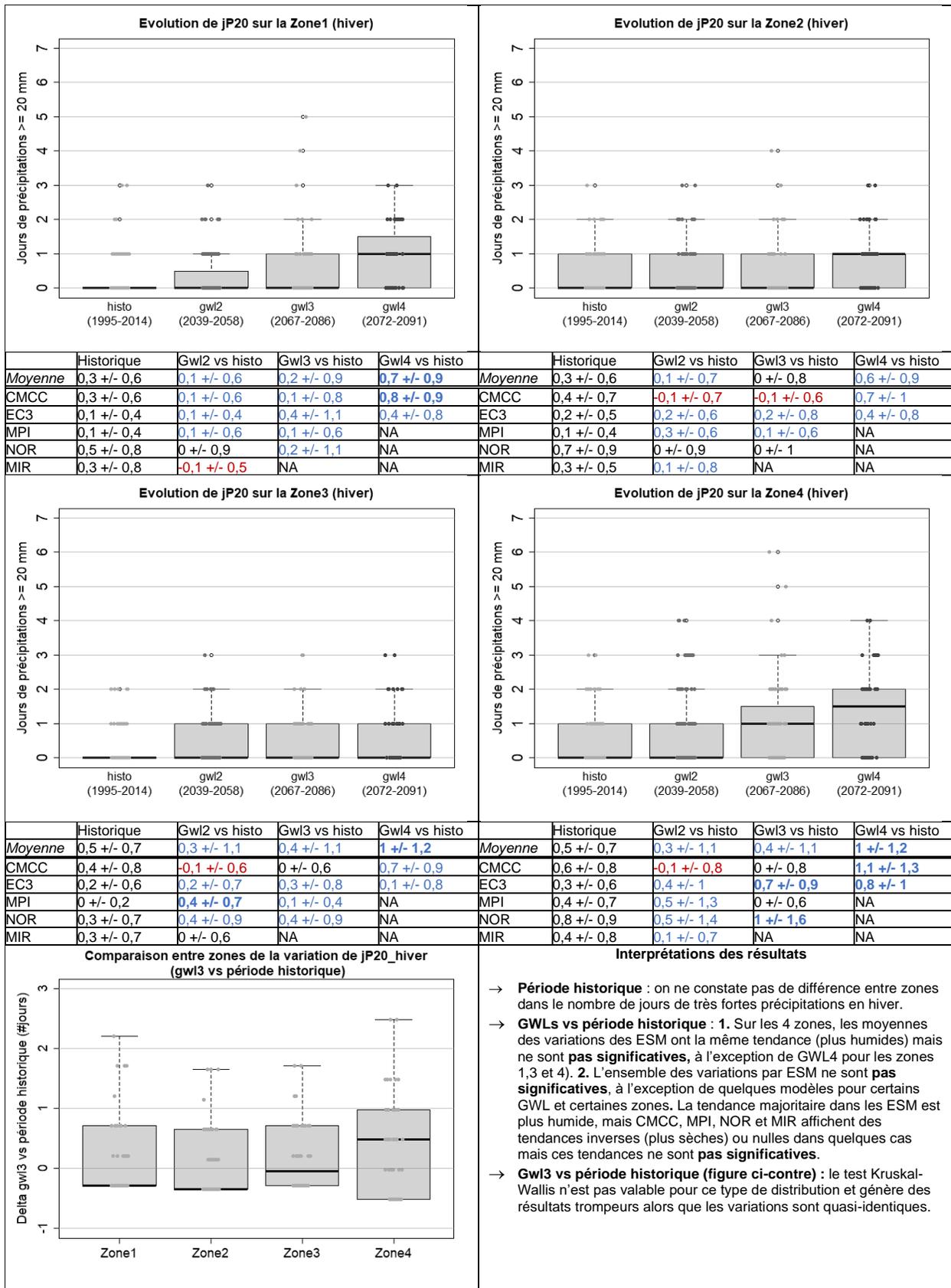
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations en été



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

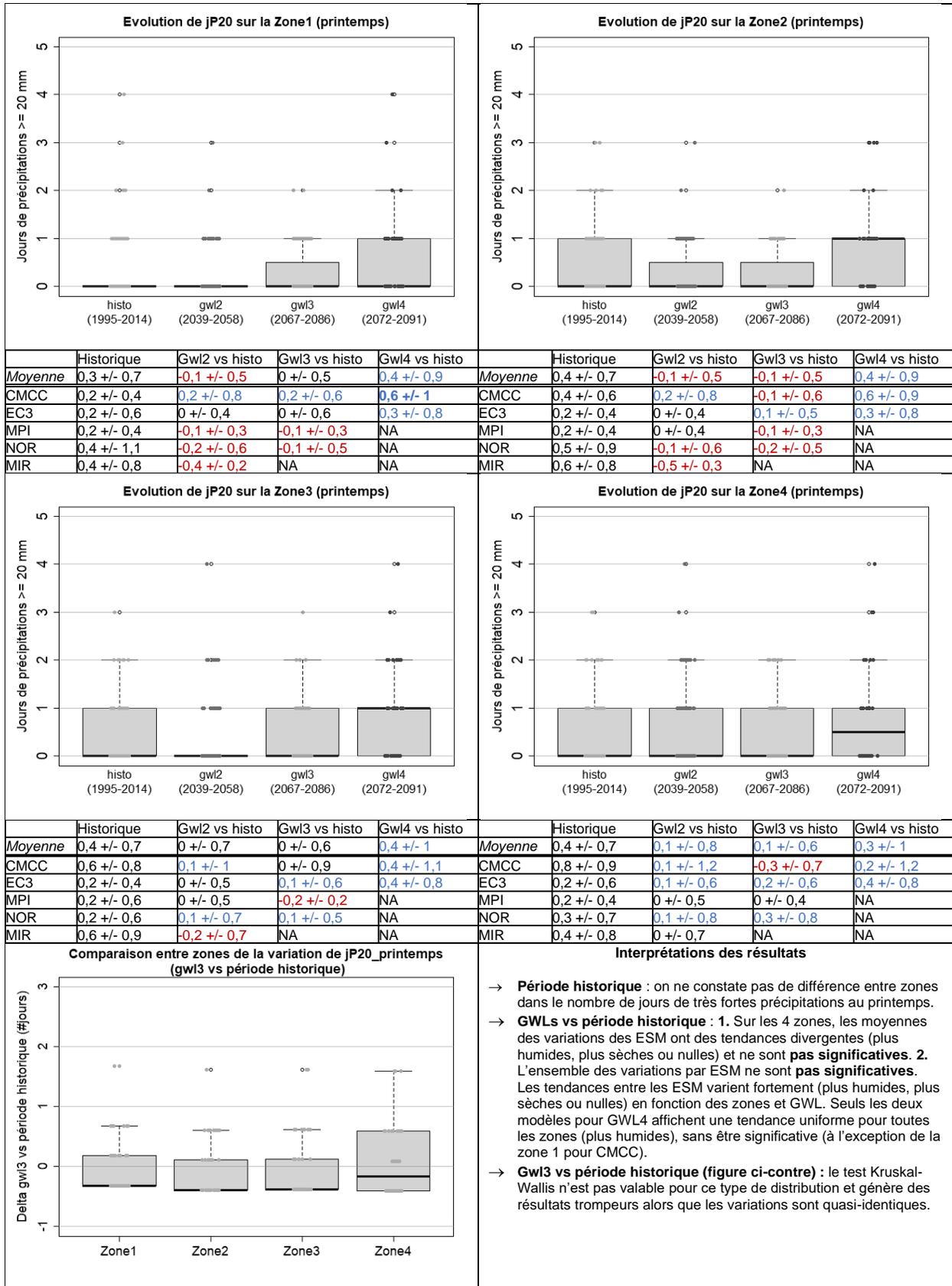
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations en hiver



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

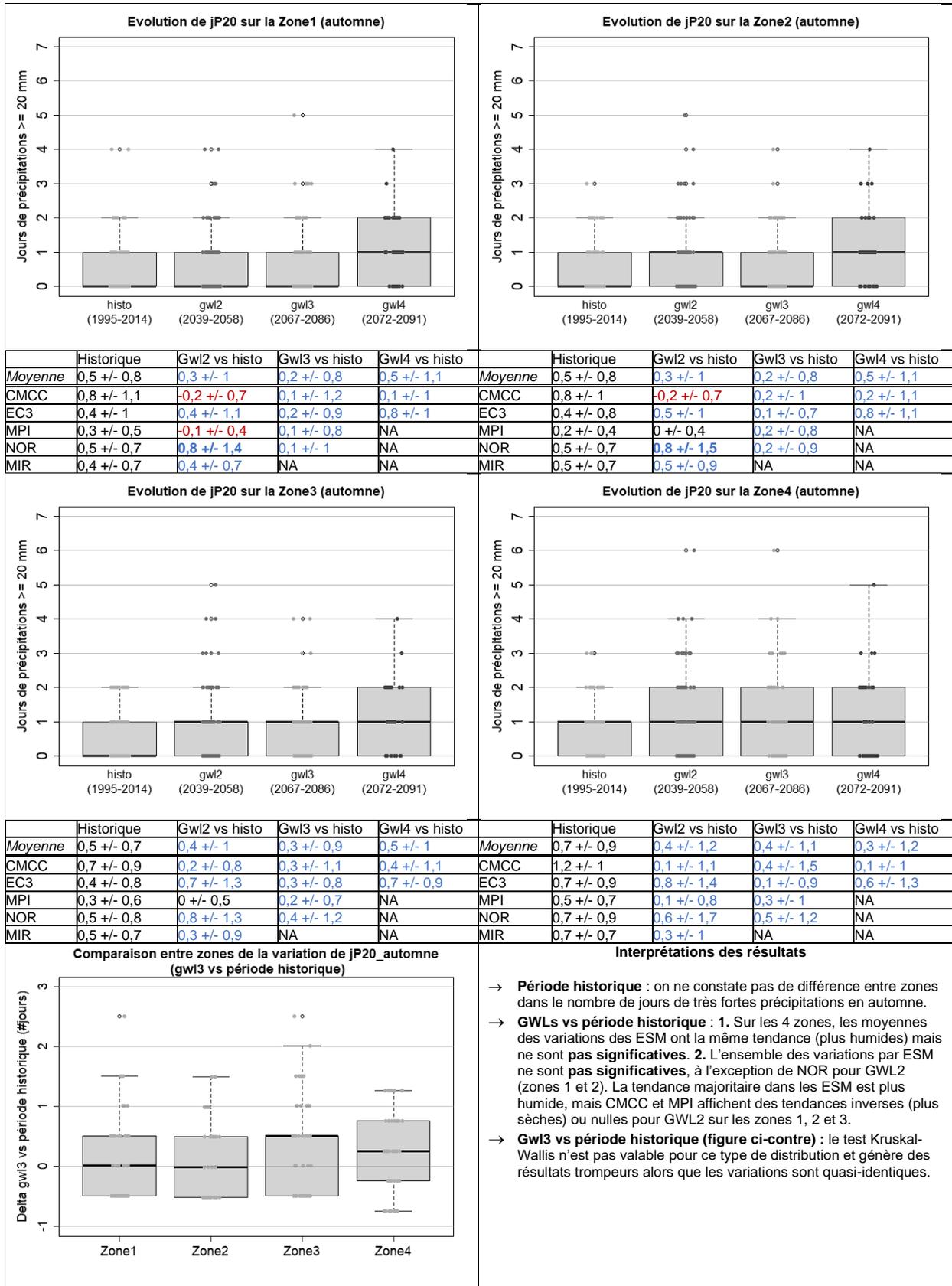
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations au printemps



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

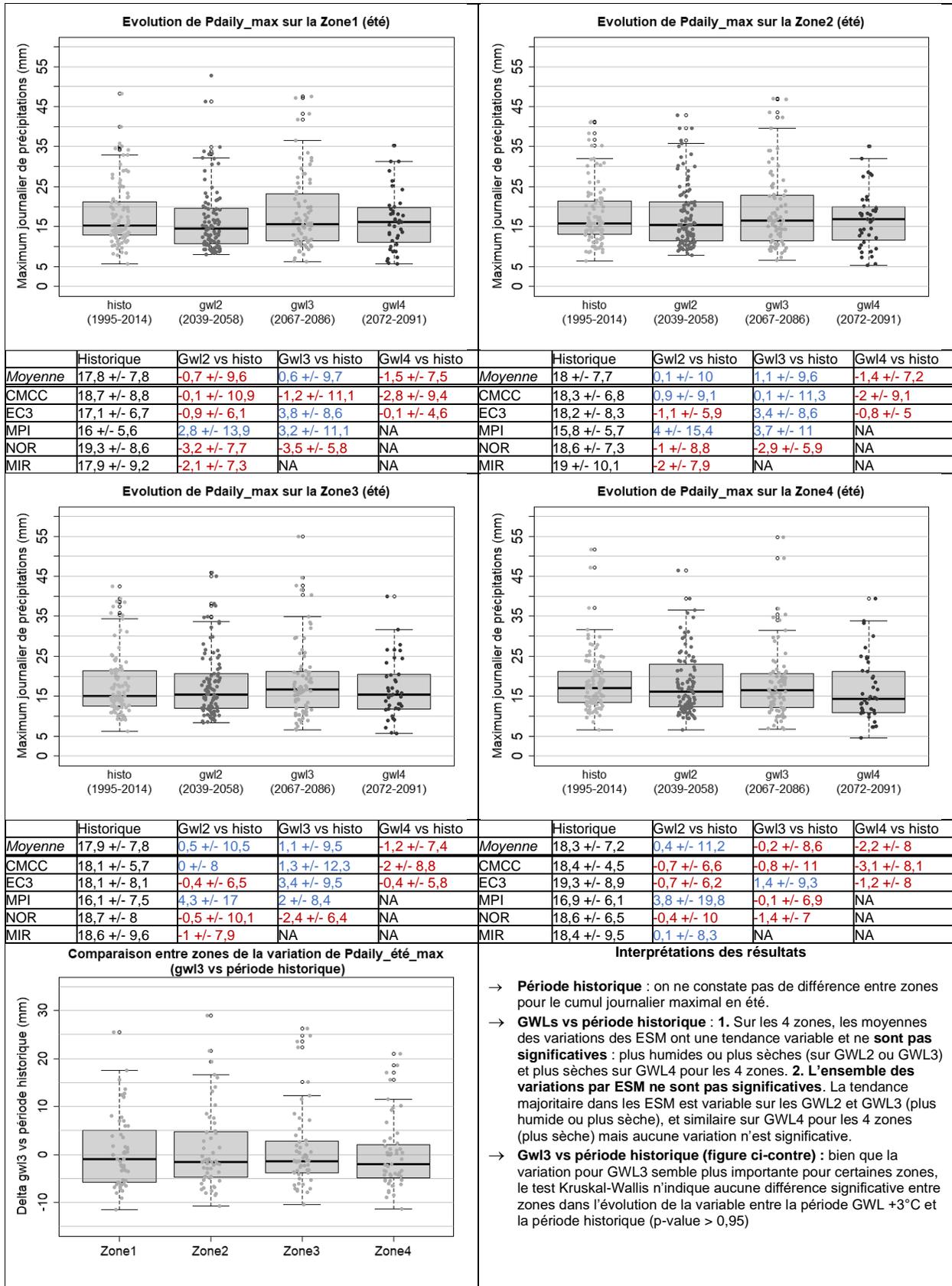
Analyse de l'évolution du # de jours de très fortes précipitations en automne



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

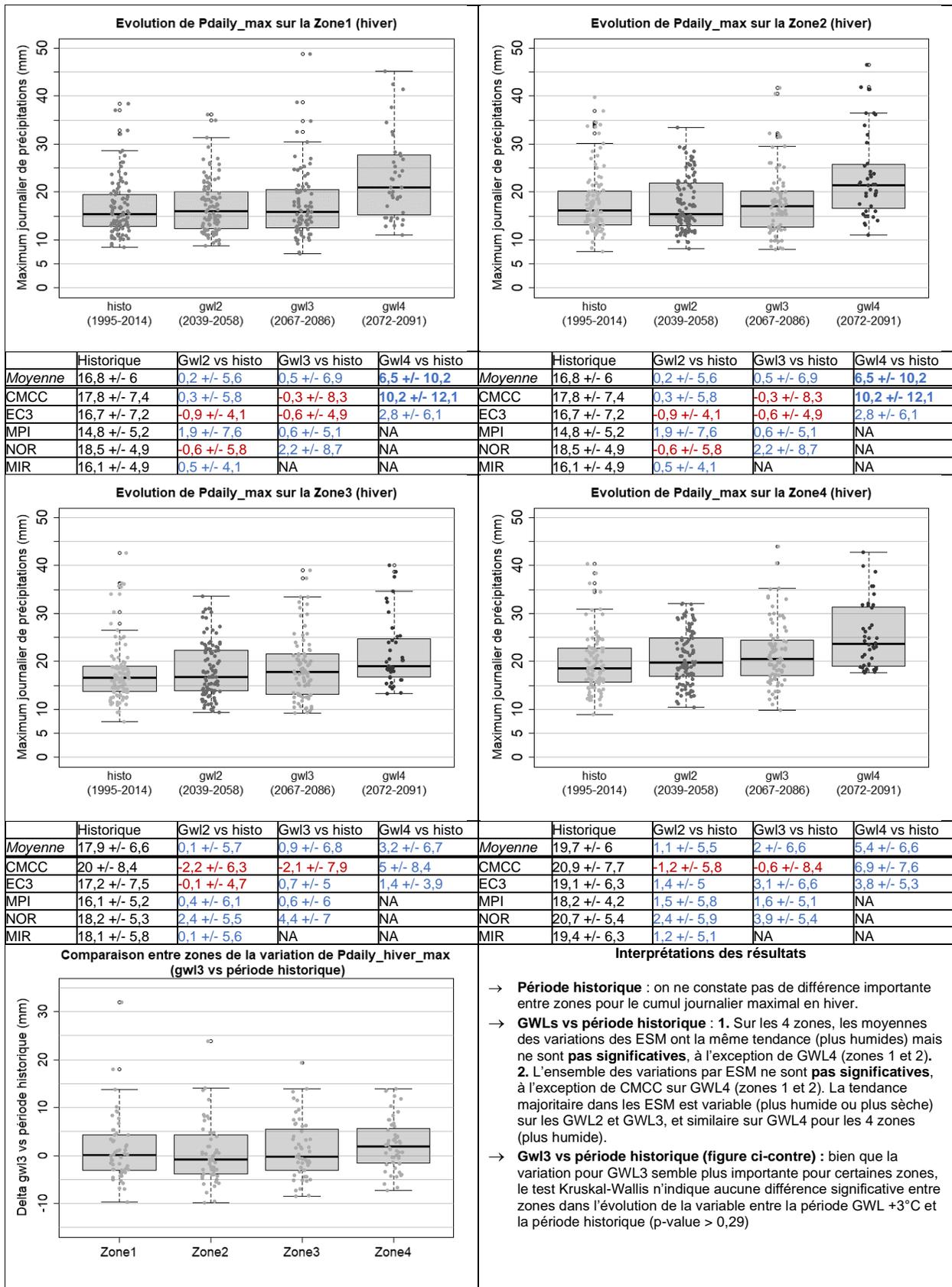
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier en été



Légende:

Valeur **significative** / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: **plus sec** / **plus humide**

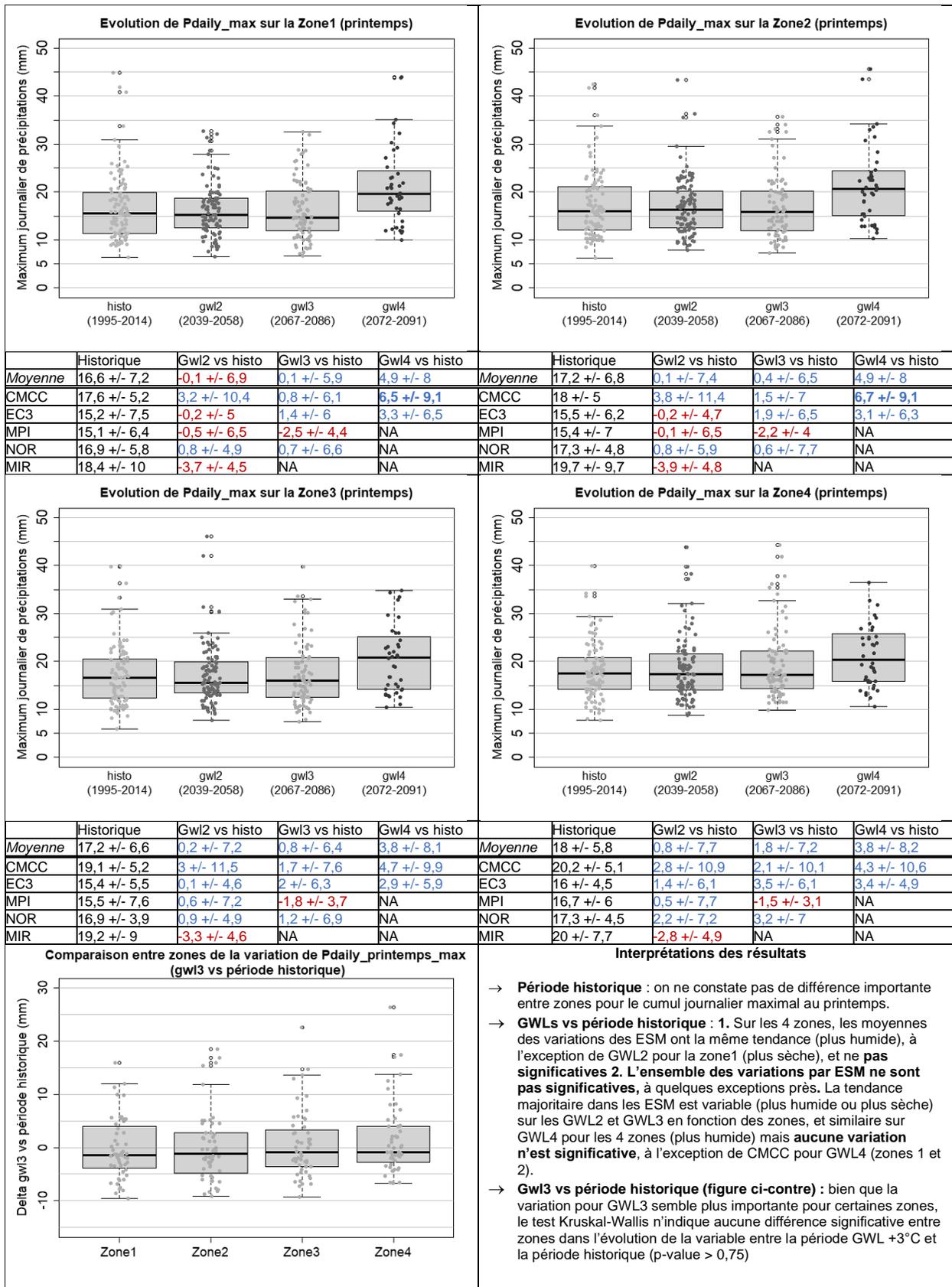
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier en hiver



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

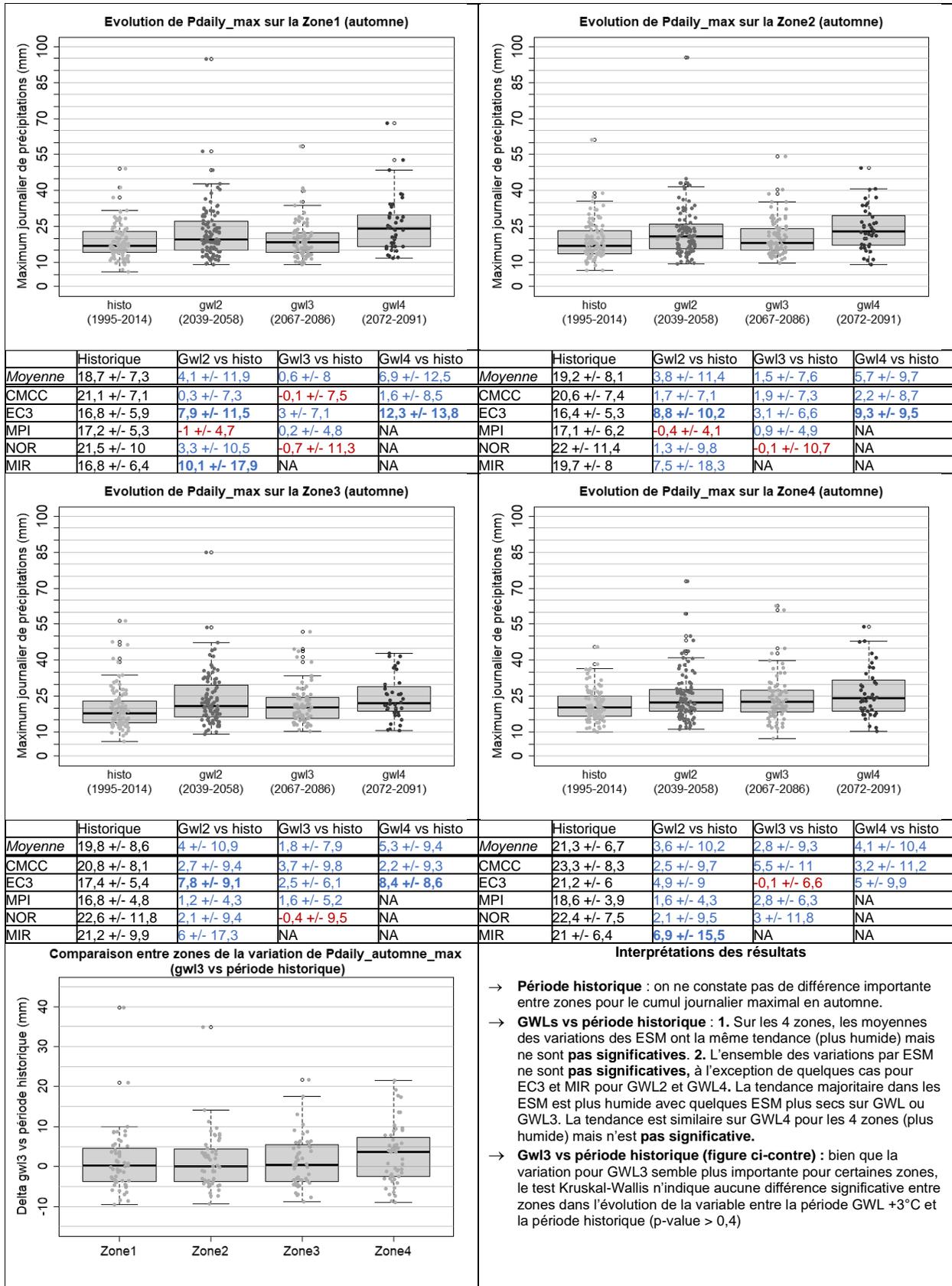
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier au printemps



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

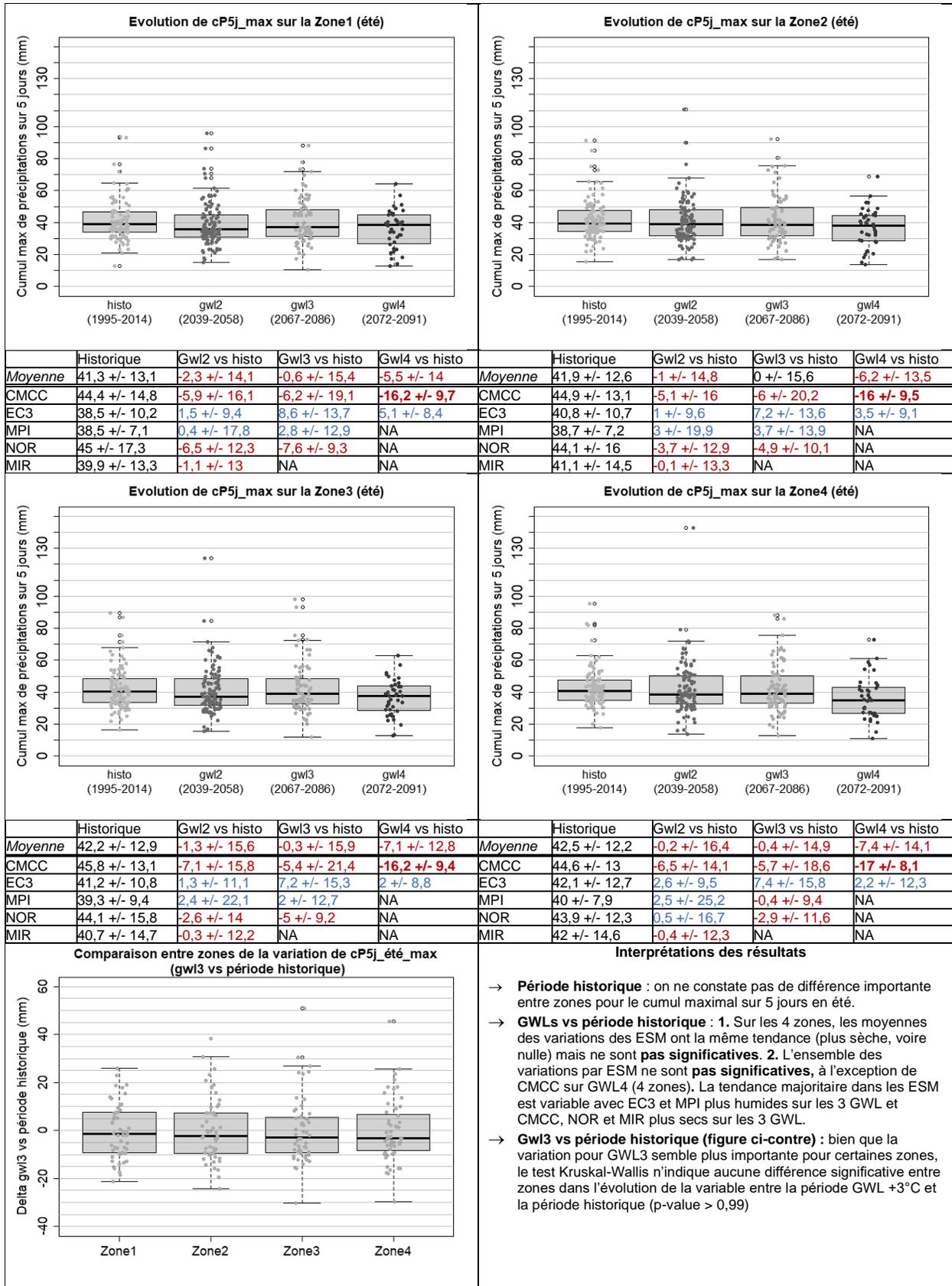
Analyse de l'évolution du cumul maximal journalier en automne



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

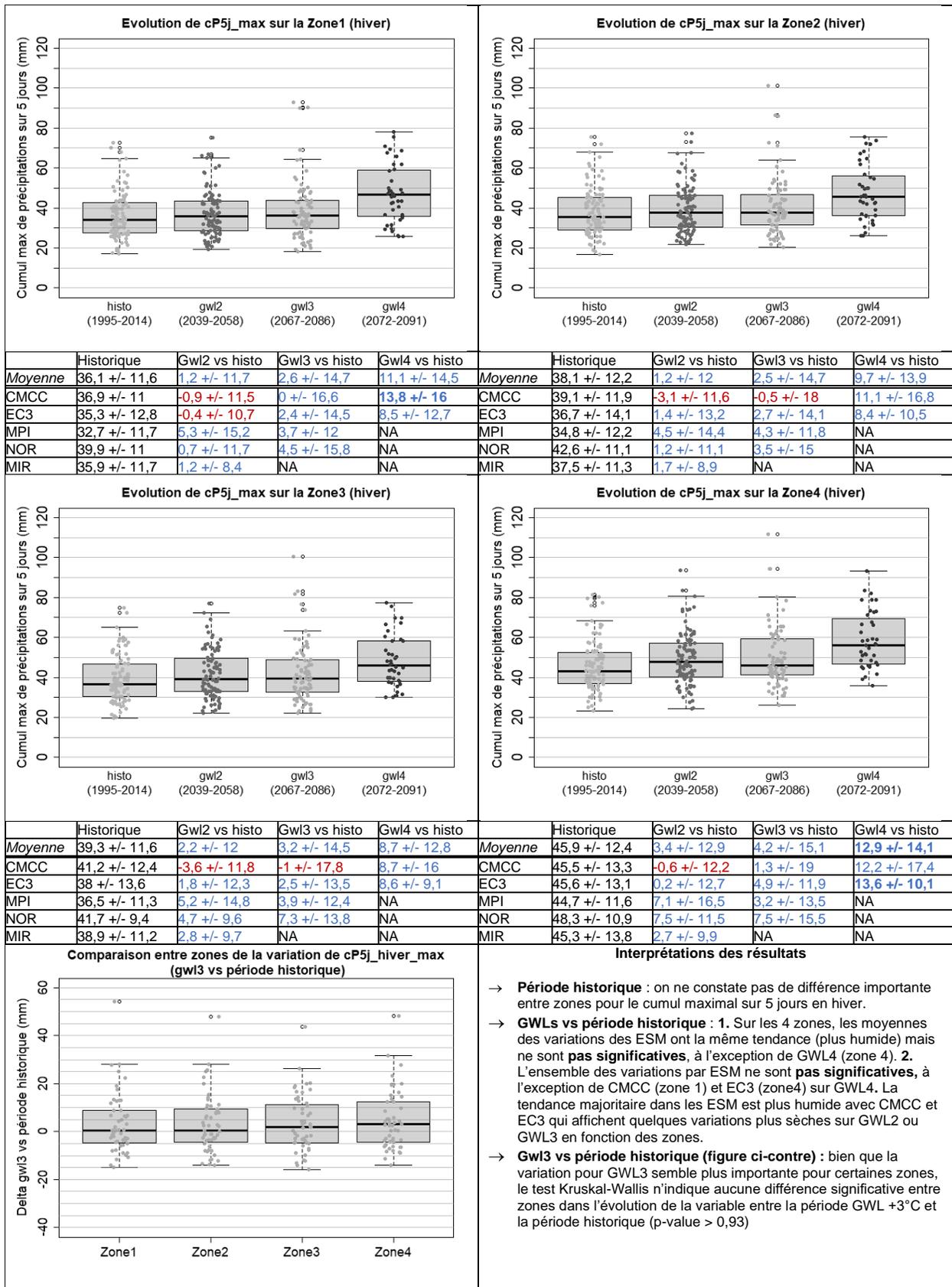
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours en été



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

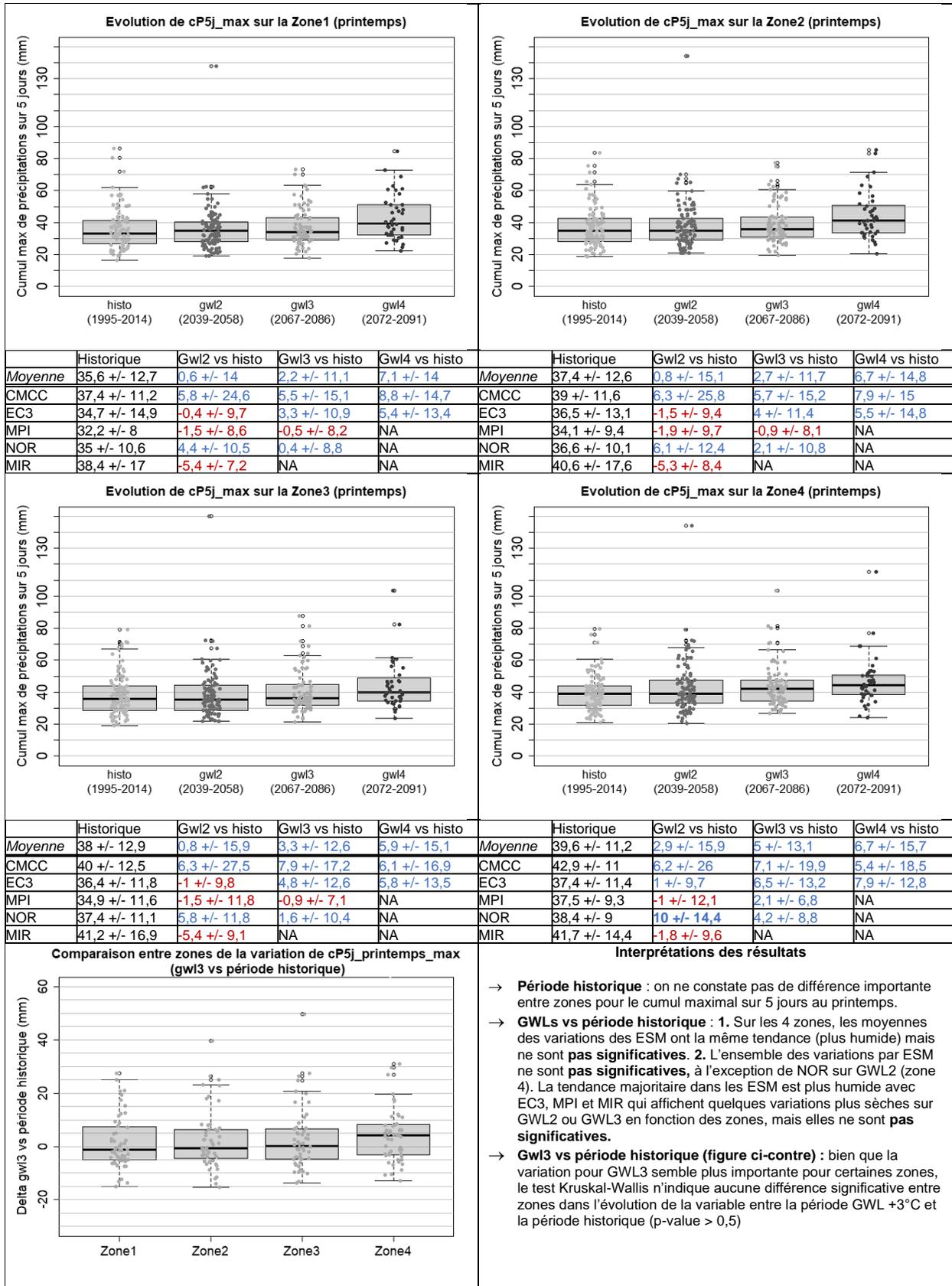
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours en hiver



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

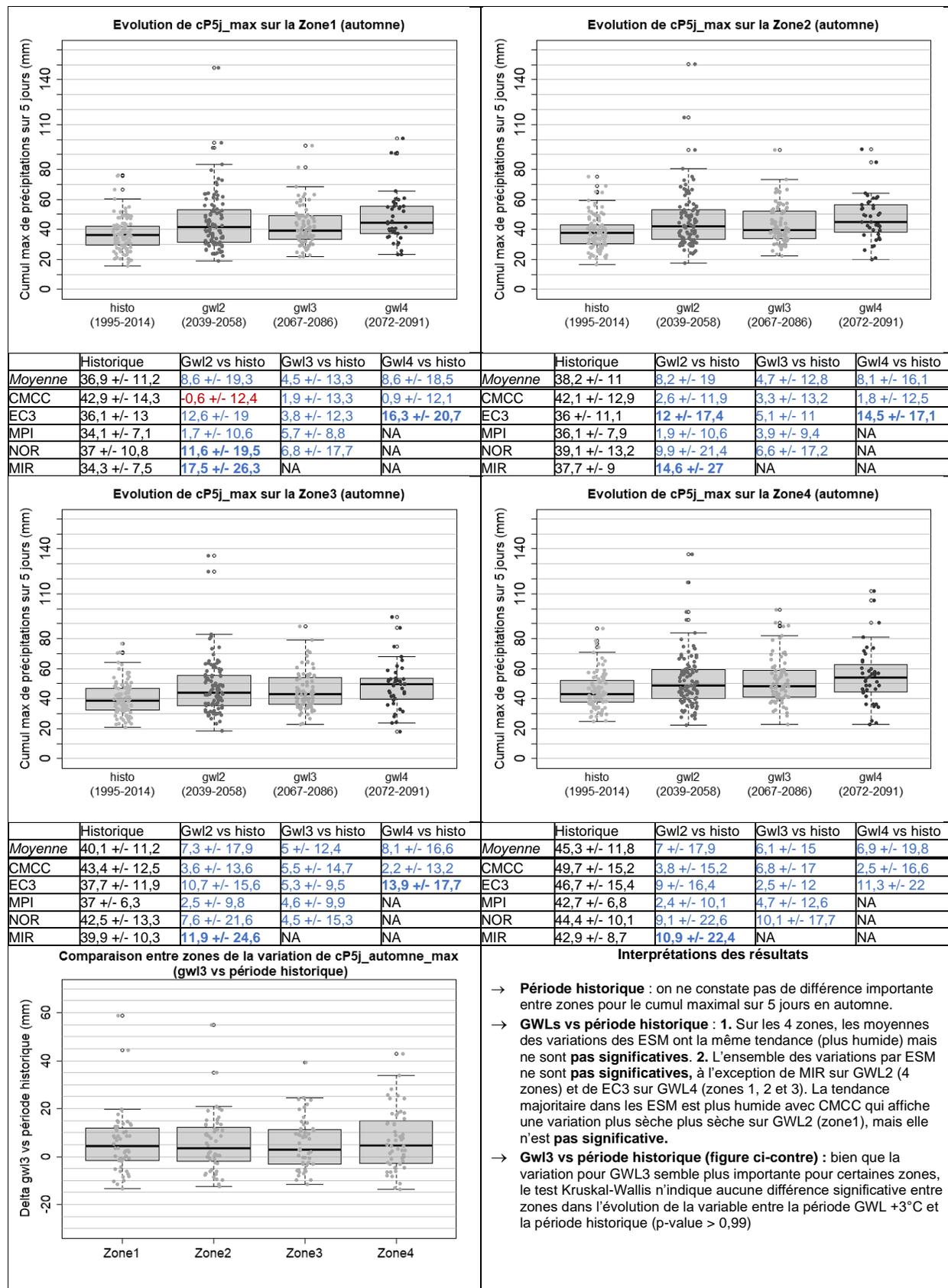
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours au printemps



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

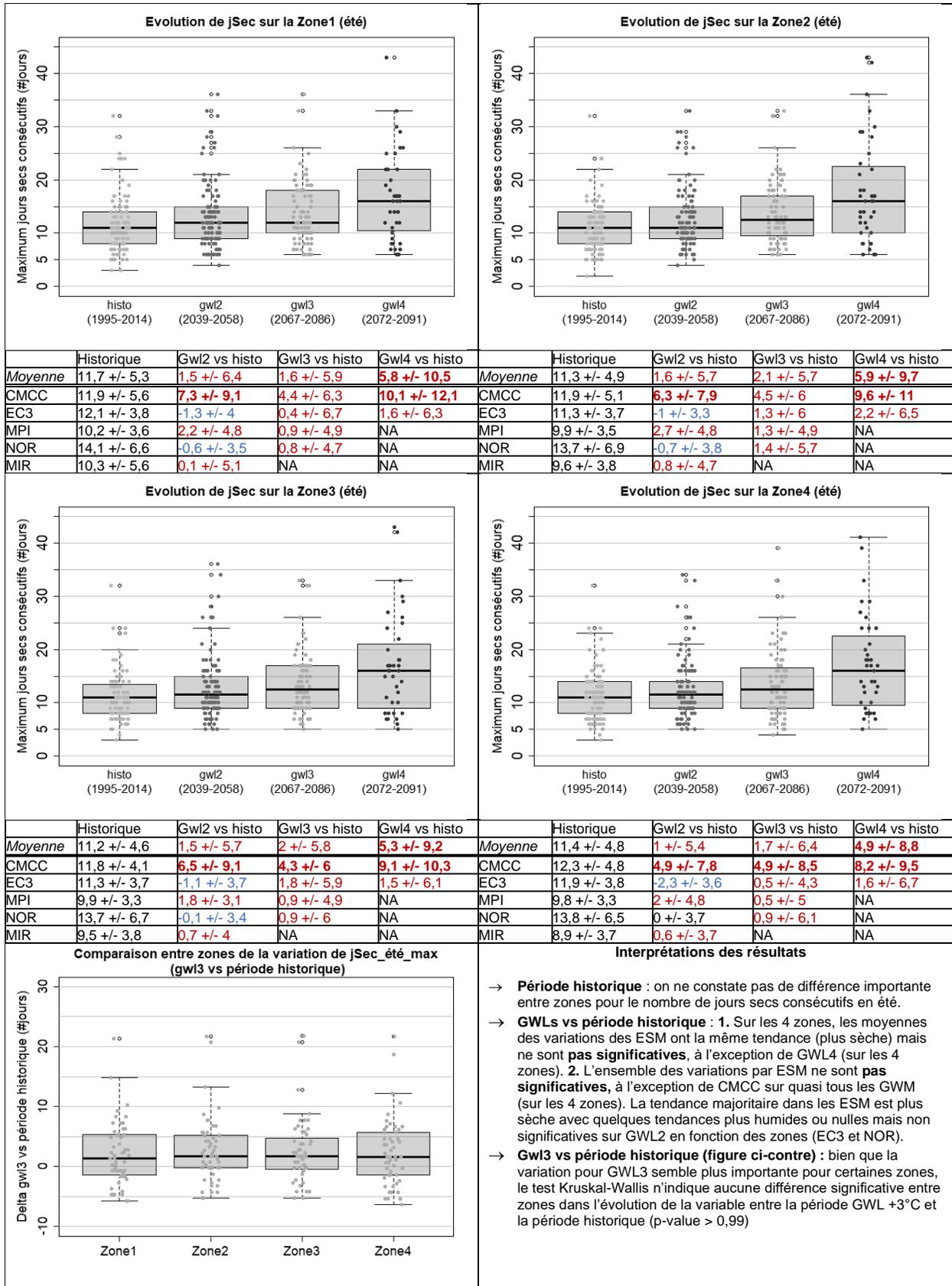
Analyse de l'évolution du cumul maximal sur 5 jours en automne



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

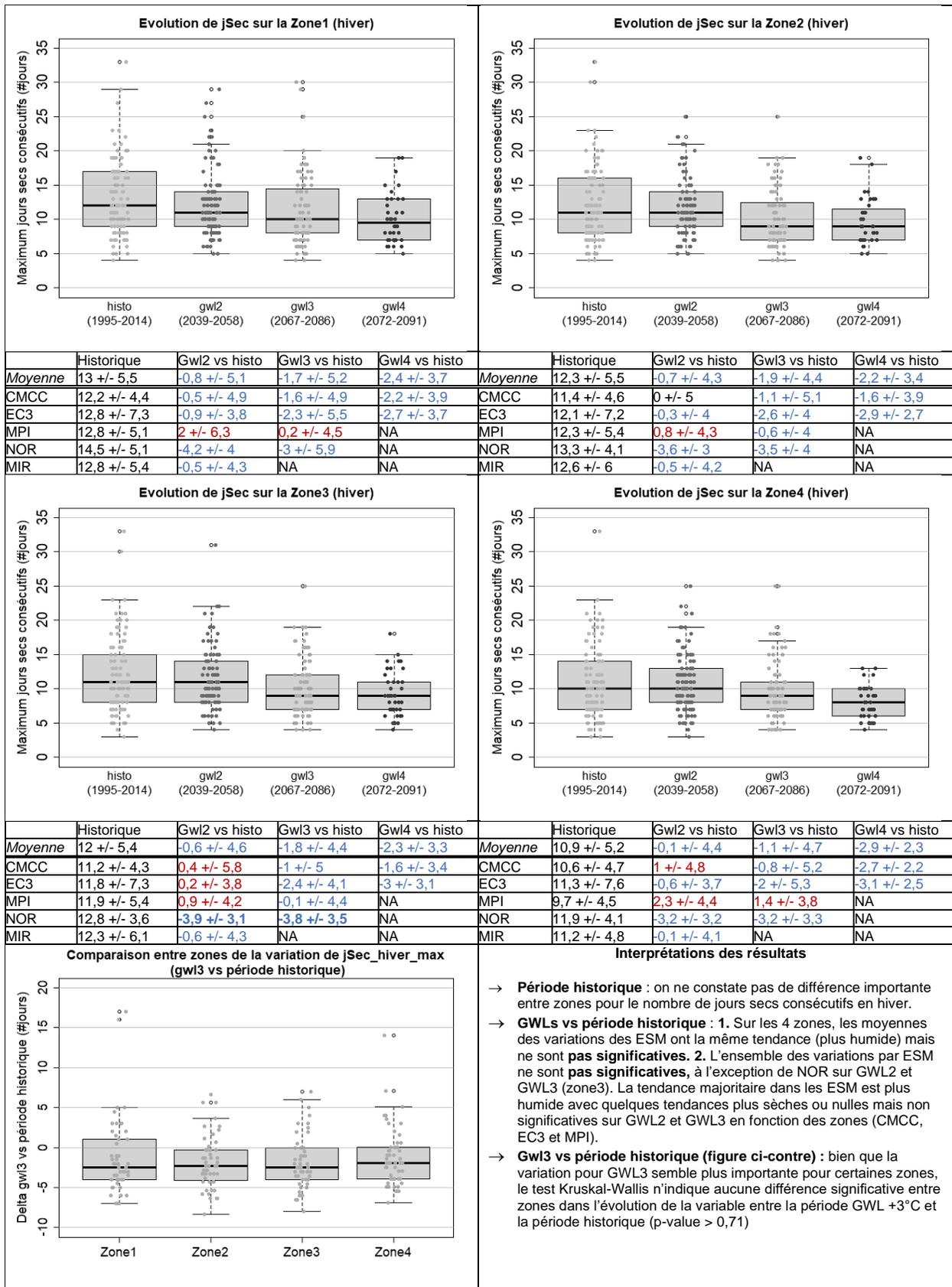
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs en été



Légende:

Valeur **significative** / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: **plus sec** / **plus humide**

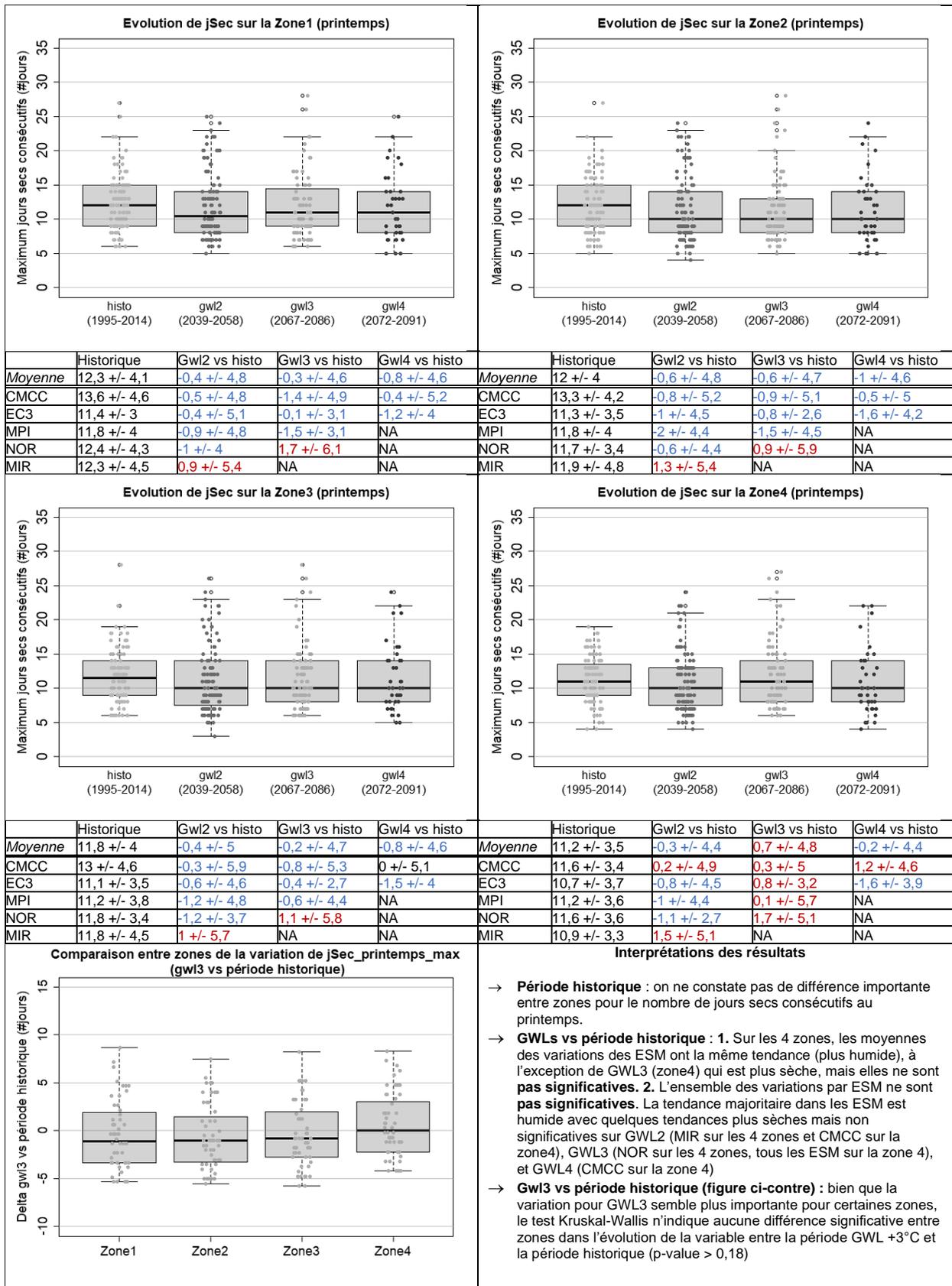
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs en hiver



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

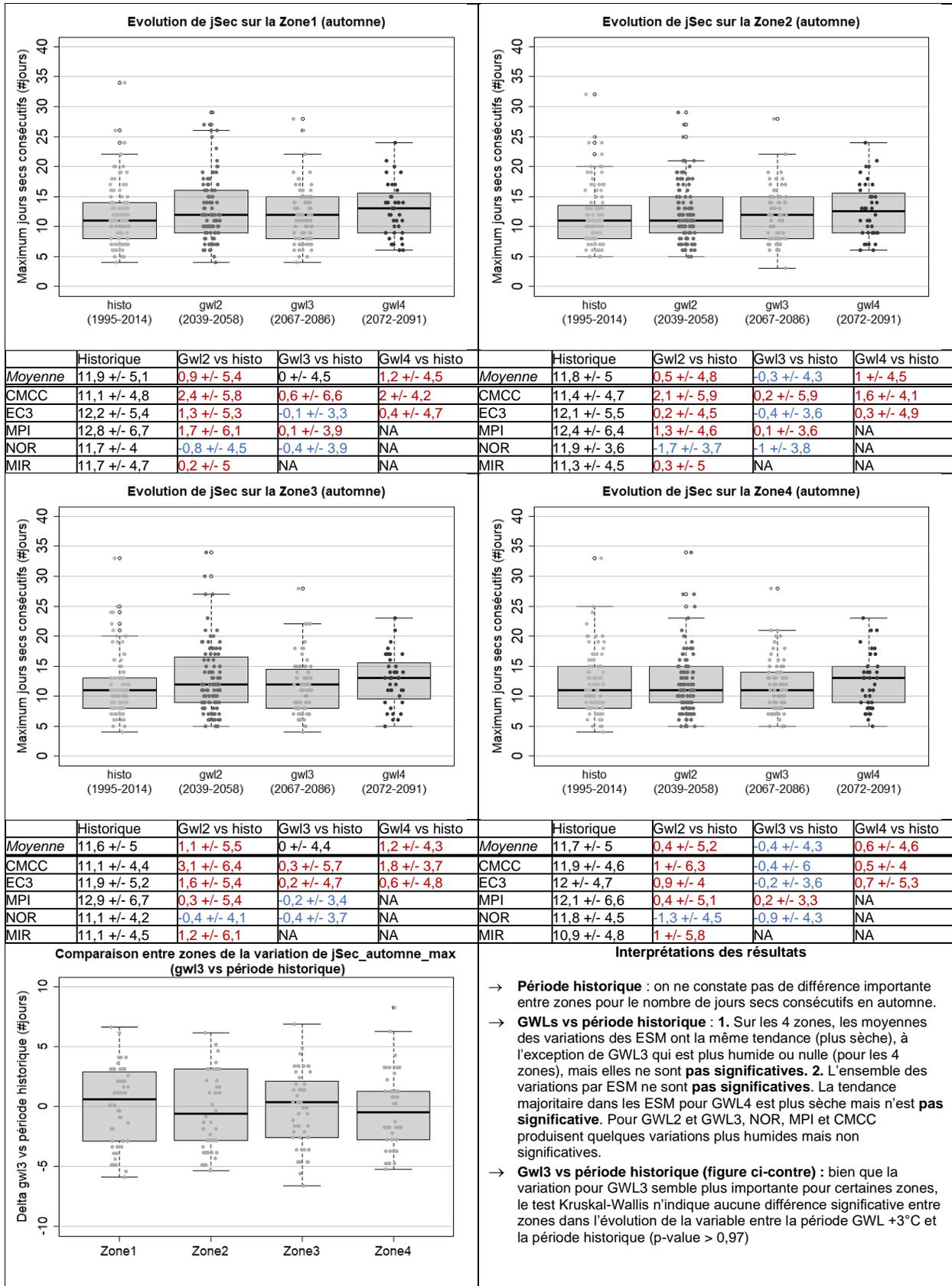
Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs au printemps



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide

Analyse de l'évolution du maximum de jours secs consécutifs en automne



Légende:

Valeur significative / Valeur non significative / Si tendances différentes entre ESM: plus sec / plus humide