



Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques

Agriculture

Indicateurs agronomiques de vulnérabilité

Partie grandes cultures

Rapport méthodologique



ICEDD



JETPACK.AI



Pouvoir adjudicateur :





Auteurs

Christophe Lacroix, Doctorant en plant sciences Gembloux Agro-Bio Tech ULiège – christophe.lacroix@uliege.be

Jérôme Bindelle, Professeur ordinaire à Gembloux Agro-Bio Tech ULiège axe animal sciences- Jerome.Bindelle@uliege.be

Benjamin Dumont, Professeur à Gembloux Agro-Bio Tech ULiège axe plant sciences – benjamin.dumont@uliege.be

Comité de relecture

Manu Harchies - mha@icedd.be

Personne de contact

Benjamin Dumont, Professeur à Gembloux Agro-Bio Tech ULiège axe plant sciences – benjamin.dumont@uliege.be

Comment citer ce rapport

Lacroix, C., Bindelle, J., Harchies, M., Dumont, B. (2025). *Risques climatiques en Wallonie. Indicateurs de rendements des grandes cultures face aux changements climatiques*. Service Public de Wallonie (SPW) - Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AWAC).

Photo de couverture : Jonas Jaeken from Unsplash

Gembloux, le 08/12/2024



Table des matières

1. Introduction.....	4
2. Résumé	4
3. Définition de l'indicateur et périmètre.....	4
4. Matériel et méthode	5
5. Résultats.....	13
6. Discussion.....	56
7. Annexes.....	61
8. Bibliographie :	61



1. Introduction

Ce rapport présente la méthodologie et les résultats d'indicateurs découlant de la modélisation des cultures agricoles et de prairies afin d'évaluer les risques climatiques en Wallonie pour l'agriculture.

2. Résumé

Afin d'évaluer les risques climatiques sur les principales productions végétales en Wallonie (cultures et prairies), un modèle de cultures (STICS) et un modèle prairie (GrassSim) ont été utilisés. Des itinéraires standards ont été développés pour les principales grandes cultures wallonnes (Froment, colza, pomme de terre, betterave, maïs) et pour la prairie. Les modèles ont été interfacés avec des bases de données « sol » à l'échelle wallonne. Des projections climatiques correspondant aux conditions historiques et à différents scénarios de projection ont été utilisées pour caractériser les effets du changement climatique sur les productions agricoles.

Les évolutions des niveaux de productions des différentes cultures par rapport à la période historique dépendent fortement et à la fois de la culture, du niveau de réchauffement global et du modèle climatique utilisé (CMCC, MIROC ou MPI). Sous +2°C, la majorité des cultures simulées prédisent une chute du niveau de production par rapport à la période de référence. Cela implique donc qu'à court terme, les productions agricoles risquent de chuter. Par contre sous un réchauffement global de +3 et +4°C, les modèles de cultures prédisent une augmentation du niveau de rendement. Cette augmentation est expliquée en partie par l'effet fertilisant du CO₂ (amélioration de l'efficience photosynthétique). Le maïs grain est la culture qui semble la plus négativement impactée par le réchauffement climatique tandis que la betterave est celle qui semble en bénéficier le plus positivement au niveau des rendements moyens. Toutefois la stabilité des rendements entre les années sera vraisemblablement fortement impactée par le réchauffement climatique. Toute une série de cultures telle que la betterave aura une variabilité de rendement beaucoup plus importante; signifiant que les rendements pourront être (bien) meilleurs comme très mauvais. Selon le modèle climatique et la culture, il pourrait arriver que sous certains scénarios les rendements en colza et en betteraves soient nuls. De plus, la réponse au sein de la Wallonie n'est pas identique selon les différentes régions agricoles, avec la région jurassique qui semble en règle générale la plus impactée négativement.

Concernant les prairies, la pousse de l'herbe aura tendance à augmenter avec le réchauffement climatique, mais avec, toutefois, un changement dans la dynamique de pousse de l'herbe. En effet, celle-ci aura une croissance plus importante au printemps et à l'automne. A contrario, la pousse de l'herbe sera fortement réduite durant la période estivale. De plus, la variabilité des niveaux de rendements interannuels aura tendance à augmenter; ce qui impliquera une nécessaire adaptation de gestion de l'affouragement par l'agriculteur au cours de l'année, mais aussi entre les années. La région ardennaise semble être la région qui bénéficiera le plus du réchauffement climatique concernant sa production d'herbe et qui aura la plus forte stabilité en comparaison des autres régions.

Finalement, ce travail est le premier discutant sur base de données chiffrées, et selon des projections spatiales explicites à l'échelle wallonne, de la vulnérabilité des grandes productions (cultures et prairie) . Celui-ci repose dès lors sur des hypothèses simplificatrices (travail à l'échelle annuelle vs. rotation culturelle, etc.) et sera inévitablement amené à évoluer par la suite avec les connaissances scientifiques futures.

3. Définition de l'indicateur et périmètre

Indicateur découlant de la modélisation de plantes



L'une des pistes majeures pour déterminer le degré de vulnérabilité au changement climatique d'une production végétale agricole (culture ou prairie), consiste à utiliser un modèle de culture (process-based modelling) . Ces modèles permettent, pour une combinaison donnée de sol, de conditions météorologiques et un itinéraire de gestion, , d'estimer de façon dynamique, à l'échelle d'une saison, la croissance d'une plante particulière et in fine sa production. C'est au départ de ces données, générée sous des conditions climatiques historiques et des futurs possibles, qu'il sera possible d'évaluer le degré de vulnérabilité des différentes productions végétales agricoles.

Du fait d'interactions complexes entre la génétique, l'environnement et les pratiques de gestion, les espèces cultivées ne réagiront toutefois pas toutes de la même façon, et ne réagiront pas toutes de façon similaires au gré des différentes saisons culturelles. A même itinéraire cultural, certaines cultures et ou années pourraient voir les rendements s'accroître, tandis que d'autres être caractérisées par des chutes de production, parfois drastiques. De ces modélisations, plusieurs indicateurs ont donc été calculés : le rendement (exprimé en T de MS/ha) et la stabilité. La stabilité est un indicateur calculé comme la moyenne divisée par l'écart-type et permettra de regarder à quel point le rendement varie selon les années et donc à quel point il varie selon les conditions climatiques. Une valeur proche de zéro signifie que la production est très instable, tandis qu'une valeur élevée signifie une très grande stabilité.

4. Matériel et méthode

Modélisation avec le modèle de culture STICS et le modèle prairie GrasSim

Afin de modéliser l'ensemble des différentes grandes cultures à la Région wallonne, le modèle de culture STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) a été utilisé. En effet, ce modèle de culture est réputé pour sa robustesse et sa capacité à modéliser un ensemble de cultures différentes dans des conditions pédoclimatiques variées (Brisson et al,2003, Coucheney et al, 2015). De plus, celui-ci a la particularité de prendre en compte l'effet fertilisant du CO₂, l'effet sur la diminution de la conductance stomatique ainsi que différents stress abiotiques tels que les stress par excès d'eau. Largement validé à l'échelle française et à l'international, cela en fait un modèle adapté pour étudier les effets du réchauffement climatique dans nos environnements

STICS est un modèle mécanistique (*process-based*) à pas de temps journalier. Pour tourner, ce modèle de culture a besoin de données d'entrées relatives :

- Au(x) sol(s),
- Au(x) climat(s),
- A la/Aux plante(s) étudiée(s),
- A l'/Aux itinéraire(s) technique(s),
- Aux conditions initiales

Avec l'ensemble de ces données d'entrées, le modèle STICS va simuler un ensemble de processus en interactions, principalement sur base de trois modules (croissance végétale, nutriments et balance hydrique) et va calculer un ensemble de variables de sortie tel que le rendement de la culture, différents stress cultureaux... (voir Figure 1).

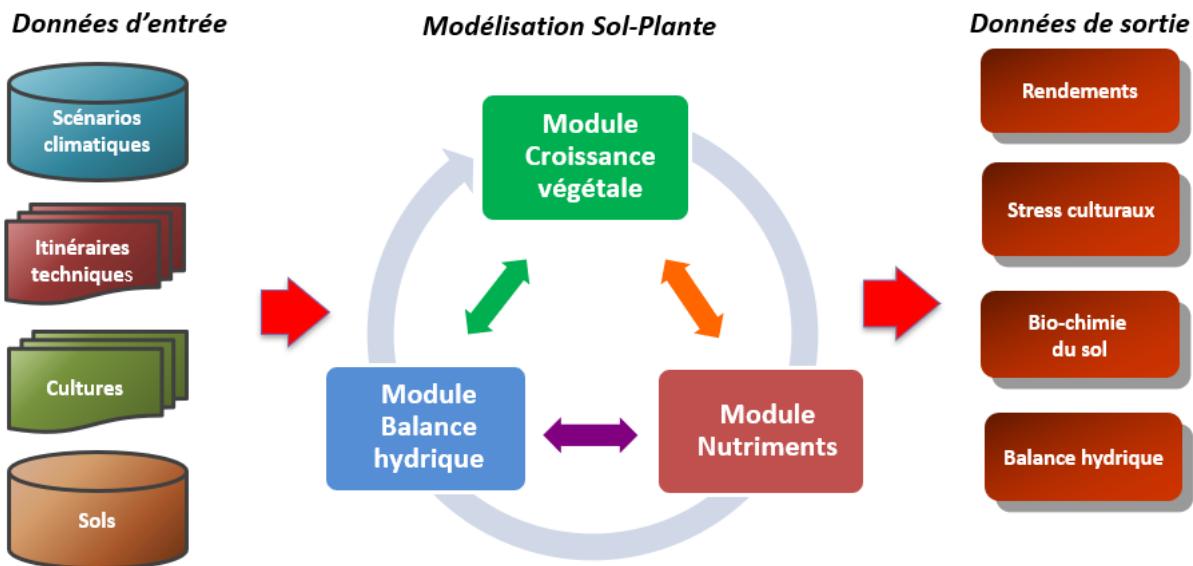


Figure 1: Schéma explicatif du modèle de culture STICS.

Le modèle de culture GrasSim a été utilisé pour simuler la croissance de l'herbe. GrasSim est un modèle permettant de prédire la dynamique quotidienne de la croissance des plantes en prairie (i.e ; la pousse de l'herbe) selon les conditions environnementales et la dynamique de l'eau et de l'azote dans le sol. Il permet de simuler la croissance de différentes espèces de graminées, selon une organisation en types fonctionnels(PFT), tels que le PFT A (ex : Lolium perenne) et le PFT B (ex : Dactylis glomerata). Le modèle intègre des données climatiques, la gestion de la fertilisation, les caractéristiques du sol et la fréquence de coupes comme principaux paramètres d'entrée (Kokah et al., 2023). GrasSim se distingue par sa simplicité et son efficacité, ce qui en fait une base prometteuse pour le développement d'outils d'aide à la décision pour une gestion durable et optimisée des prairies permanentes. De plus ce modèle prend en compte l'effet fertilisant du CO₂. Le schéma de fonctionnement de GrasSim est présenté à la Figure 2.

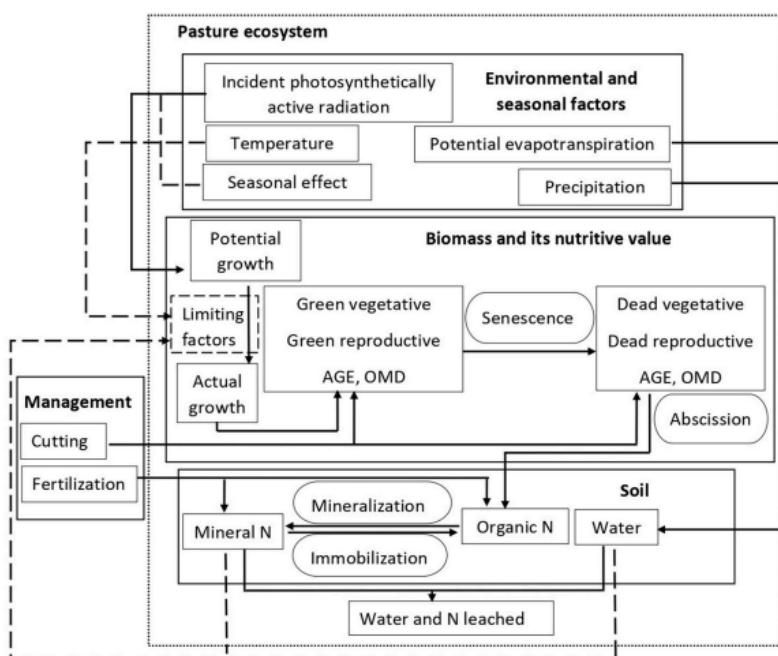




Figure 2: Structure du modèle GrassSim (Kokah et al., 2023)

Données climatiques

Le modèle de culture STICS a besoin d'un ensemble de données climatiques journalières. Celles-ci sont constituées de différentes variables climatiques telles que :

- Les températures minimale et maximale,
- Les quantités de précipitations,
- La radiation solaire,
- La vitesse du vent,
- L'humidité relative ou la pression de vapeur,
- La concentration en CO₂ (ici moyennée sur la période du scénario climatique).

L'ensemble de ces variables climatiques ont été fournies par les équipes en charge du volet 2 (cfr. Rapport Volet 2 – projections climatiques). La résolution des données climatiques fournie est de 5km*5km.

Comme pour les autres volets, différents scénarios climatiques ont été simulés sur base du modèle régional MARv3.14, en se concentrant sur des niveaux de réchauffement global moyen de +2, +3 et +4°C. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur trois modèles climatiques différents (CMCC-CM2-SR5, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR). Ces modèles ont été sélectionnés pour tester différents futurs possibles contrastés : le CMCC offre une tendance à des projections climatiques plus sèche, le MPI est connu pour être un modèle « moyen » et MIROC pour sa capacité à bien rendre compte des extrêmes. Ce choix a été réalisé en concertation avec les différentes équipes en charge de l'étude. Pour la période de référence, le modèle historique ERA5 a été utilisé.

Concernant les plages temporelles couvertes, les données historiques sont prises sur la période 1980-2010 tandis que les scénarios futurs couvrent la période de 2015 à 2100. Les scénarios climatiques étudiés pour les futurs à +2 et à +3°C couvrent 30 années climatiques dans cette période, tandis que les scénarios à +4°C n'en couvrent 20. Les années considérées pour atteindre un même réchauffement moyen donné ne sont pas identiques selon le modèle climatique ; elles ne sont donc pas caractérisées par la même concentration en CO₂ dans l'atmosphère (cfr. Rapport Volet 2 – projections climatiques). Les valeurs de CO₂ par modèle climatique et utilisée dans les modèle culture et prairie sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1: Niveau de concentration en CO₂ dans l'atmosphère exprimé en ppm pour les différents scénarios de réchauffement globaux et les différents modèles pour leurs années respectives.

		Scenario		
GCM		+2°C	+3°C	+4°C
CMCC	Années	2024-53	2048-2077	2060-2079
	[CO ₂]	429	605	741
MPI	Années	2030-65	2066-2095	2081-2100
	[CO ₂]	545	722	1005
MIR	Années	2045-74	2071-2100	2081-2100
	[CO ₂]	592	757	1005

Initialisation du modèle STICS

À chaque simulation réalisée avec le modèle STICS, certaines variables relatives à la teneur en eau et en azote du sol doivent être initialisées.

- Concernant le profil en eau, celui-ci a été initialisé à la capacité au champ. Cette donnée est donc propre à chaque sol.
- Concernant le profil en azote, un profil standard basé sur les valeurs historiques du réseau Requasud (Livre blanc des céréales) a utilisé et réparti parmi les horizons de sol comme représenté sur la Figure 3.

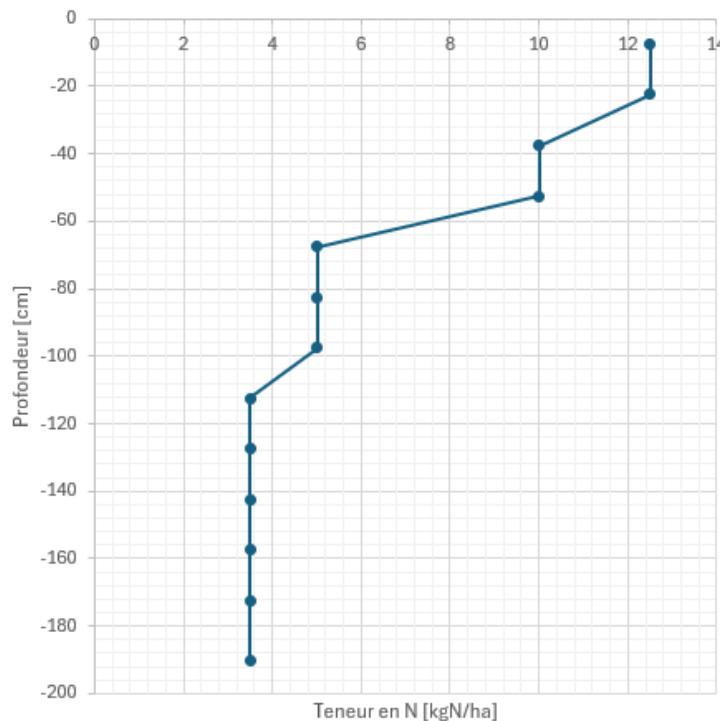


Figure 3: Teneur en azote du sol (kg/ha) en fonction de la profondeur (cm).

Fichier plante

Les grandes cultures simulées sont le froment d'hiver, le colza, la betterave, la pomme de terre et le maïs. Les fichiers « plante » à introduire dans STICS sont un ensemble de paramètres permettant de fixer les caractéristiques de l'espèce et éventuellement de la variété, pour simuler la croissance et le fonctionnement de la plante. Un paramétrage avec des données réelles doit être réalisé. Ce paramétrage a été réalisé sur base de données historiques disponibles à la faculté de Gembloux-Agro-Bio Tech-ULiège. Les données de paramétrisation sont basées sur les travaux de Delandmeter et al. (2023, 2024). Ceux-ci sont basés sur différents essais longue durée, tel que l'essai SOLRESIDU situé à Gembloux et le site iCOS à Lonzée. La paramétrisation utilisée pour la Wallonie a donc été réalisée sur des données provenant de la région de Hesbaye, aux alentours de Gembloux. Concernant le froment d'hiver, le fichier plante est basé sur le fichier plante tel que paramétrisé dans de la thèse d'Arthur Lenoir (2024). Concernant les prairies, celles-ci ont été considérées comme composées uniquement de ray gras anglais.

Itinéraire technique

Un itinéraire technique dit “standard” a été réalisé pour chacune des cultures simulées (froment, pomme de terre, colza, maïs grain, betterave). L’itinéraire technique est identique pour l’ensemble des scénarios climatiques et est basé sur les pratiques conventionnelles actuelles en Wallonie. Ces cultures

ont été choisies, car elles font partie des cultures principales que l'on retrouve sur le territoire wallon (Statbel 2023).

L'ensemble des opérations culturales par culture sont présentées dans le Tableau 2. La culture de colza a reçu une irrigation de 10 mm au semis. Cette irrigation qui n'est pas pratiquée par les agriculteurs permet de compenser le fait qu'il n'est pas possible de moduler la date de semis selon les pluies. En effet, le colza étant une petite graine, il faut des conditions humides pour avoir une bonne levée. L'agriculteur adapte donc la date de semis pour semer après une pluie. L'irrigation de 10mm permet la germination et le début du développement de la plantule. Par contre, si la période est totalement sèche, une mortalité peut quand même subvenir ; ce qui, dans l'avenir, correspondrait à une situation non propice pour semer le colza.

Tableau 2: itinéraires techniques des différentes cultures modélisées via STICS.

	Froment	Colza	Pomme de terre	Betterave	Maïs
Date d'implantation	24 octobre	21 août	30 avril	1 avril	30 avril
Profondeur de semis	2,5 cm	1,5 cm	3 cm	2 cm	4 cm
Densité de semis	300 grains/m ²	40grains/m ²	4 plants/m ²	10 grains/m ²	10 grains/m ²
Dose d'engrais azoté	3x60	2x100	220	150	180
Date de récolte	Maturité physiologique	25 juillet	22 septembre	5 octobre	11 novembre

Concernant l'itinéraire technique pour les prairies, le choix de l'itinéraire technique s'est fait en deux phases. Tout d'abord, une comparaison de différents itinéraires techniques a été réalisée en évaluant le rendement moyen de chaque option sur la base des données climatiques historiques (1980 à 2010), et en les confrontant aux rendements observés sur la même période, à l'échelle de la Wallonie puis au niveau des régions agricoles spécifiques. Ensuite, les résultats obtenus ont été discutés avec un expert, permettant de retenir un seul itinéraire technique pour l'ensemble des simulations.

GrasSim n'étant pas encore configuré pour intégrer la composante animale, il simule le pâturage à travers des coupes planifiées à des dates spécifiques. Les simulations basées sur les données climatiques historiques ont exploré quatre fréquences de pâturages différentes : tous les 10 jours, 14 jours, 21 jours et 30 jours. Les simulations n'incluaient pas de fertilisation externe, hormis la restitution d'une partie de l'azote contenu dans la biomasse exportée à travers les déjections.

Sur base du précalibrage et de l'avis d'expert, une fréquence de coupe de 14 jours au printemps et d'une fois par mois pour l'été et l'automne a été choisie. Dix fauches sont réalisées au total réparties en 5 fauches de printemps, 3 d'été et 2 d'automne. La période de pâturage simulée s'étendait du 15 avril au 31 octobre.

Donnée sol

En collaboration avec le projet NAPERDIV (<https://www.biodiversa.eu/2022/10/26/naperdiv/>), une base de données sol a été réalisée.

Les données ont été téléchargées de la base de données sol ISRIC (<https://soilgrids.org/>) à la résolution 250m*250m. De plus, cette base de données a été complétée par la carte de carbone organique total provenant du service public wallon disponible sur le Géoportail (carte CABRIOSOL). Enfin, la teneur en CaCO₃ provient de *European Soil Data Centre* (ESDAC-<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/> - Fernandez-Ugalde et al. ,2022).

La base de données a été consolidée à une résolution de 250m*250m et remis dans un système de coordonnées unique. Elle a ensuite été formatée pour pouvoir s'adapter au format d'entrée du modèle :

- Certaines couches de sol standardisées ont été agrégées afin d'obtenir des données sol réparties en cinq couches (0-15, 15-30, 30-60, 60-100, 100-200cm)
- D'autres données d'entrées de sol ont été calculées par fonction de pédotransfer à l'aide du package eupft2.0 (<https://gmd.copernicus.org/articles/14/151/2021/>) via R.

Les affleurements de roche mère n'étant pas disponible dans les Bases de données utilisées, les simulations ont été conduites avec une profondeur de sol arable maximale de 200 cm sur l'ensemble du territoire wallon simulé. Les simulations sont donc contraintes uniquement par les profondeurs d'enracinement.

Spatialisation du modèle de culture

Les modélisations sont réalisées individuellement pour une combinaison unique de sol et de climat. La spatialisation d'un modèle permet de mettre en avant la variabilité spatiale existante au sein d'une zone géographique définie (Launay & Guerif, 2005). Le nombre de simulations du modèle sur le territoire wallon est donc égale à celui conditionné par la résolution de données la plus faible.

Afin de réduire au maximum le nombre de simulations (et donc le temps de calcul), les sols ont été divisés selon leurs occupations des sols (terres de grandes cultures et prairies). La division est basée sur l'occupation des sols provenant de la base de données ISRIC (<https://soilgrids.org/>).

Ensuite, pour chacune des mailles climatiques, une phase de *clusterisation* des pixels de sol a été réalisée, afin de regrouper ceux-ci selon leur degré de similitude. Cette phase permet de diminuer le nombre de simulations, en ayant des sols présentant des fonctionnement homogènes, tout en gardant une résolution assez fine. Ce clustering a été réalisé de manière non supervisée avec la méthode de type X-means (Pelleg & Moore, 2002). Cette phase de clustering est illustrée sur la Figure 4. Une fois le cluster réalisé, chacun des paramètres de sol a été recalculé comme la moyenne des paramètres de l'ensemble des différents sols composant le cluster.

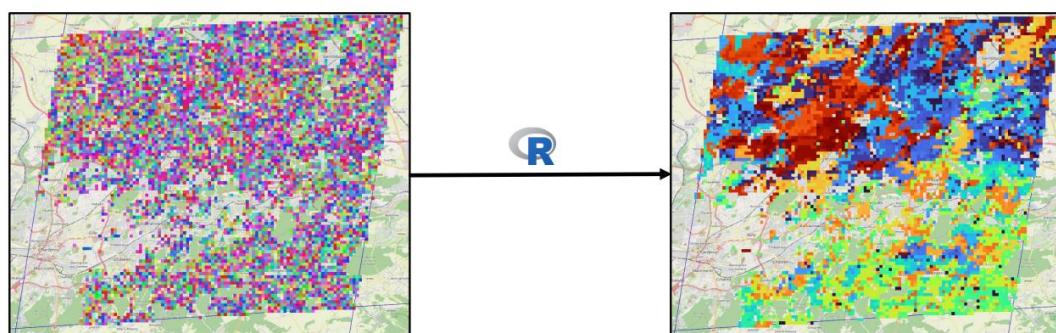


Figure 4: Principe de clusterisation des pixels sol par la méthode non supervisée de type X-means. Figure réalisée par Aubry Pierre.

Variables de sortie

Les variables de sortie telles que la biomasse à différents stades de croissance, la LAI, le rendement et différents stress relatifs au développement de la culture ont été récoltées par stade. L'ensemble des données de sortie sont présentées dans le Tableau 3. Les méthodes de calculs des variables de sortie sont quant à elles disponibles dans le Tableau 4. Les données de stress sont extraites comme un cumul de valeurs de stress pendant une phase de croissance de la culture afin d'obtenir une quantification du stress sur la période d'intérêt (Tableau 4 et Figure 5).

Les données de développement ont permis sur la période historique de vérifier que la paramétrisation était bien effectuée en les comparant avec des données historiques. Les données de stress sont utilisées

pour évaluer de quelle manière ceux-ci vont évoluer avec le changement climatique mais permettent aussi d'interpréter les résultats de rendement des cultures. Cette interprétation a été conduite en réalisant une analyse en composante principale (ACP) sur les variables de stress. L'ACP permet de représenter la variabilité du jeu de données sur des composantes, les premières étant celles contenant la plus grande variabilité du jeu de données. Cela permet ainsi de comprendre comment est driver le jeu de données selon un ensemble de variables explicatives (dans ce cas si, les variables de stress.). Une fois les dimensions de l'ACP créée, des variables quantitatives supplémentaire (c.-à-d. après la création des différentes dimensions sur bases des variables de stress) les variables relatives aux rendements des cultures.

Enfin la stabilité de la productivité (moyenne/écart-type) a été calculée sur base de la définition d'Isabell et al. (2015) afin de visualiser la variabilité de la production entre les années culturales. Plus la stabilité est grande, plus le rendement est stable entre les années et plus la stabilité est proche de zéro, plus le rendement est instable. De plus, des différences absolues et relatives (par rapport à l'historique) ont été calculées à la fois sur base des rendements que de la stabilité de productivité.

Tableau 3: Variables de sorties du modèle STICS (Muller, 2024 adapté de Beaudoin et al., 2023)

Notation STICS	Variable étudiée	Unité
lai(n)	Indice de surface foliaire	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$
masec(n)	Biomasse de la plante aérienne	$\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$
mafruit	Biomasse des organes récoltés	$\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$
chargefruit	Nombre de grains remplis ou de fruits mûrs	m^{-2}
cumET0	Évapotranspiration maximale cumulée au cours de la saison (eop+eos)	mm
ces	Évaporation cumulée au cours de la saison de culture	mm
cep	Transpiration cumulée au cours de la saison de culture	mm
cpluie	Quantité cumulée de pluie sur la période de simulation	mm
resmes	quantité d'eau du sol intégré sur la profondeur de mesure	mm
ilevs	Date d'émergence	jours julien
iamfs	Date du stade amf	jours julien
ilaxs	Date de sénescence	jours julien
iflos	Date de floraison	jours julien
imats	Date de la maturité physiologique	jours julien
turfac	Indice de stress hydrique de la turgescence	0-1
swfac	Indice de stress hydrique stomatique	0-1
exolai	Facteur de réduction de la croissance des feuilles dû à l'excès d'eau	0-1
exobiom	Facteur de réduction de la croissance de la biomasse dû à l'excès d'eau	0-1
inns	Facteur de réduction de la croissance de la biomasse dû à la NNI (carence en azote)	innmin to 1
ftemp	Facteur de réduction de l'efficacité d'utilisation du rayonnement lié à la température	0-1

Tableau 4: Tableau des méthodes de calcul des variables de sortie de STICS. La signification des noms des variables de sortie de STICS est disponible dans le Tableau 3 (Muller, 2024).

Notation STICS	Valeur maximale saison	Valeur moyenne entre stades	Valeur cumulée entre stades	Valeur en sortie d'hiver	Valeur à floraison	Valeur Post-récolte	Valeur unique
lai(n)	■	-	-	-	-	-	-
masec(n)	■	-	-	-	■	-	-
mafruit	■	-	-	-	-	-	-
chargefruit	■	-	-	-	-	-	-
cumET0	-	-	-	-	-	■	-
ces	-	-	-	-	-	■	-
cep	-	-	-	-	-	■	-
cpluie	-	-	-	-	-	■	-
resmes	-	-	-	-	-	■	-
ilevs	-	-	-	-	-	-	■
iamfs	-	-	-	-	-	-	■
ilaxs	-	-	-	-	-	-	■
iflos	-	-	-	-	-	-	■
imats	-	-	-	-	-	-	■
turfac	-	-	■	-	-	-	-
swfac	-	-	■	-	-	-	-
exolai	-	-	■	-	-	-	-
exobiom	-	-	■	-	-	-	-
inns	-	-	■	-	-	-	-
ftemp	-	-	■	-	-	-	-

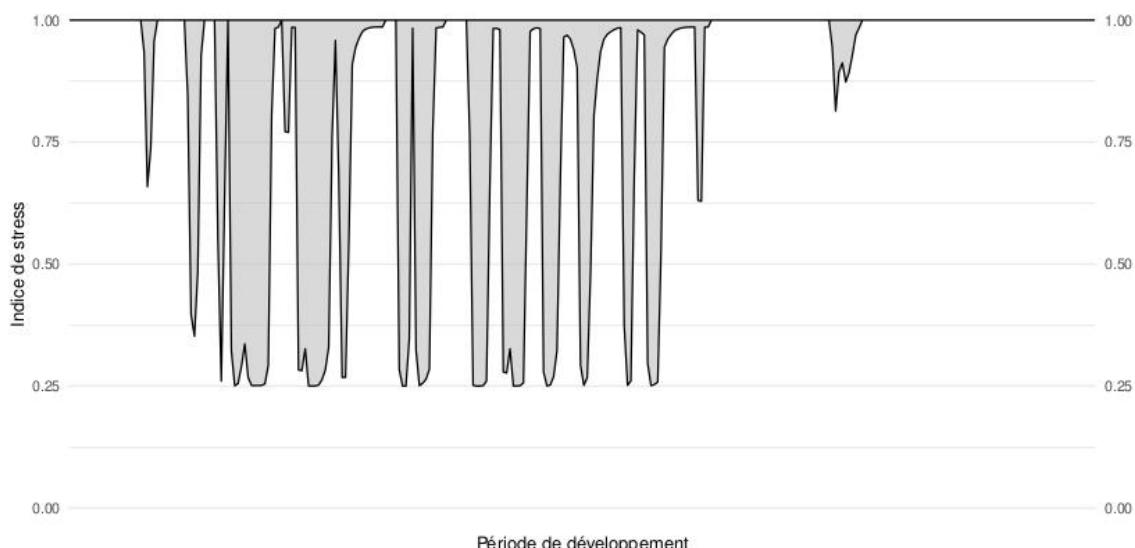


Figure 5: Illustration de la méthode de quantification du stress sur une période précise. Celle-ci correspond à l'aire sous la courbe du stress. Une valeur de 1 signifie l'absence de stress et une valeur de 0 correspond à un niveau de stress maximum. (Muller, 2024)

Les résultats de la pousse de l'herbe ont été séparés en période de croissance (printemps, été et automne). Cependant, uniquement les données de rendements sont disponibles à travers le modèle GrassSim.

5. Résultats

Culture d'hiver

Froment d'hiver Rendement

La répartition spatiale du rendement médian historique de la culture de froment d'hiver est présentée sur la Figure 6.



Figure 6: Rendement spatial médian exprimé en T MS/ha de la période historique pour la culture de froment d'hiver.

Les niveaux de rendement répartis sur l'ensemble de la Wallonie sont présentés sur la Figure 6 et exprimés en différence relative par rapport à l'historique sur la Figure 7.

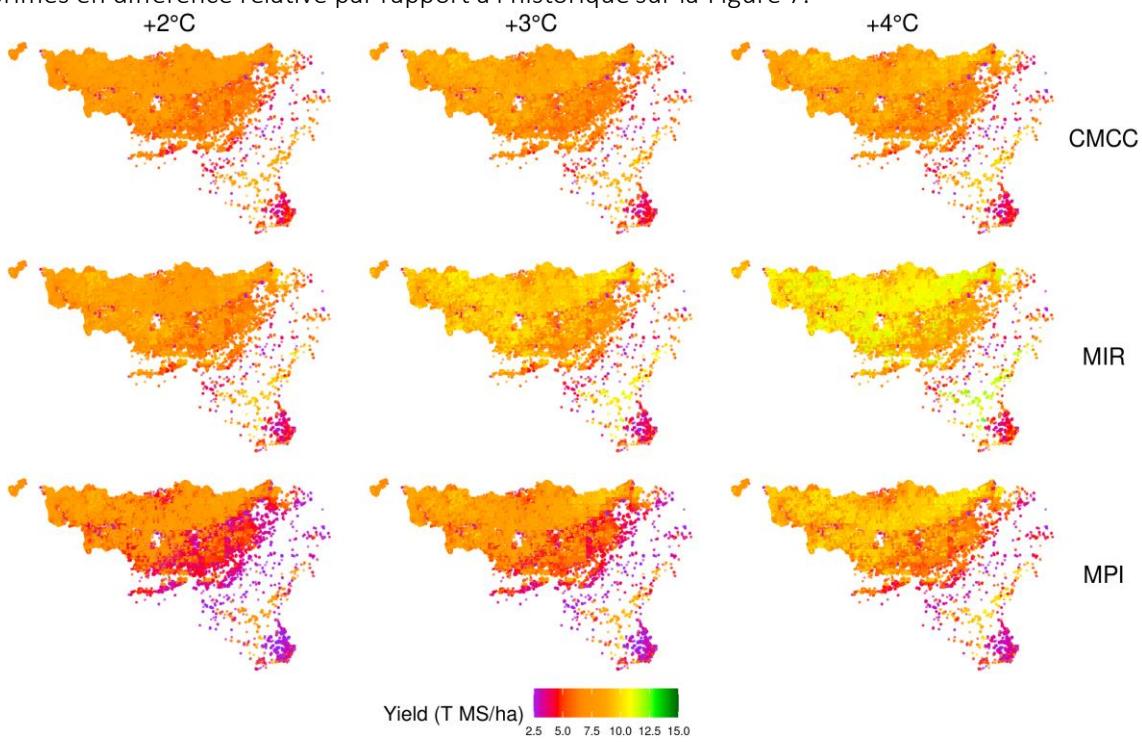


Figure 7: Rendement spatial médian du froment d'hiver exprimé en T MS/ha pour les différents scénarios globaux de changement climatique et différents modèles de prédictions.

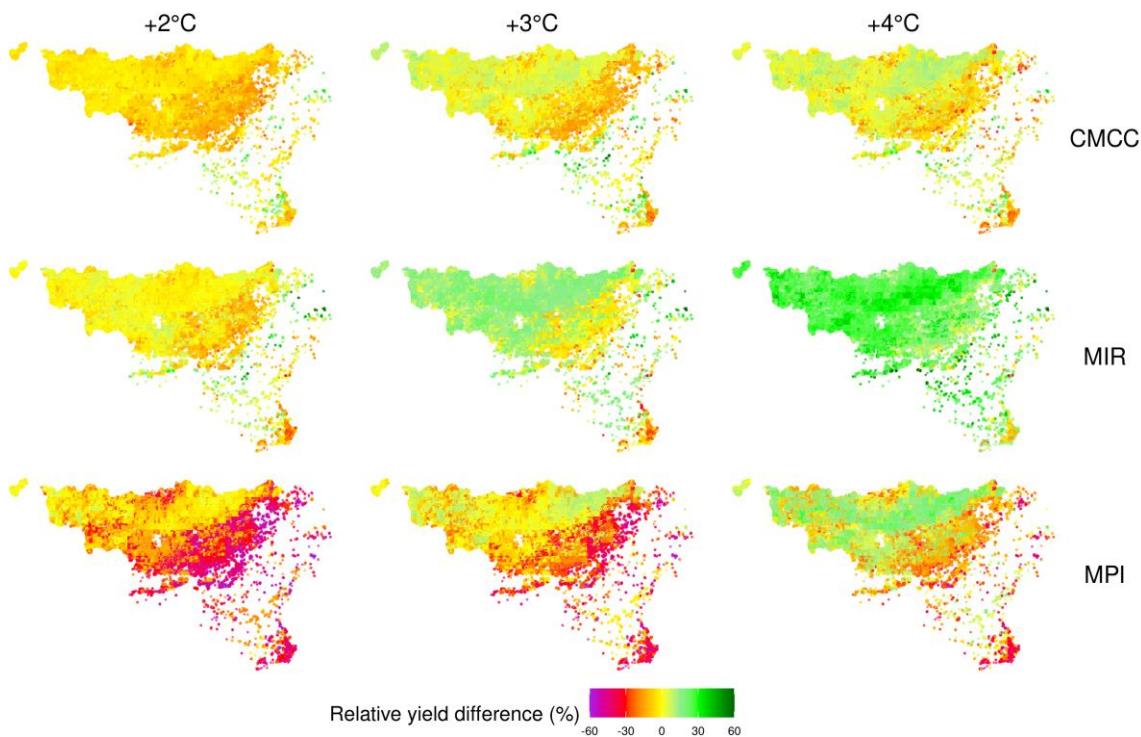


Figure 8: Cartes des différences de rendement relatif du froment d'hiver exprimé en pourcentage pour les différents scénarios globaux de changement climatique et différents modèles de prédictions en fonction de la période historique.

Les différents niveaux de rendements selon les scénarios de réchauffements globaux et les modèles climatiques sont représentés sur la Figure 9. Le scénario à +2°C entraîne une diminution de la médiane des rendements en comparaison au scénario historique (entre -1,2 et -12,4% selon les modèles). À +3°C, le modèle CMCC a la médiane des rendements quasi identique à l'historique, le modèle MIROC prédit une augmentation des niveaux médians de rendement à hauteur de 11,3% tandis que le modèle MPI estime une diminution des rendements médians de -4,4% par rapport à la période de référence. Cependant à +4°C, l'ensemble des modèles prédit une augmentation de rendement avec des niveaux similaires pour le modèle CMCC et MPI (respectivement 2,2 et 3%) et beaucoup plus importants pour le modèle MIROC (+25,1%).

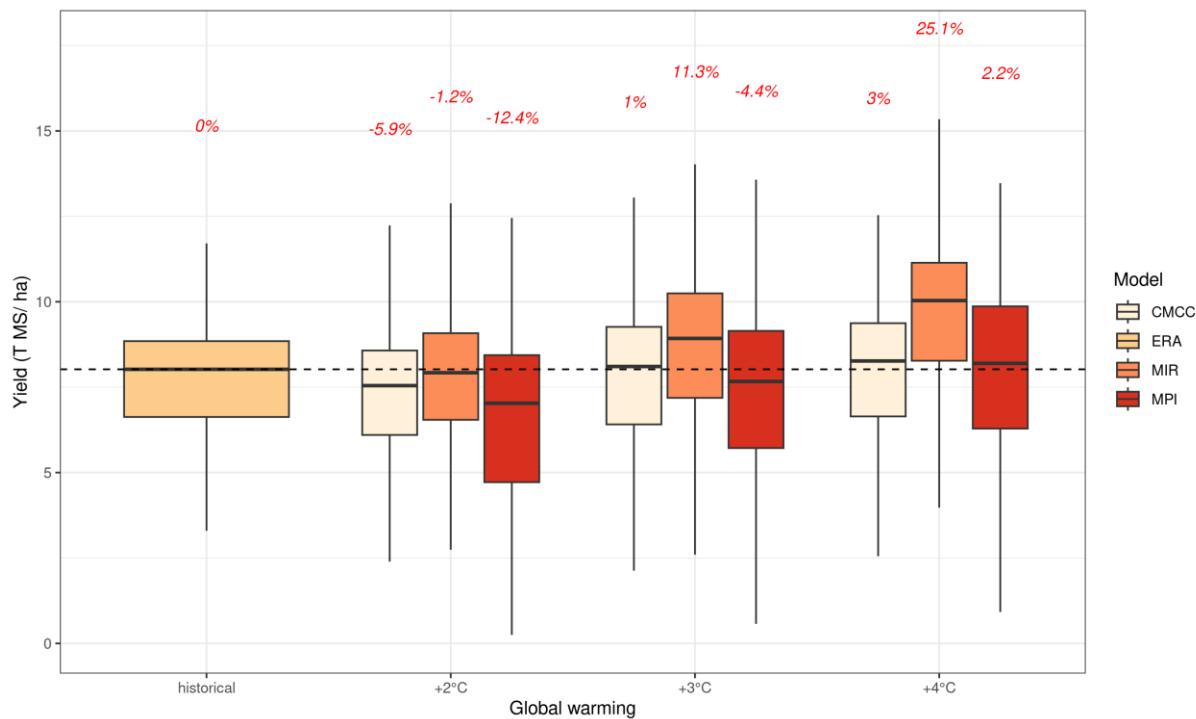


Figure 9: Boxplot du rendement en blé exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Les pourcentages en rouge expriment la différence de pourcentages entre la médiane de la période historique et la modalité du scénario climatique.

Disparité régionale

Les différents niveaux de rendements pour les principales régions agricoles wallonnes (Une carte des régions agricoles est présente en Annexe 1) selon les scénarios de réchauffements globaux et les modèles climatiques sont représentés sur la Figure 10. Chaque région agricole n'a pas la même réponse face aux changements climatiques comme illustrés par les différentes figures (Figure 7 , Figure 8 et Figure 10). Les régions limoneuse et sablolimoneuse ont une tendance assez proche de la tendance moyenne (Figure 9). Par contre, la région jurassique semble être fortement impactée par le réchauffement climatique avec des pertes de rendements médians entre 14,8 et 46,3% tous modèles et niveaux de réchauffement global confondus.

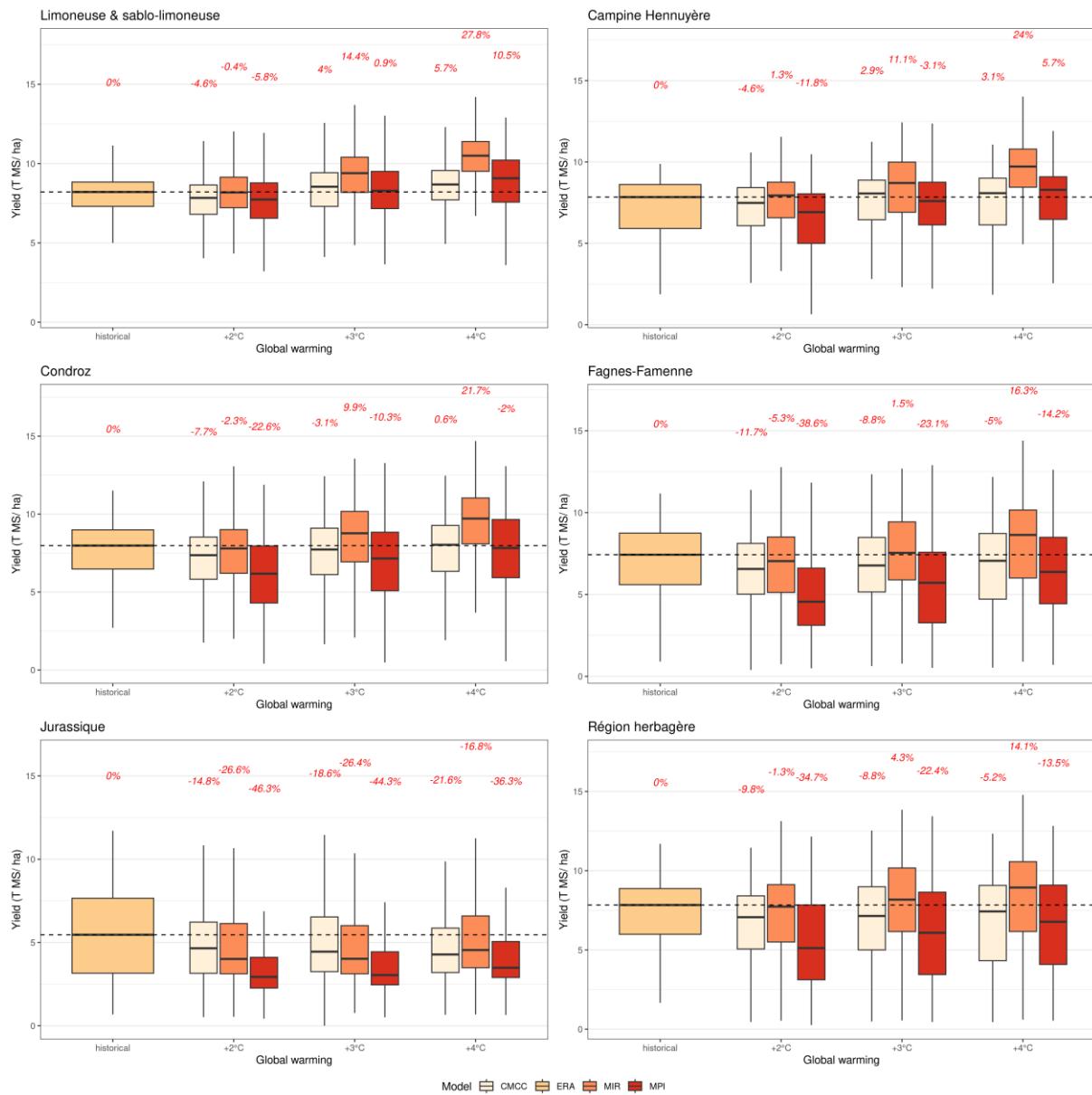


Figure 10: Boxplot du rendement en blé pour les principales régions agricoles de Wallonie exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Les pourcentages en rouge expriment les différences de pourcentages entre la médiane de la période historique et la modalité du scénario climatique

Stabilité

La stabilité des rendements entre les années de la période historique a tendance à être plus élevée dans la région de Hesbaye tandis qu'elle est fort variable entre les sols du Condroz et de la Fagne Famenne. La région jurassique (Lorraine belge) a une stabilité à l'origine déjà faible; ce qui implique une grande variabilité des niveaux de rendements selon les conditions climatiques dans cette région (Figure 11). La différence de stabilité par rapport à la période historique dépend fortement du modèle ainsi que du niveau de réchauffement global. La plus grande chute de stabilité est présente sous le modèle MPI tandis que les zones avec le plus grand gain de stabilité du rendement sont sous le modèle MIROC en +4°C. Malgré ces grandes tendances, une grande variabilité de réponses de la stabilité entre les sols de la Wallonie est observée (Figure 12), montrant une réponse non homogène au sein de la Wallonie au changement climatique.

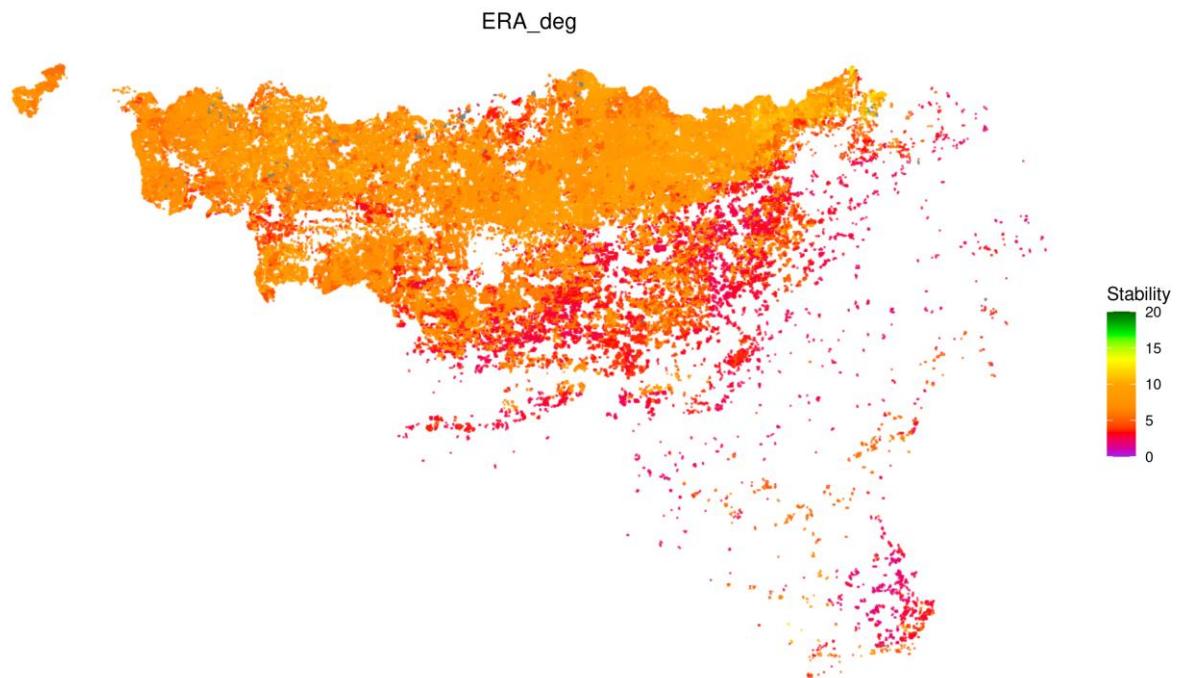


Figure 11 Carte de la stabilité des rendements de froment d'hiver entre les années de la période historique.

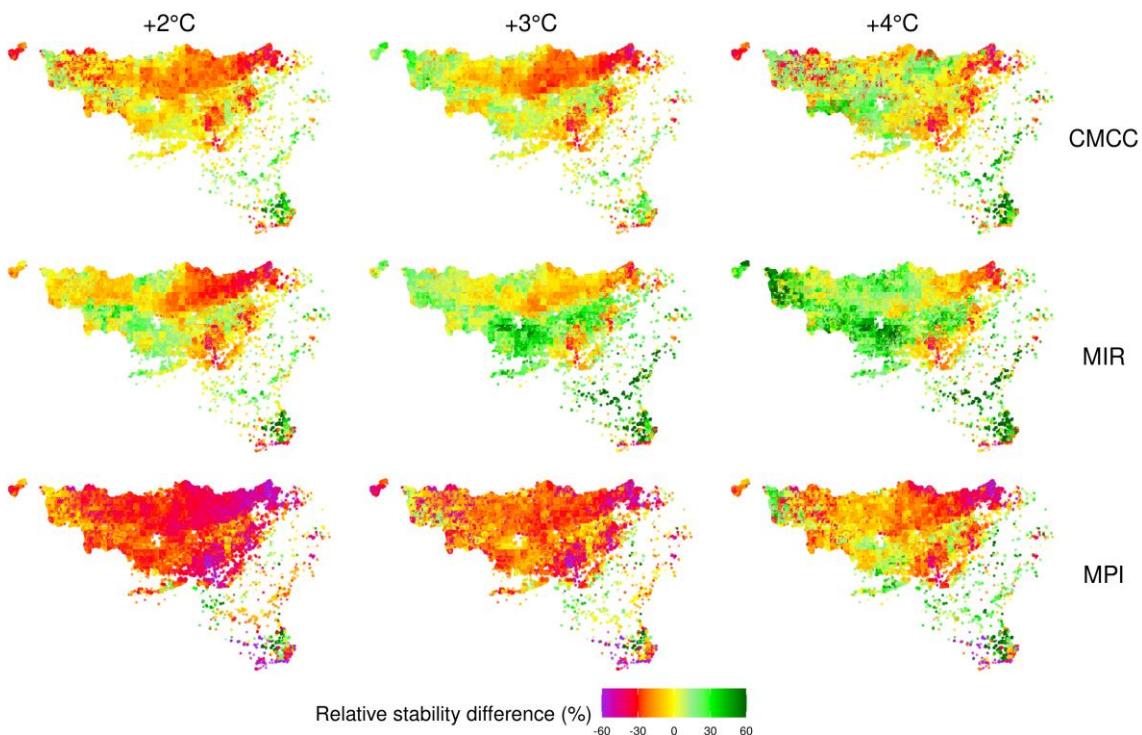


Figure 12 Cartes des différences relatives du niveau de stabilité entre la période de référence (1980-2010) et les scénarios futurs. Toutes valeurs inférieures à -60% sont en mauve tandis que toutes valeurs supérieures à 60% sont en vert foncé.

Stress sur la culture

Les relations entre les scénarios climatiques et les différents stress de la culture du froment sont représentés sur la Figure 13 à travers les deux premières dimensions de l'analyse principale. Les

variables relatives aux stress par excès d'eau à la phase reproductive et végétative pointent dans la direction opposée des variables liée au rendement. Cela signifie que lorsqu'il y a des stress par excès d'eau durant la phase végétative, la plante de blé est fortement impactée et les rendements seront faibles. Par contre, les stress par déficit hydrique ont tendance à pointer dans le même sens que les niveaux de rendement. Ces variables n'entraînent donc pas de pertes de rendements. Les années sèches ont tendance à avoir un meilleur niveau de rendement que les années humides. Le déplacement des centroïdes des différents modèles de gauche à droite selon l'axe des x indique que les modèles futurs auront plus de stress lors de la phase végétative par excès d'eau que dans la période historique. Le modèle MPI sous +4°C est celui qui en engendre le plus.

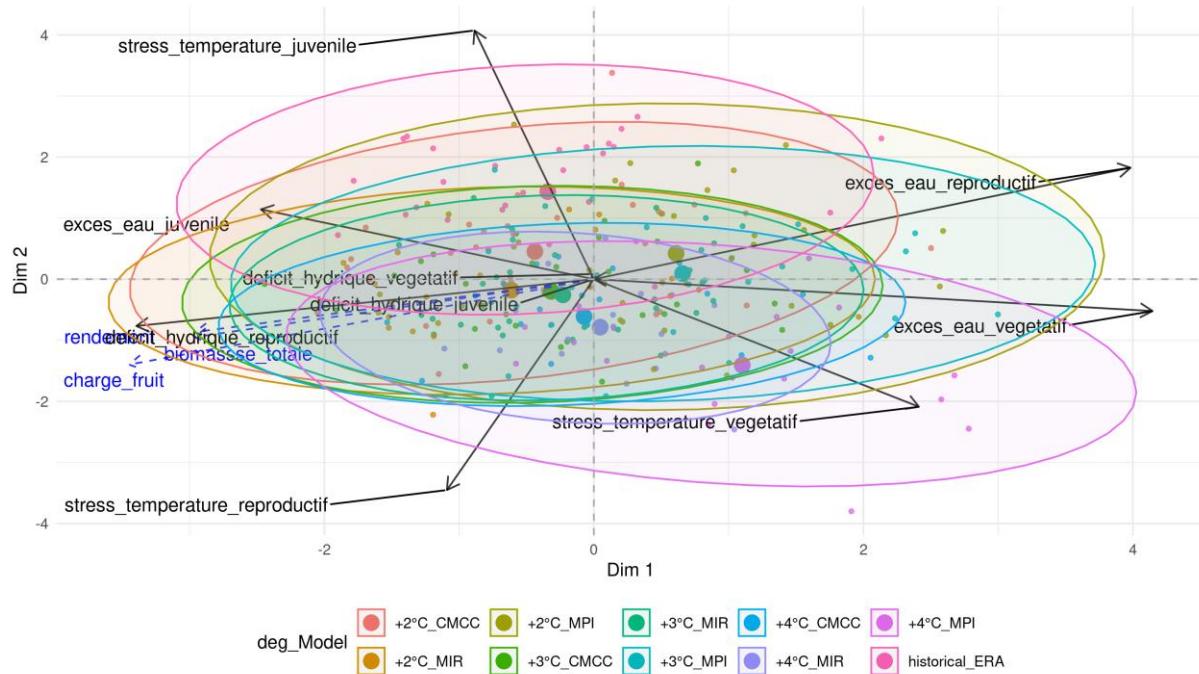


Figure 13: Représentation graphique des deux premières dimensions de l'analyse en composantes principales. Pour chaque scénario climatique (réchauffement global croisé au modèle climatique), un centroïde de chaque année a été calculé (petit point de couleur). De plus, un centroïde a été calculé pour chaque scénario climatique (réchauffement global croisé au modèle climatique) toutes années confondues (gros point de couleur). Les flèches en bleu correspondent aux variables relatives au rendement de la culture. Celles-ci ont été rajoutées à postériori et n'ont pas participé à la "création" des axes.

Colza

Rendement

La répartition spatiale du rendement médian historique de la culture de colza d'hiver est présentée sur la Figure 14.

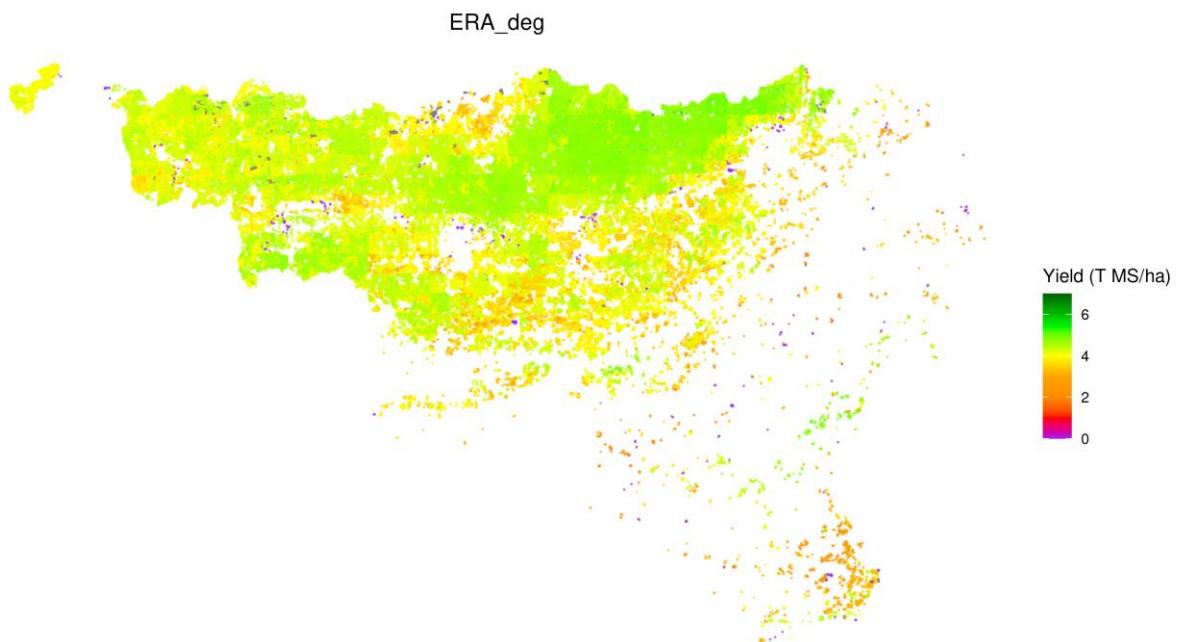


Figure 14: Rendement spatial médian exprimé en T MS/ha de la période historique pour la culture de colza d'hiver.

Les niveaux de rendement du colza réparti sur l'ensemble de la Wallonie sont présentés sur la Figure 6 et exprimés en différence relative par rapport à l'historique sur la Figure 16.

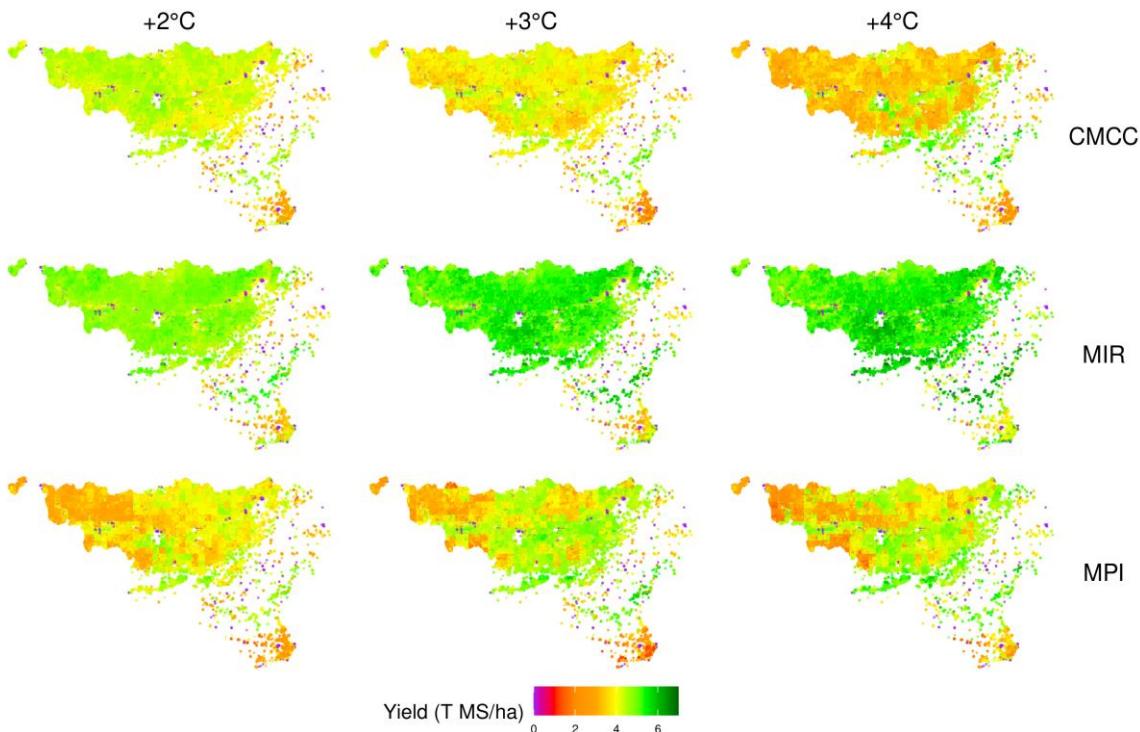


Figure 15: Carte des rendements médians du colza d'hiver exprimés en T MS/ha pour les différents scénarios globaux de changement climatique et des différents modèles de prédictions.

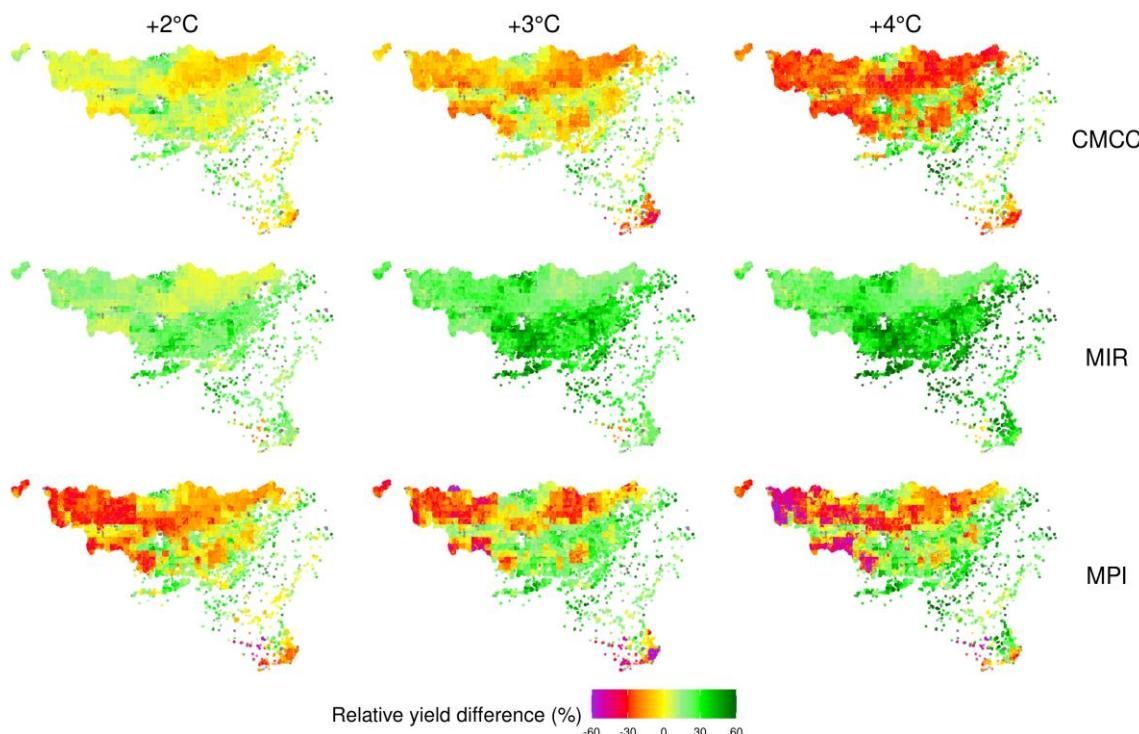


Figure 16: Cartes des différences de rendement relatif du colza d'hiver exprimées en pourcentage pour les différents scénarios globaux de changement climatique et les différents modèles de prédictions en fonction de la période historique.

Les différents niveaux de rendement selon les scénarios de réchauffement global et les modèles climatiques sont représentés sur la Figure 17. Le scénario à +2°C entraîne une légère augmentation du rendement médian pour le modèle CMCC (+2,7%) tandis que le modèle MIROC prévoit une augmentation plus significative de l'ordre de 14,6% et MPI une chute importante du rendement médian du colza de 11,6%. Dans les scénarios à + 3°C, le modèle CMCC prévoit une diminution du rendement médian (-6,5%) tandis que le modèle MIROC a un niveau de rendement qui est encore plus élevé qu'en +2°C (+26,9% par rapport à la médiane historique). Le modèle MPI a un niveau de rendement médian quasiment identique à l'historique. La tendance est la même en +4°C avec une chute encore plus importante du niveau médian de rendement en CMCC (-19,7%), un rendement médian quasiment identique à l'historique sous MPI et un rendement qui a tendance encore à augmenter légèrement sous MIROC (+30,1%). À noter qu'excepté sous MIROC, dans le contexte de réchauffement climatique, certaines années sous MPI et CMCC prévoient des niveaux de rendement nul. De plus, malgré un niveau de rendement médian du MPI quasiment identique à la médiane historique, la variabilité sous ce modèle explose avec des rendements qui risquent d'être fréquemment faibles.

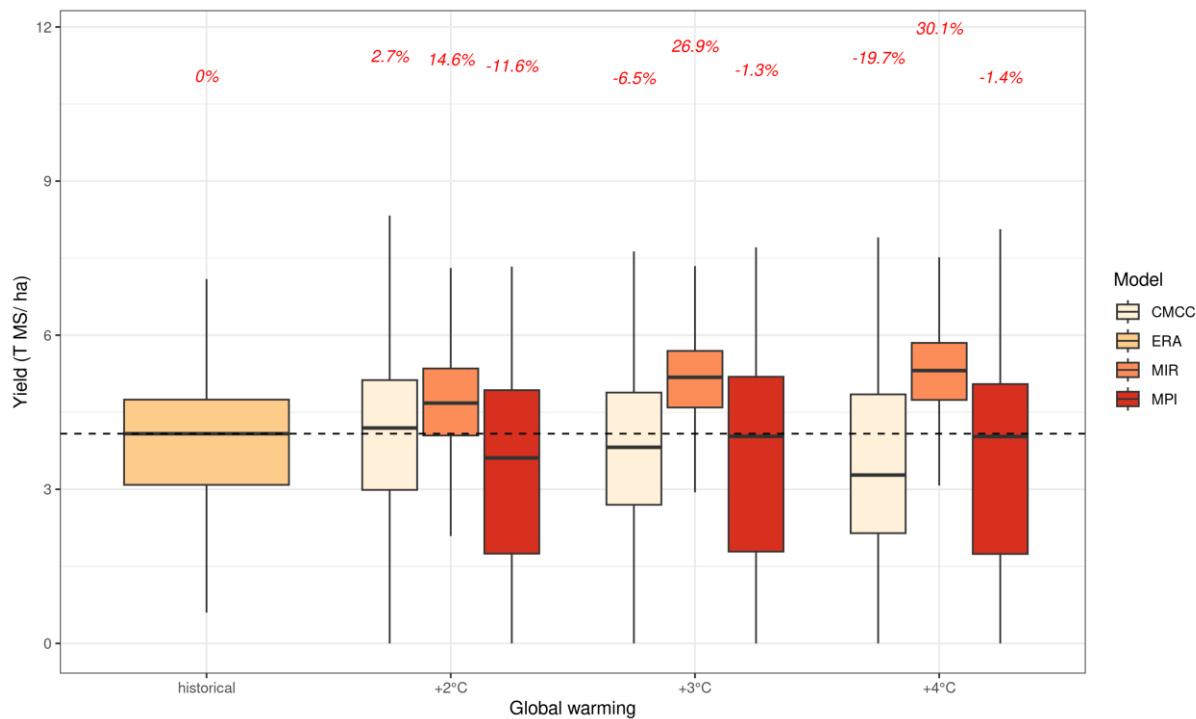


Figure 17: Boxplot du rendement en colza exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Mafruit_max_saison= rendement en colza (T MS/ha), deg= période historique, 2deg=réchauffement global à +2°C, 3deg= réchauffement global à +3°C et 4deg= réchauffement global à +4°C.

Disparité régionale

Chaque région agricole n'a pas la même réponse face au changement climatique pour le modèle MPI et CMCC tandis que les régions agricoles ont une réponse semblable avec MIROC comme illustré par les différentes figures (Figure 15, Figure 16, Figure 18). Les régions limoneuse et sabolimoneuse sont fort semblables à la région jurassique avec une tendance à une diminution du rendement médian sous MPI et CMCC (à partir de +3°C). La région fagnes Famenne observe une augmentation du rendement médian sous MPI et presque aucune différence de rendement médian sous CMCC.

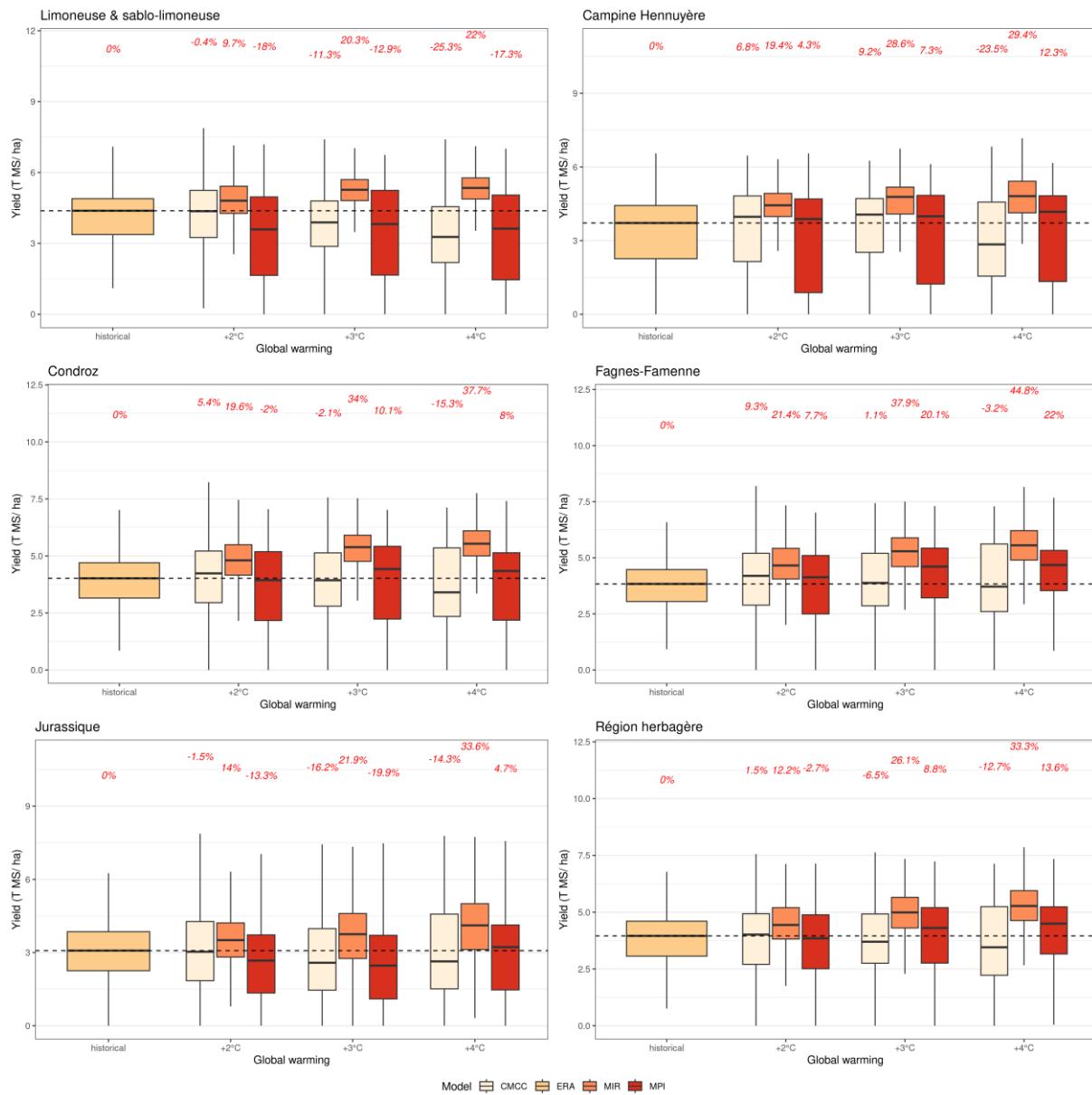


Figure 18: Boxplot du rendement en colza d'hiver pour les principales régions agricoles de Wallonie exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Les pourcentages en rouge expriment les différences de pourcentages entre la médiane de la période historique et la modalité du scénario climatique.

Stabilité

La stabilité des rendements entre les années de la période historique est assez semblable sur l'ensemble de la Wallonie (Figure 19). La différence de stabilité par rapport à la période historique dépend fortement du modèle ainsi que du niveau de réchauffement global. La plus grande chute de stabilité est présente sous les modèles CMCC et MPI pour une partie des régions limoneuse et sablo-limoneuse ainsi que pour la région jurassique (différence de stabilité de plus de 60%), tandis que les zones avec le plus grand gain de stabilité du rendement sont sous le modèle MIROC en +4°C avec une grande zone en Hesbaye et Condroz avec des stabilités qui ont augmenté de plus de 60%. Toutefois, cela n'empêche pas quelques petites zones au sein de la région à avoir une diminution de stabilité par rapport à la période historique (Figure 20).

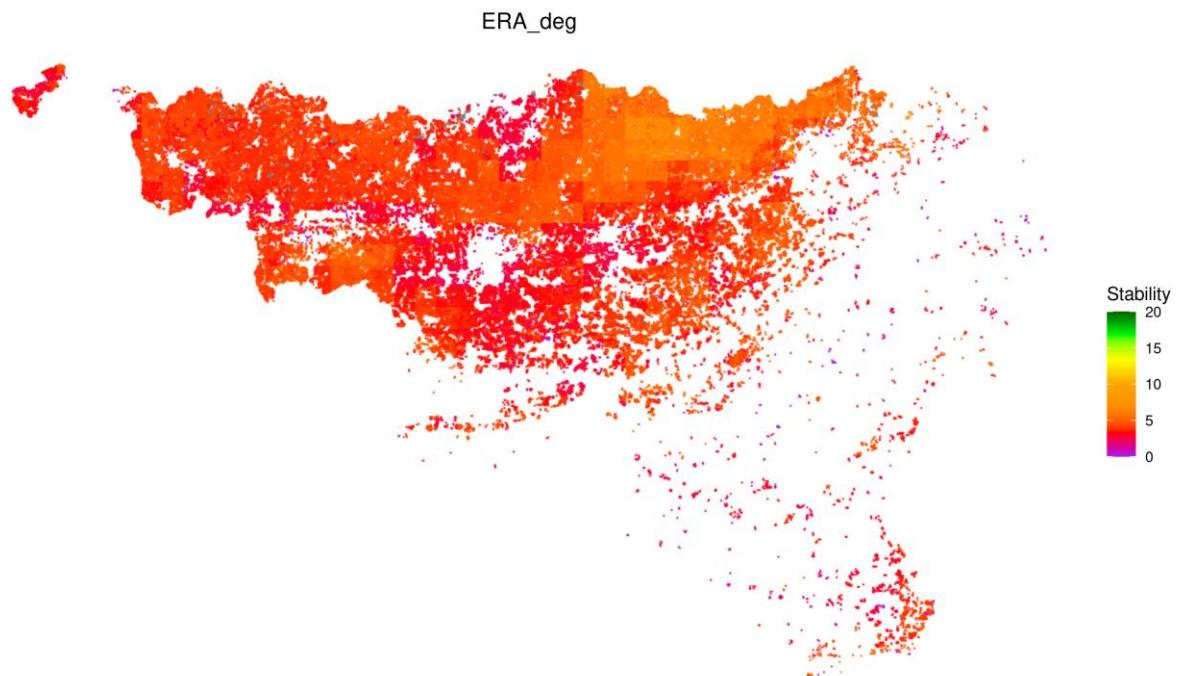


Figure 19: Carte de la stabilité des rendements de colza d'hiver entre les années de la période historique.

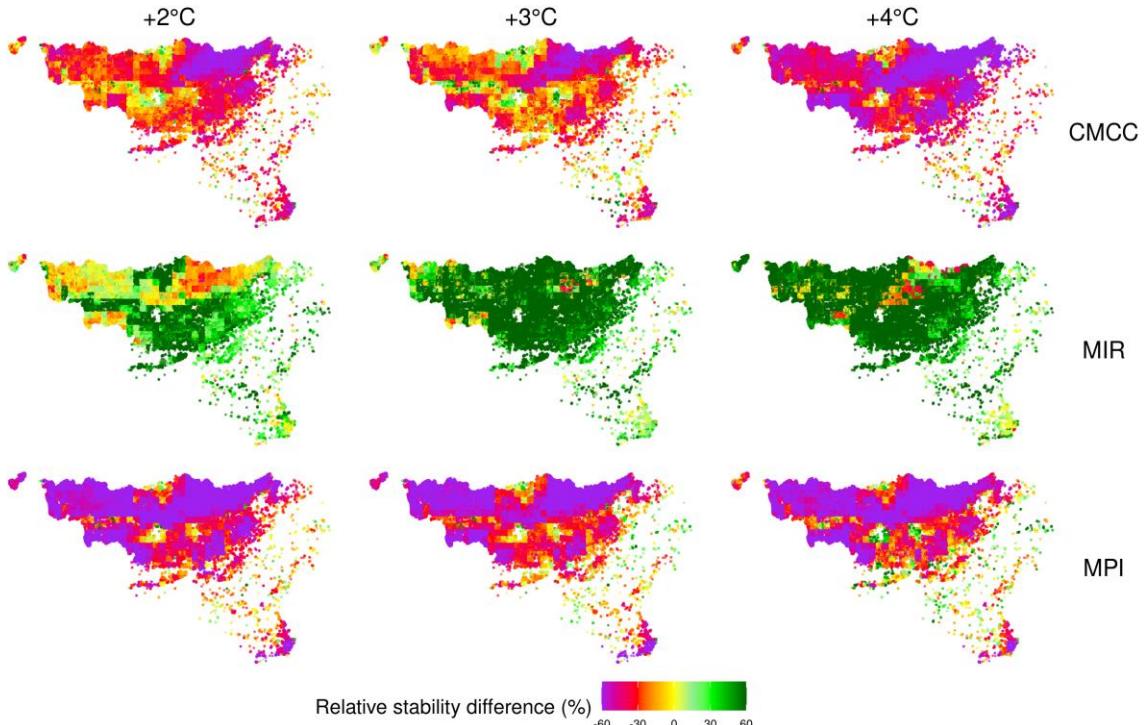


Figure 20: Cartes des différences relatives du niveau de stabilité du colza d'hiver entre la période de référence (1980-2010) et les scénarios futurs. Toutes valeurs inférieures à -60% sont en mauve tandis que toutes valeurs supérieures à 60% sont en vert foncé.

Stress sur la culture

Les relations entre les scénarios climatiques et les différents stress de la culture du colza sont représentées sur la Figure 21 à travers les deux premières dimensions de l'analyse principale. Les variables relatives aux stress par excès d'eau à la phase végétative pointent dans la direction opposée sur la première dimension des variables liées au rendement. Cela signifie que lorsqu'il y a des stress par excès d'eau durant la phase végétative, la plante de colza est impactée et les rendements seront plus faibles. Le déficit hydrique à la phase juvénile et végétative pointe à l'opposé des variables liées au rendement par rapport à la dimension 2. Ces stress impactent donc aussi la production de la plante, mais dans une moindre mesure (ou à une moindre fréquence) que les stress par excès d'eau.

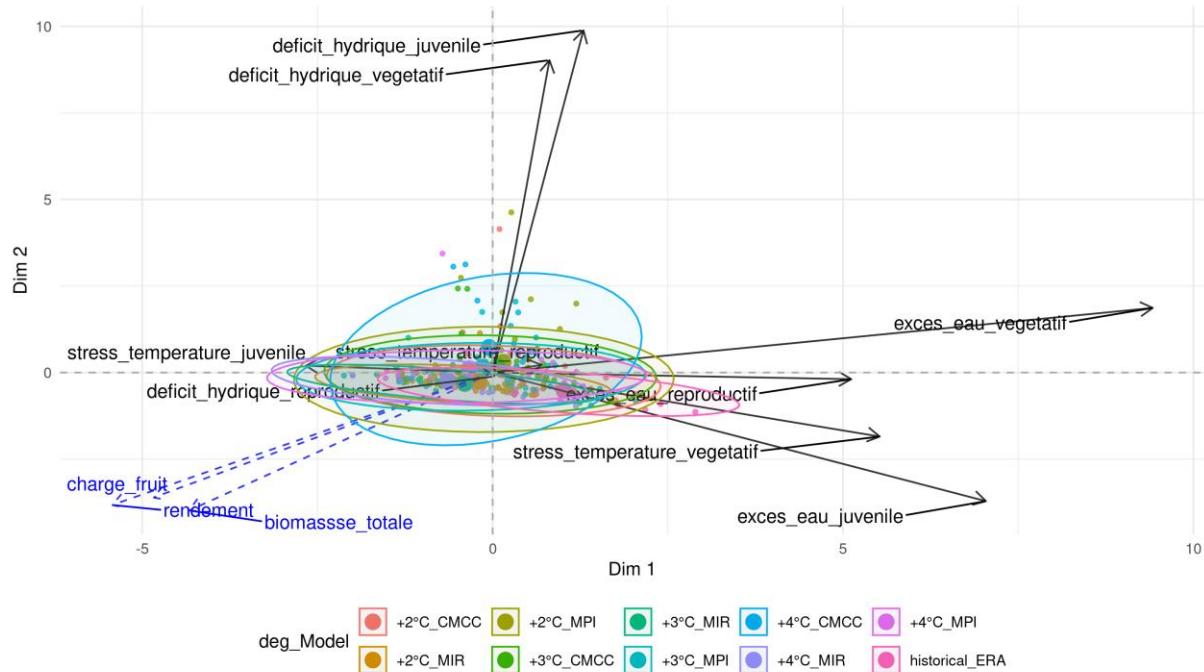


Figure 21: Représentation graphique des deux premières dimensions de l'analyse en composantes principales sur la culture de colza. Pour chaque scénario climatique (réchauffement global croisé au modèle climatique), un centreïde de chaque année a été calculé (petit point de couleur). De plus, un centreïde a été calculé pour chaque scénario climatique (réchauffement global croisé au modèle climatique) toutes années confondues (gros point de couleur). Les flèches en bleu correspondent aux variables relatives au rendement de la culture. Celles-ci ont été rajoutées à postériori et n'ont pas participé à la "création" des axes.

Cultures de printemps

Betteraves

Rendement

La répartition spatiale du rendement médian historique de la culture de betteraves est présentée sur la Figure 22.

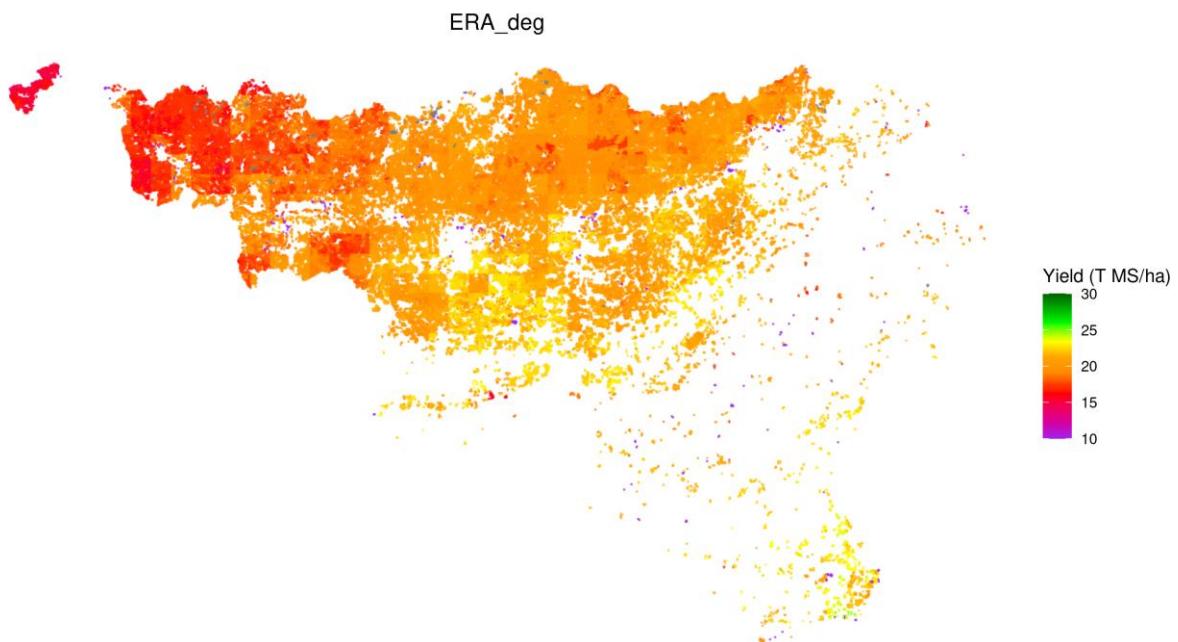


Figure 22: Rendement spatial médian exprimé en T MS/ha de la période historique pour la culture de betteraves.

Les niveaux de rendement de la betterave répartis sur l'ensemble de la Wallonie sont présentés sur la Figure 23 et exprimés en différence relative par rapport à l'historique sur la Figure 16.

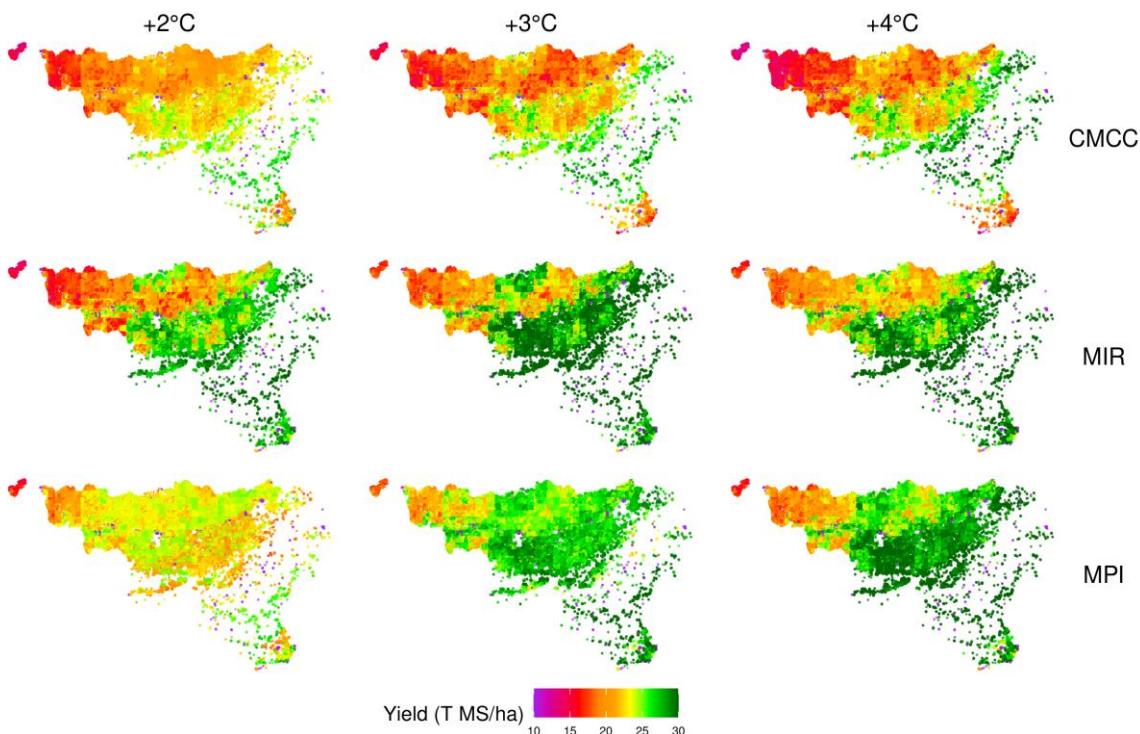


Figure 23: Carte des rendements médians de la betterave exprimés en T MS/ha pour les différents scénarios globaux de changement climatique et différents modèles de prédictions.

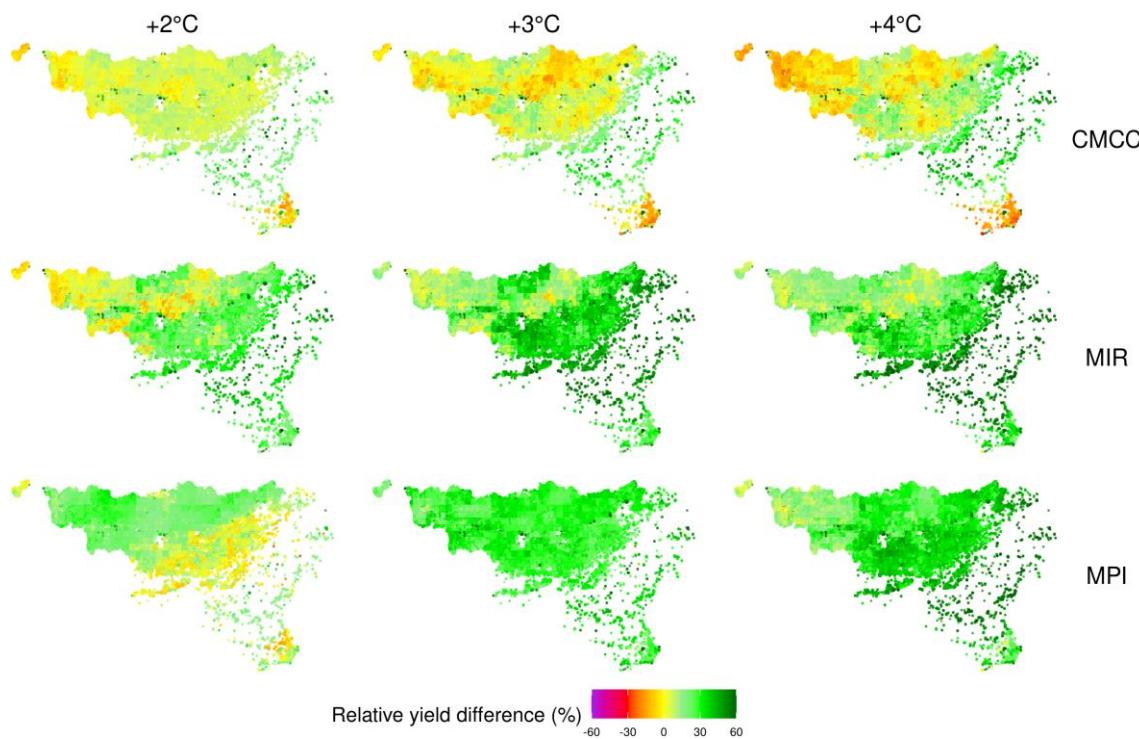


Figure 24: Cartes des différences de rendement relatif de la betterave exprimées en pourcentage pour les différents scénarios globaux de changement climatique et différents modèles de prédictions en fonction de la période historique.

Les différents niveaux de rendement selon les scénarios de réchauffement global et les modèles climatiques sont représentés sur la Figure 25. L'ensemble des modèles dès +2°C estiment une augmentation du rendement médian en betteraves par rapport à la période historique (entre 7 et 18,5%). Le modèle CMCC est le modèle qui prédit la plus faible augmentation avec une valeur qui reste relativement identique selon le niveau de réchauffement (entre 3 et 7%). Par contre, les niveaux de rendement sous MPI et MIROC prédisent une augmentation plus importante que sous CMCC et avec un niveau médian qui tend à augmenter plus le réchauffement global est élevé (jusqu'à une augmentation de 25,2 et 33,7% respectivement sous MIROC et MPI). Le modèle CMCC est le seul modèle qui prédit dès +3°C, dans de rares années, une mortalité totale de la culture et donc des rendements nuls.

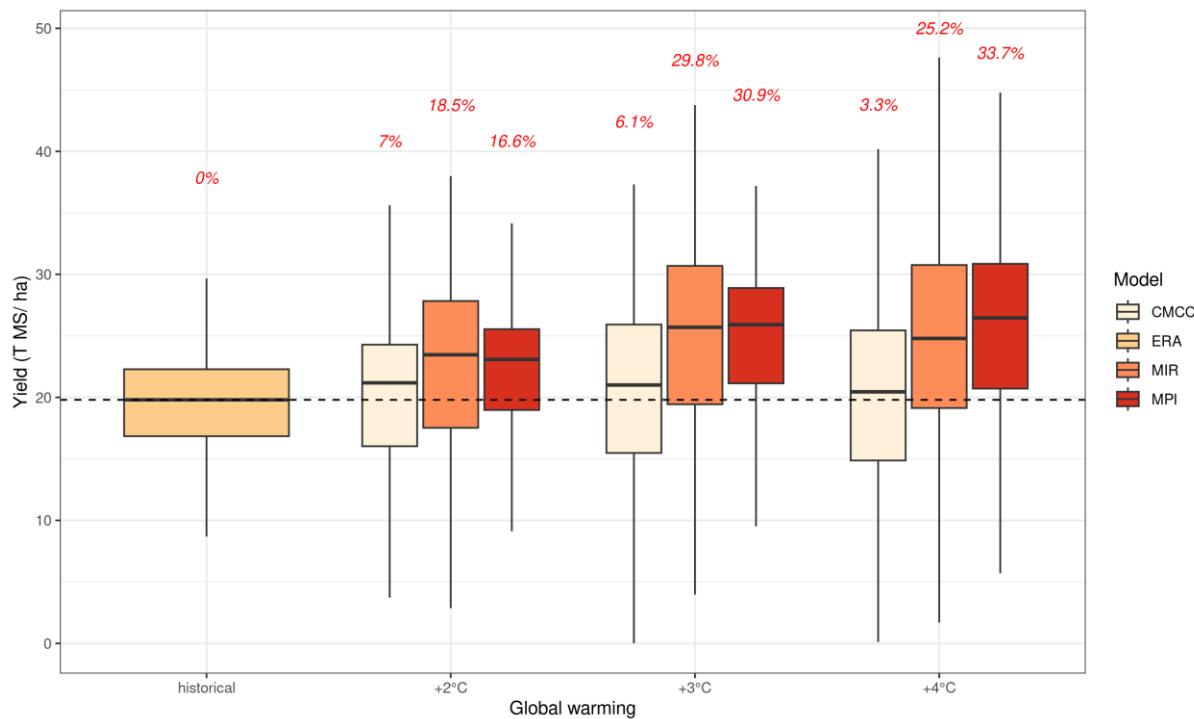


Figure 25: Boxplot du rendement en betteraves exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Mafruit_max_saison= rendement en colza (T MS/ha), deg= période historique, 2deg=réchauffement global à +2°C, 3deg= réchauffement global à +3°C et 4deg= réchauffement global à +4°C.

Disparité régionale

Malgré une tendance globale d'augmentation de rendement sur l'ensemble de la Wallonie, celle-ci cache des diminutions de rendement médian sous le modèle le plus sec (CMCC-Figure 23, Figure 24 et Figure 26). En effet, la région jurassique a tendance à avoir une perte de rendement sous CMCC dès +2°C (-2,4 % en +2°C et jusqu'à -15,6% en +4°C). Dans les régions sablonneuse et sablo-limoneuse ainsi que la campine hennuyère, une perte de rendement sous CMCC est prédictée seulement sous un réchauffement global de +4°C.

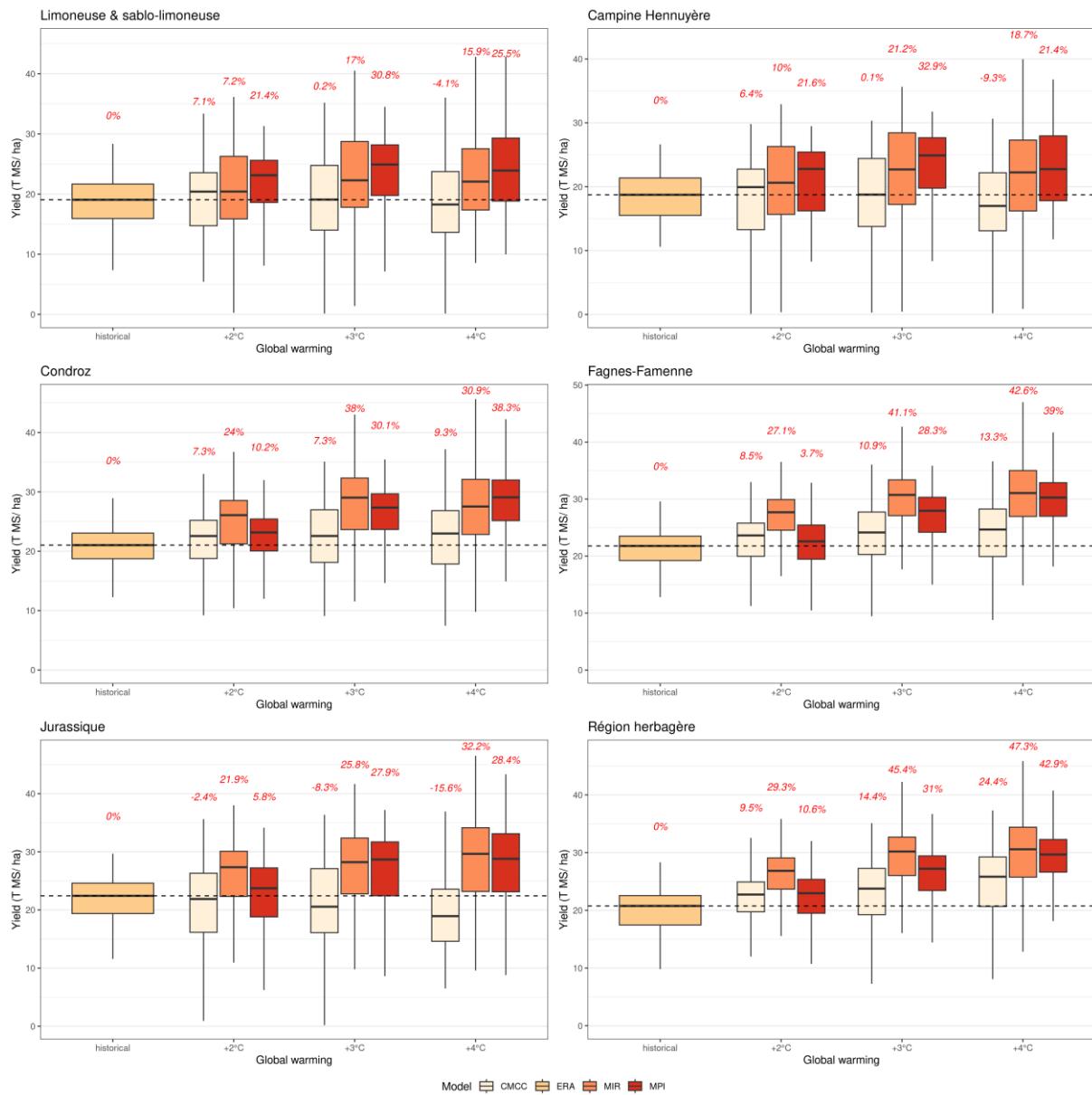


Figure 26: Boxplot du rendement en betteraves pour les principales régions agricoles de Wallonie exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Les pourcentages en rouge expriment les différences de pourcentages entre la médiane de la période historique et la modalité du scénario climatique.

Stabilité

La stabilité des rendements entre les années de la période historique est assez semblable sur l'ensemble de la Wallonie (Figure 27) malgré une augmentation du rendement médian en betteraves présente pour l'ensemble des modèles et presque sur l'ensemble du territoire. Sous le modèle CMCC et le modèle MIROC, la culture a, par contre, une stabilité du rendement entre les années climatiques qui a tendance à se dégrader pour une bonne partie de la Belgique. Sous le modèle MPI, les disparités régionales sont importantes avec, dans le nord-ouest de la Wallonie ainsi que le début du sud du sillon Sambre et Meuse la stabilité qui diminue. Sur l'ensemble des modèles, la tendance à la chute de stabilité représentée pour une grande zone de la Wallonie (et principalement la Hesbaye, zone de production de la betterave) implique donc que malgré des rendements qui ont tendance à augmenter, la culture risque d'être rythmée par des rendements très bons suivis d'années avec des rendements faibles.

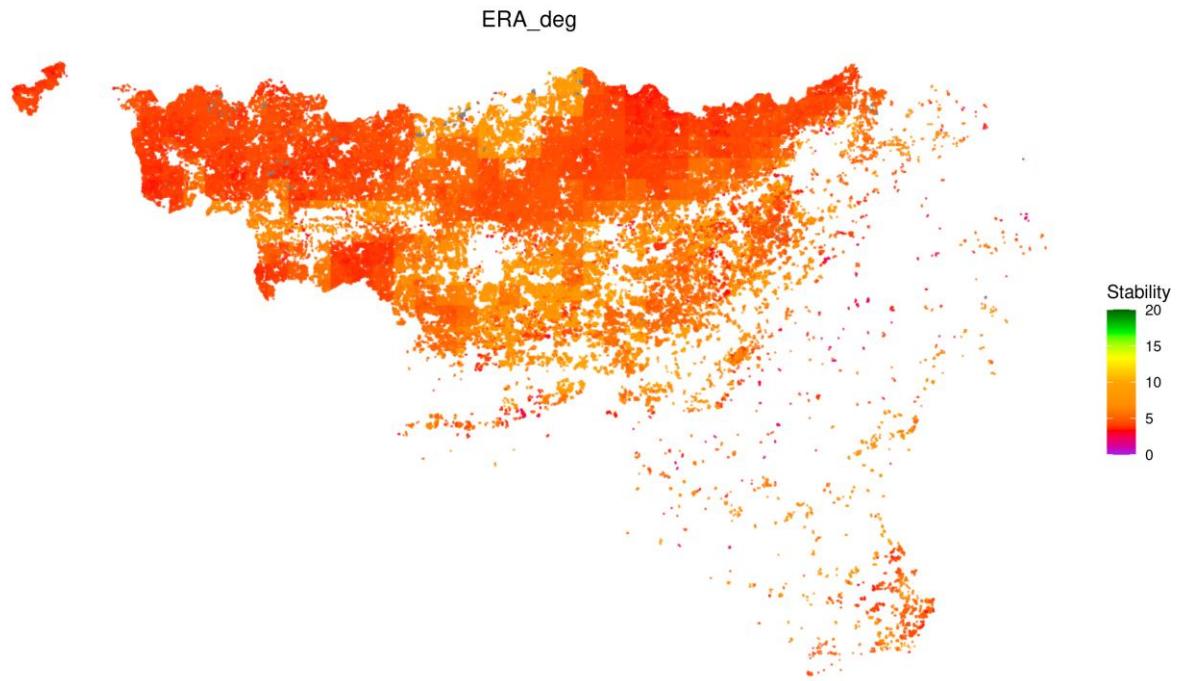


Figure 27: Carte de la stabilité des rendements de la betterave entre les années de la période historique.

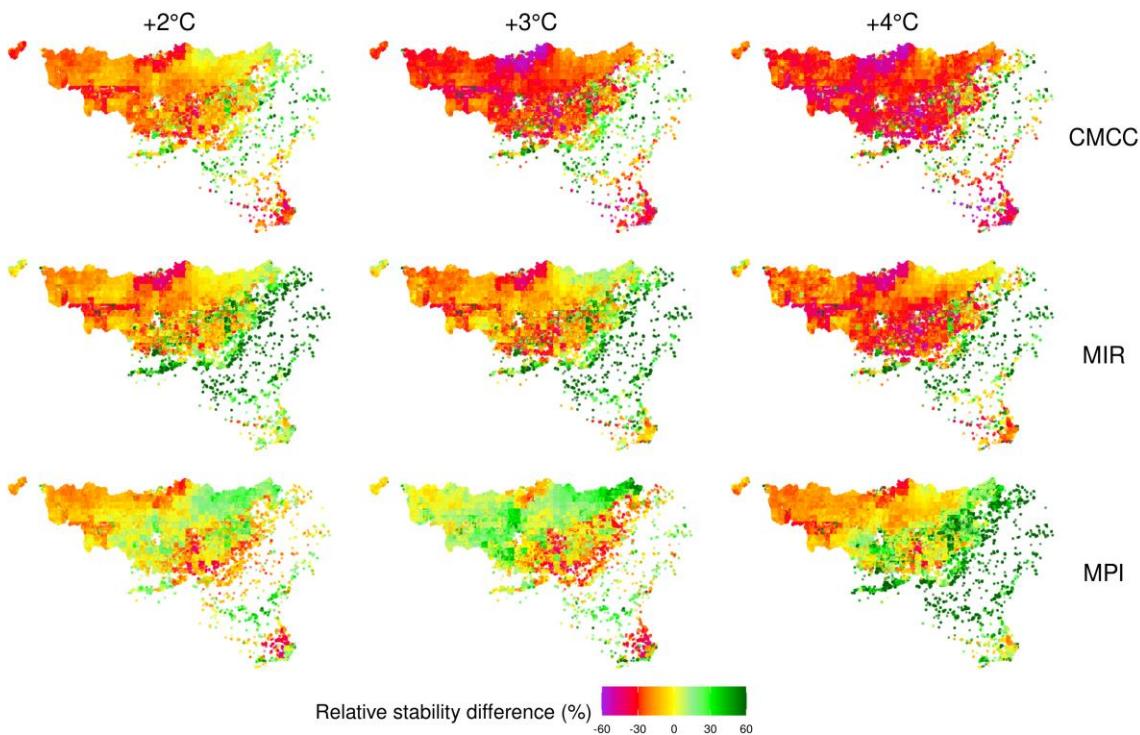
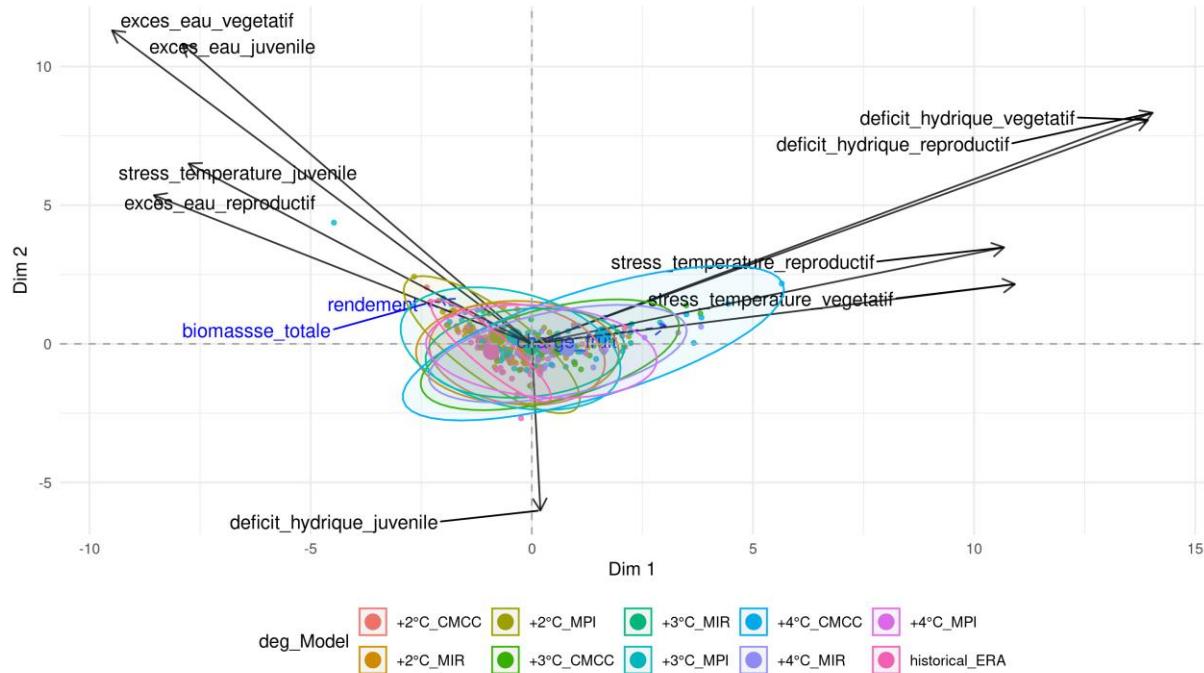


Figure 28: Cartes des différences relatives du niveau de stabilité de la betterave entre la période de référence (1980-2010) et les scénarios futurs. Toutes valeurs inférieures à -60% sont en mauve tandis que toutes valeurs supérieures à 60% sont en vert foncé.

Stress sur la culture

Les relations entre les scénarios climatiques et les différents stress de la culture de la betterave sont représentées sur la Figure 21 à travers les deux premières dimensions de l'analyse principale. Les variables liées au rendement de la culture rajoutées à postériori sont mal représentées dans la première et deuxième dimension de l'ACP (flèches de faible distance). La réponse de la betterave à un stress

particulier n'est donc pas claire. Toutefois on peut observer que les centroïdes du modèle du CMCC en +4°C ne sont pas dans le même plan que les centroïdes des autres modèles et vont dans la direction du déficit hydrique. Cela signifie que dans ce scénario les stress par déficit hydrique seront plus importants pour la culture de la betterave.



Pommes de terre

Rendement

La répartition spatiale du rendement médian historique de la culture de pommes de terre est présentée sur la Figure 30.

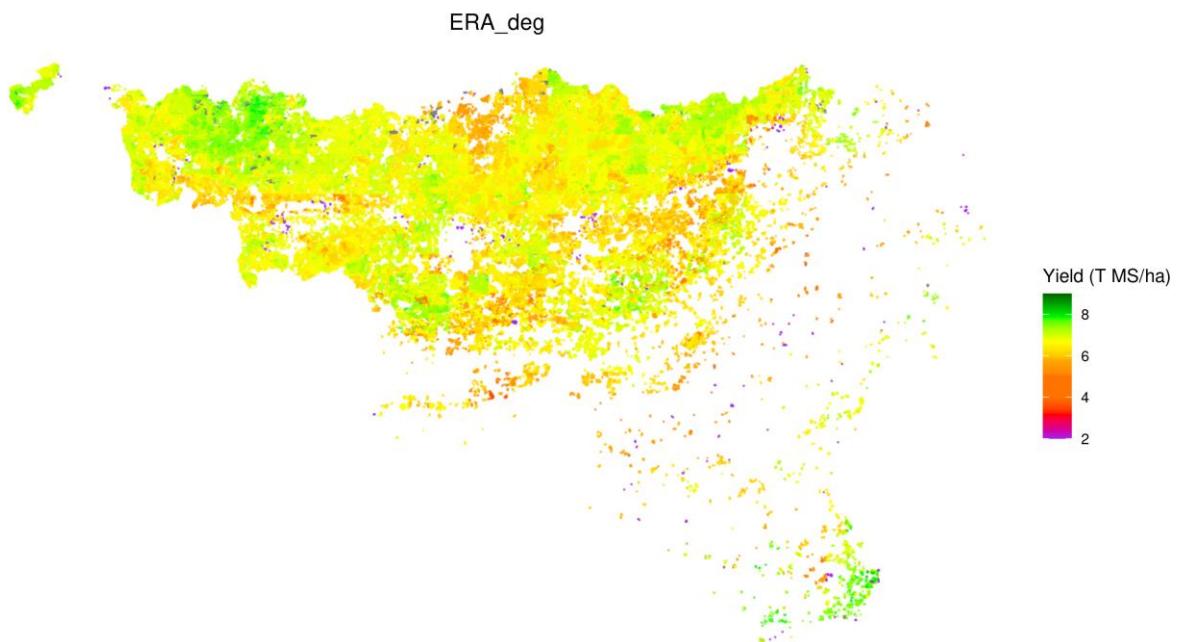


Figure 30: Renderment spatial médian exprimé en T MS/ha de la période historique pour la culture de pommes de terre.

Les niveaux de rendement de la pomme de terre répartis sur l'ensemble de la Wallonie sont présentés sur la Figure 31 et exprimés en différences relatives par rapport à l'historique sur la Figure 16.

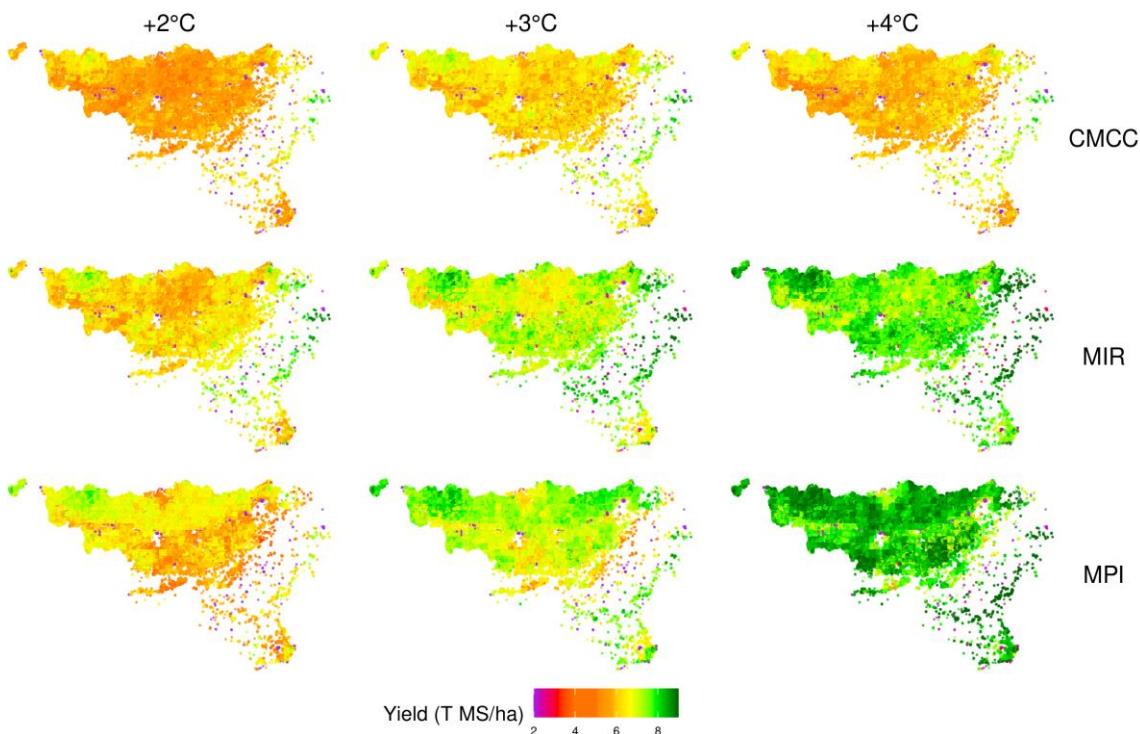


Figure 31: Carte des rendements médians de la pomme de terre exprimés en T MS/ha pour les différents scénarios globaux de changement climatique et différents modèles de prédictions.

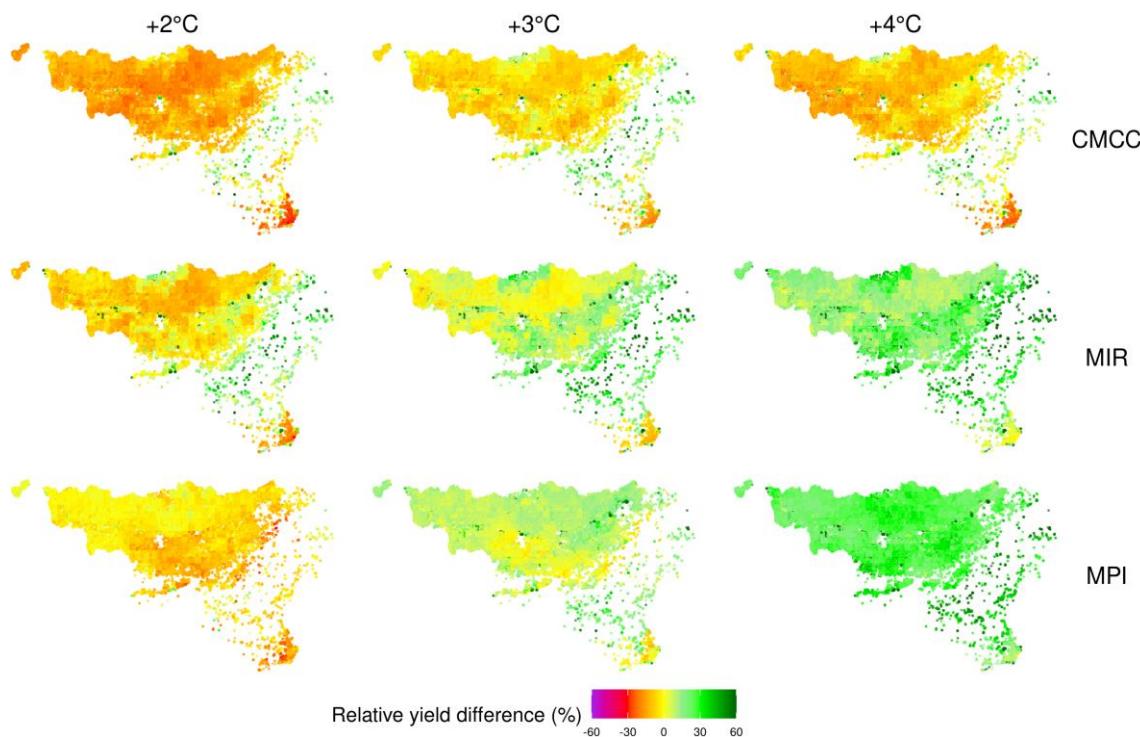


Figure 32: Cartes des différences de rendement relatif de la pomme de terre exprimées en pourcentage pour les différents scénarios globaux de changement climatique et différents modèles de prédictions en fonction de la période historique.

Les différents niveaux de rendement de pommes de terre selon les scénarios de réchauffement globaux et les modèles climatiques sont représentés sur la Figure 25. Sous un réchauffement global de +2°C, l'ensemble des modèles prédisent une diminution du rendement en pommes de terre (compris entre -4,4 et -14,4%). Celle-ci est la plus importante sous CMCC (-14,4%). Par contre en +3 et +4 °C, uniquement le modèle CMCC prédit une chute de rendement par rapport à la période historique (respectivement -4,9 et -9,1%), mais plus faible que sous +2°C, tandis que les scénarios MPI et MIROC prédisent une augmentation de rendement qui est plus importante en +4°C (respectivement 25,1 et 16%) qu'en +3°C (respectivement 7,3 et 9,1%).

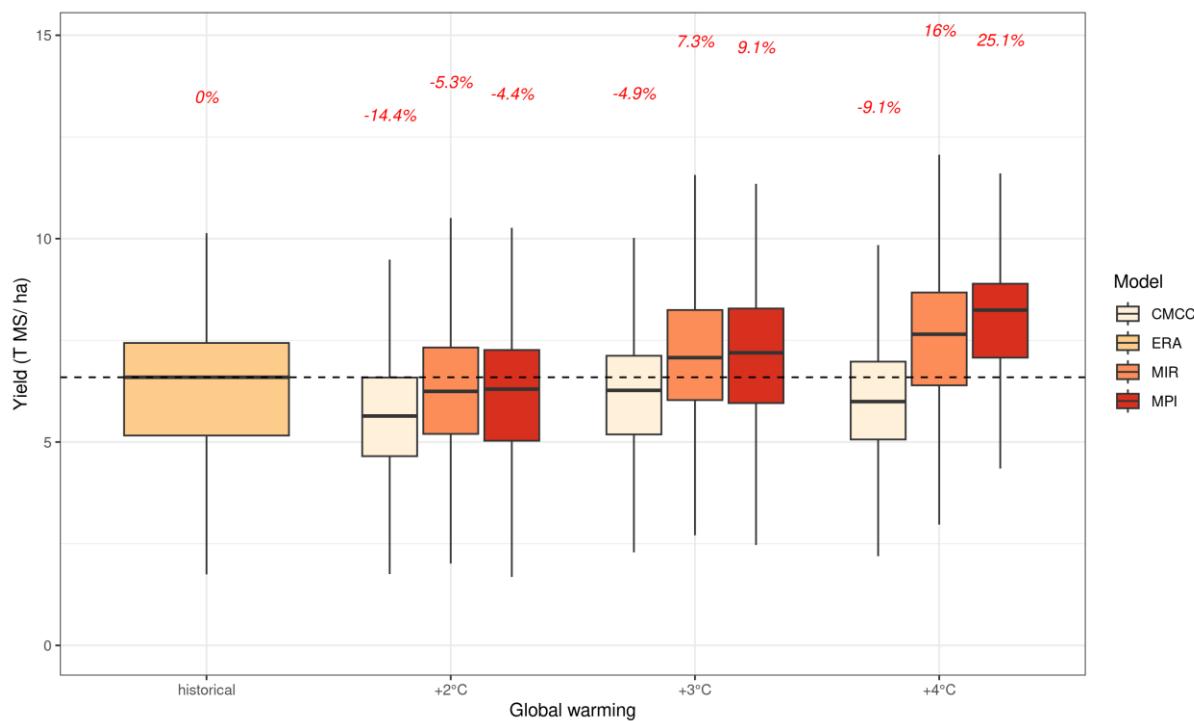


Figure 33: Boxplot du rendement en pommes de terre exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Les pourcentages en rouge expriment les différences de pourcentages entre la médiane de la période historique et la modalité du scénario climatique.

Disparité régionale

Les tendances régionales sont assez semblables pour l'ensemble des principales régions agricoles (Figure 31, Figure 32 et Figure 34). La région qui s'écarte le plus du comportement des autres régions est la région jurassique avec des pertes de rendement plus importantes que les autres régions en +2°C et en +3°C.

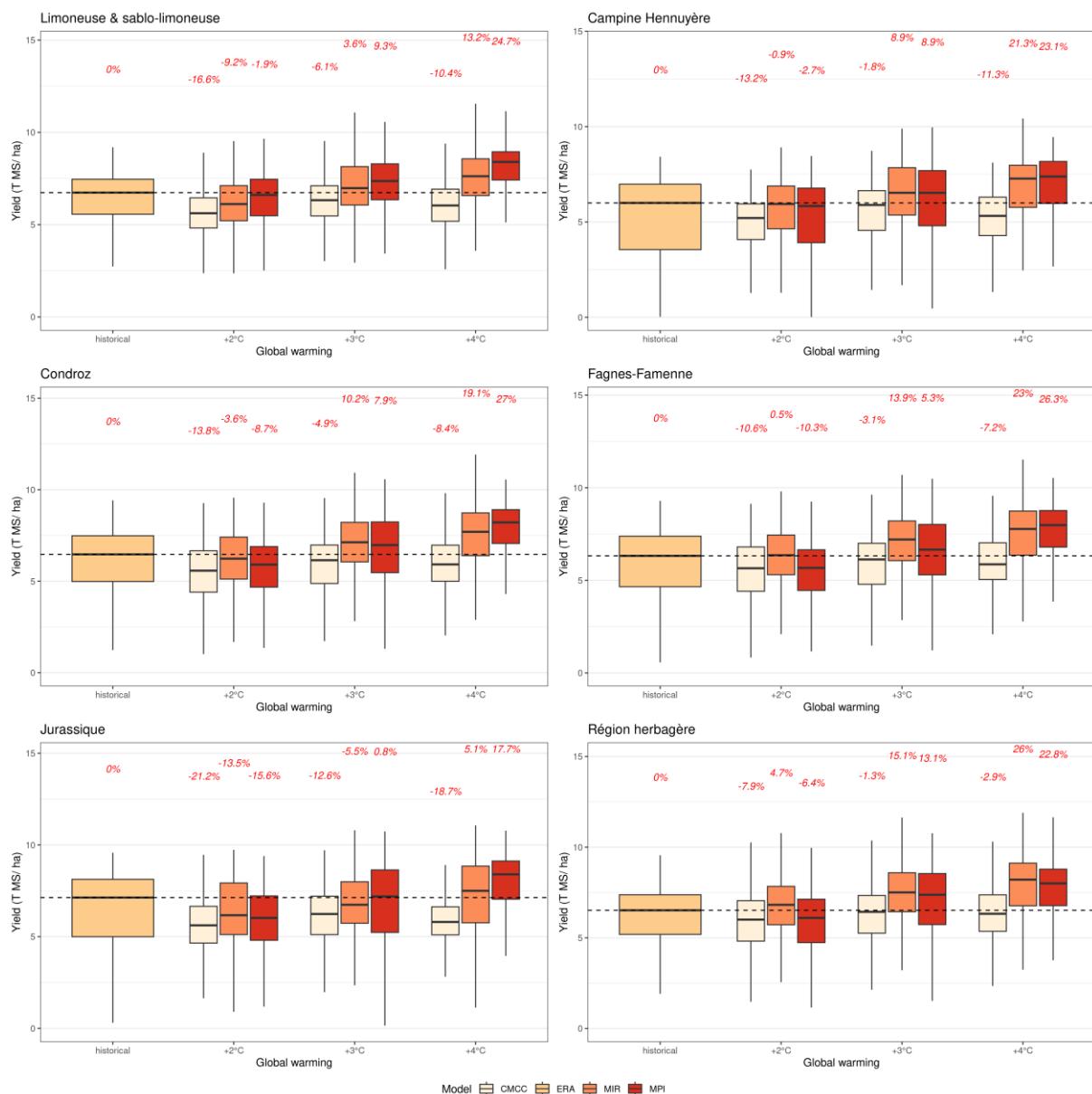


Figure 34: Boxplot du rendement en pommes de terre pour les principales régions agricoles de Wallonie exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Les pourcentages en rouge expriment la différence de pourcentages entre la médiane de la période historique et la modalité du scénario climatique.

Stabilité

La stabilité des rendements entre les années de la période historique est présentée pour la Région wallonne à la Figure 35. La stabilité du rendement en pommes de terre a tendance à augmenter de manière générale entre les scénarios et les modèles pour une grande partie de la Wallonie (Figure 36). Toutefois certaines zones rencontrent une chute de stabilité du rendement dans les scénarios futurs en comparaison à la période historique. Ces zones se retrouvent principalement dans la partie nord-est et nord-ouest de la Wallonie (dépendant du scénario de réchauffement global et du modèle). Le gain de stabilité est le plus important en +4°C sous MPI avec sur une grande partie du pays une augmentation de 60%. Une très faible proportion de pixel ont toutefois une diminution de la stabilité.

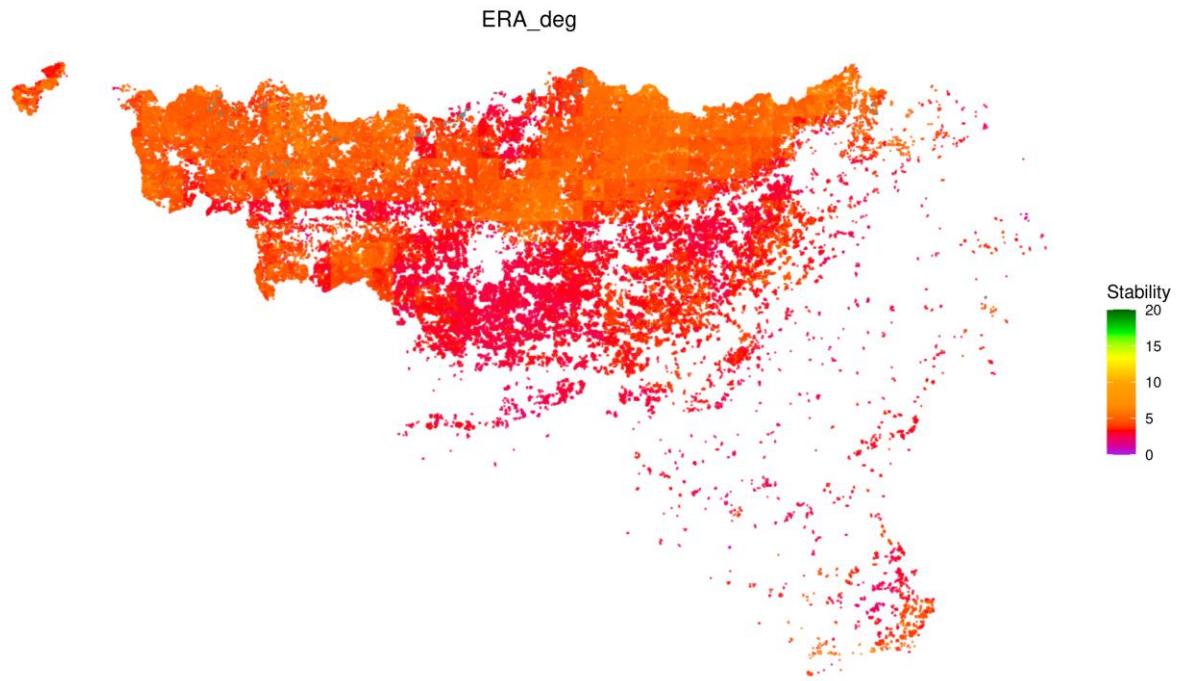


Figure 35: Carte de la stabilité des rendements de la pomme de terre entre les années de la période historique.

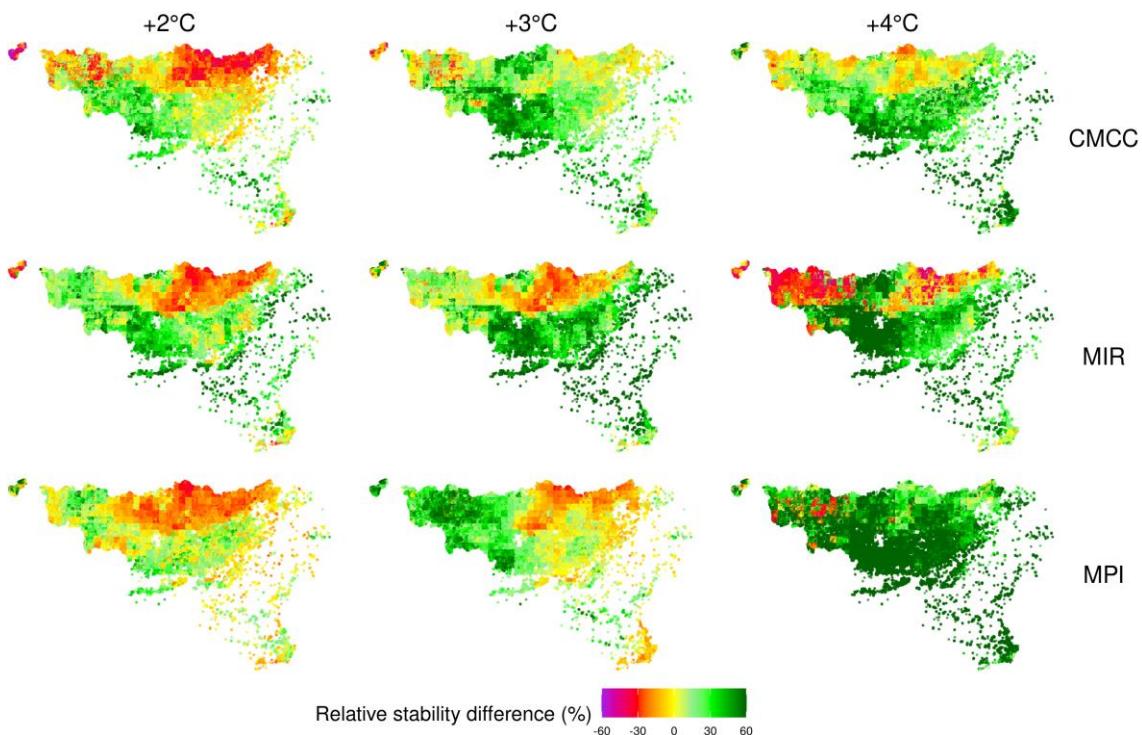


Figure 36: Cartes des différences relatives du niveau de stabilité de la pomme de terre entre la période de référence (1980-2010) et les scénarios futurs. Toutes les valeurs inférieures à -60% sont en mauve tandis que toutes les valeurs supérieures à 60% sont en vert foncé.

Stress sur la culture

Les relations entre les scénarios climatiques et les différents stress de la culture de la pomme de terre sont représentées sur la Figure 37 à travers les deux premières dimensions de l'analyse principale. Les

variables liées au rendement de la culture rajoutées à postériori pointent à l'opposé de la variable par excès d'eau à la phase juvénile ainsi que du stress de température à la phase juvénile. Ces deux stress sont les plus impactant sur le rendement. De plus, les variables par déficit hydrique sont opposées aux variables de rendement sur la dimension 2 (axe des Y). Cela implique donc que ces stress impactent aussi la production de pommes de terre, mais dans une mesure moins importante que les stress de température et d'excès d'eau à la phase juvénile. Les centroïdes des différents scénarios ont tendance à se déplacer de droite à gauche sur l'axe horizontal plus le niveau de réchauffement global est important. Les modèles ont donc tendance à aller vers une diminution des stress par excès d'eau et aller vers une augmentation des stress hydriques.

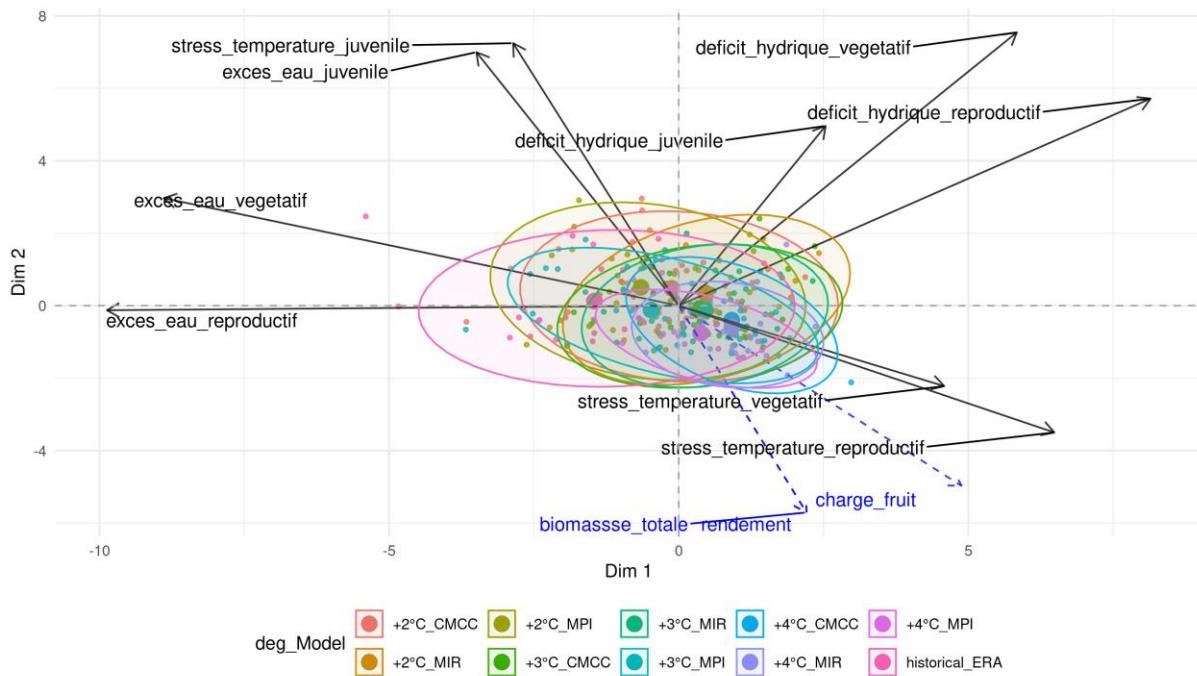


Figure 37: Représentation graphique des deux premières dimensions de l'analyse en composantes principales sur la culture de la pomme de terre. Pour chaque scénario climatique (réchauffement global croisé au modèle climatique), un centroïde de chaque année a été calculé (petit point de couleur). De plus, un centroïde a été calculé pour chaque scénario climatique (réchauffement global croisé au modèle climatique) toutes années confondues (gros point de couleur). Les flèches en bleu correspondent aux variables relatives au rendement de la culture. Celles-ci ont été rajoutées à postériori et n'ont pas participé à la "création" des axes.

Maïs

Rendement

La répartition spatiale du rendement médian historique de la culture de maïs est présentée sur la Figure 38.

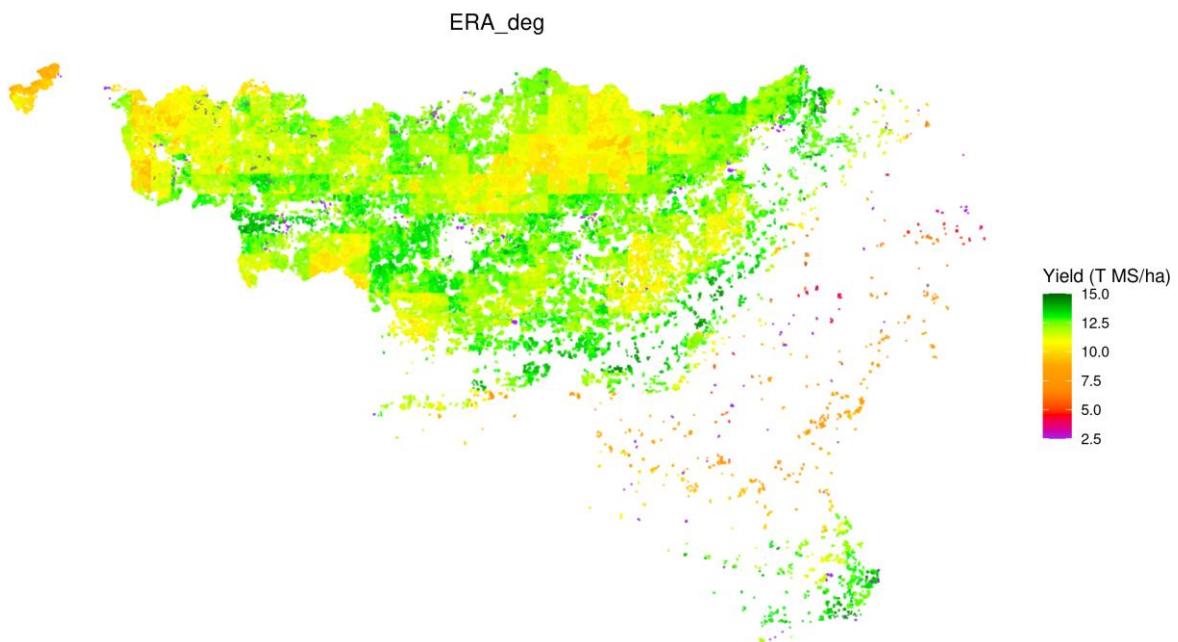


Figure 38: Rendement spatial médian exprimé en T MS/ha de la période historique pour la culture du maïs grain.

Les niveaux de rendement du maïs grain répartis sur l'ensemble de la Wallonie sont présentés sur la Figure 39 et exprimés en différence relative par rapport à l'historique sur la Figure 40.

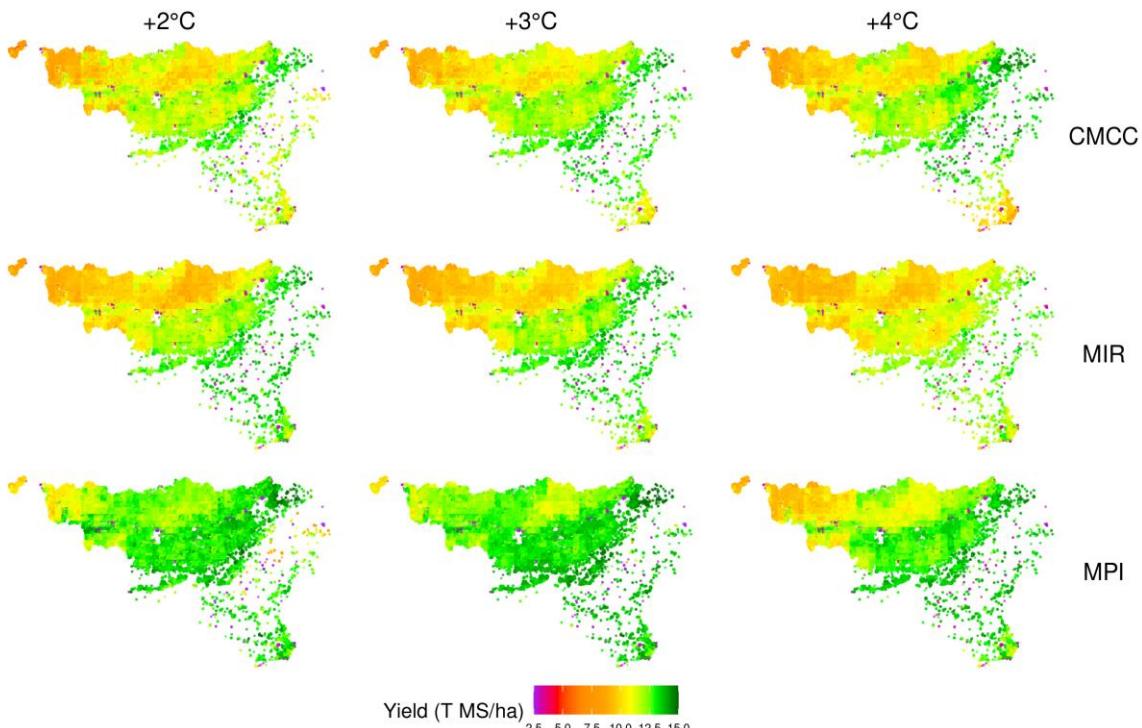


Figure 39: Carte des rendements médians du maïs grain exprimés en T MS/ha pour les différents scénarios globaux de changement climatique et différents modèles de prédictions.

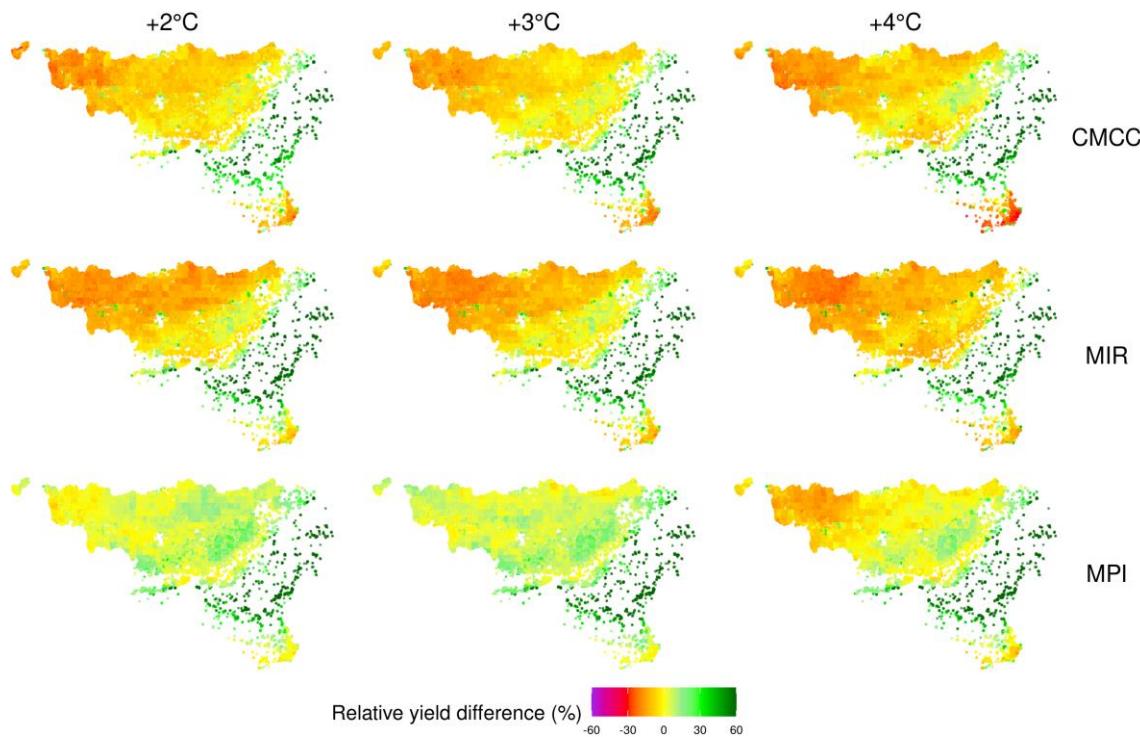


Figure 40: Cartes des différences de rendement relatif du maïs grain exprimées en pourcentage pour les différents scénarios globaux de changement climatique et différents modèles de prédictions en fonction de la période historique.

Les différents niveaux de rendement de maïs grain selon les scénarios de réchauffements globaux et les modèles climatiques sont représentés sur la Figure 25. Les modèles CMCC et MIROC prédisent une chute de rendement assez stable entre les différents scénarios de réchauffements globaux (entre -5 et -10,5%). Par contre, le modèle MPI à +2°C ainsi qu'à +3°C prédit une augmentation des rendements de respectivement +6,7 et +8,7%. Sous 4°C par contre, le niveau de rendement médian est identique à la période historique (1980-2010).

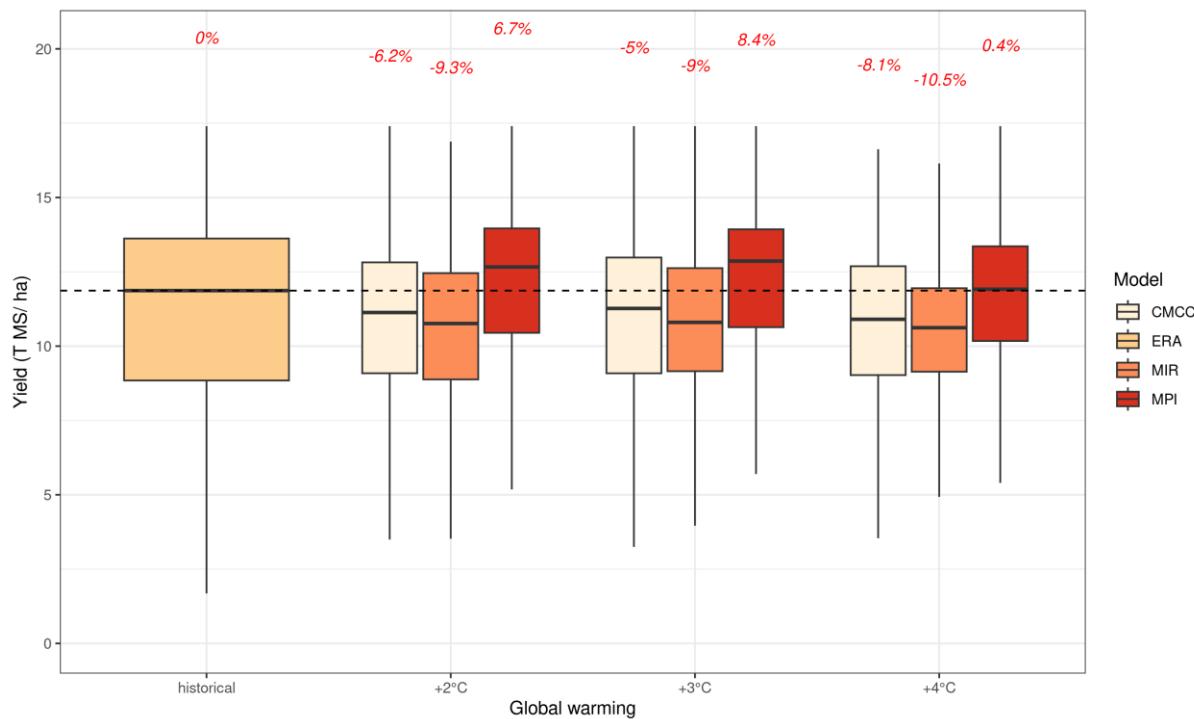


Figure 41: Boxplot du rendement en maïs grain exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Mafruit_max_saison= rendement en maïs (T MS/ha), deg= période historique, 2deg=réchauffement global à +2°C, 3deg= réchauffement global à +3°C et 4deg= réchauffement global à +4°C.

Disparité régionale

Les tendances régionales du maïs grain sont assez semblables entre la région du Condroz, Fagnes-Famenne et de la région herbagère (Figure 39, Figure 40 et Figure 42). Le rendement dans ces régions est selon les prédictions du modèle MIROC et CMCC assez semblable à la période historique. Par contre, la région limoneuse et sablo-limeuse ainsi que la Campine hennuyère prédisent des chutes de rendement en CMCC et MIROC de manière semblable et une augmentation sous MPI en +2 et +3°C, mais pas en +4°C. Enfin la région jurassique voit apparaître un gradient de prédition entre les modèles CMCC, MIROC et MPI, avec un rendement le plus négatif en CMCC, légèrement négatif pour MIROC et légèrement positif pour MPI en comparaison à la période historique de référence. La région qui s'écarte le plus du comportement des autres régions est la région jurassique avec des pertes de rendement plus importantes que les autres régions en +2°C et en +3°C.

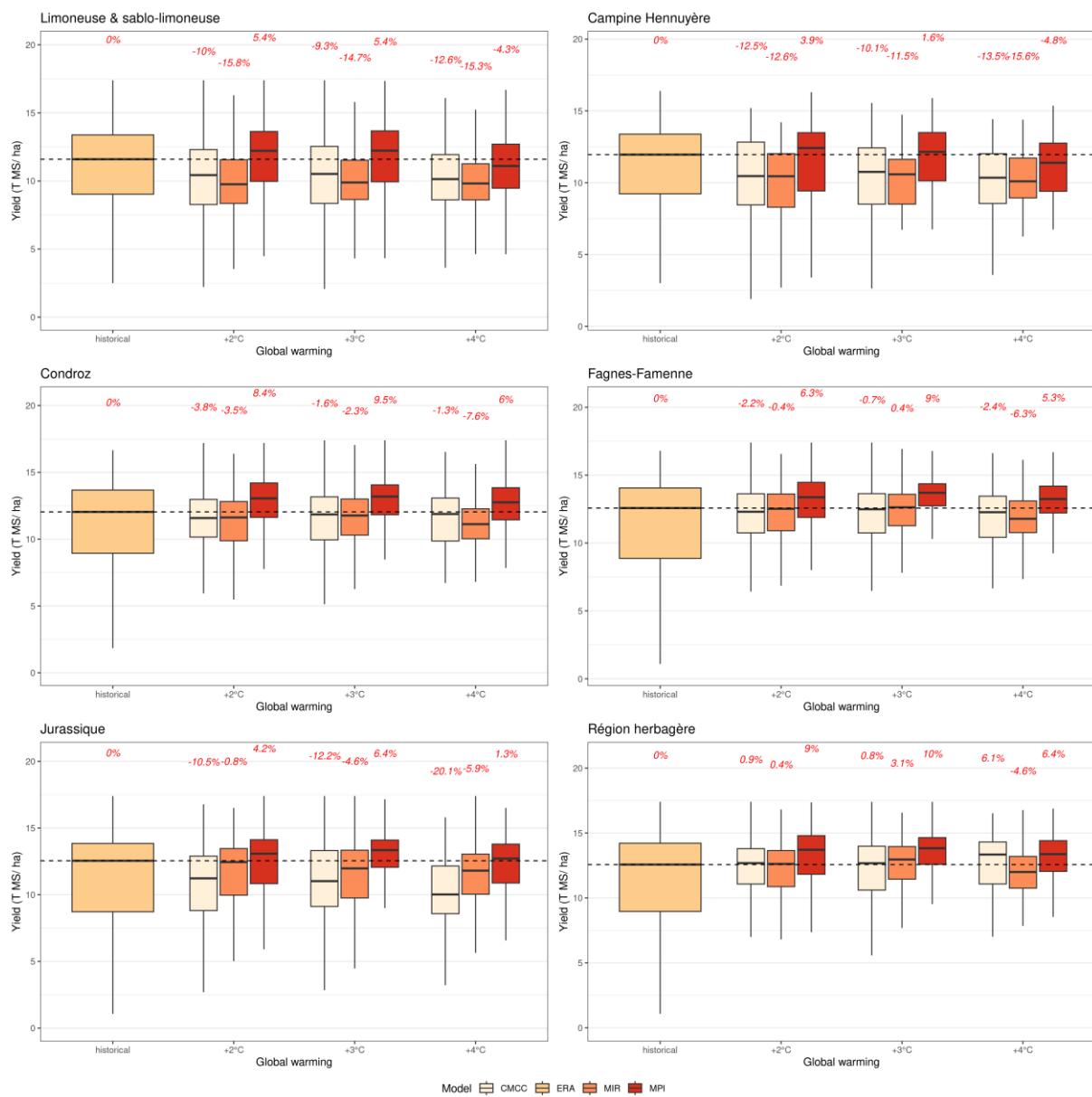


Figure 42: Boxplot du rendement en maïs grain pour les principales régions agricoles de Wallonie exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques. Les pourcentages en rouge expriment les différences de pourcentages entre la médiane de la période historique et la modalité du scénario climatique.

Stabilité

La stabilité des rendements entre les années de la période historique du maïs grain est présentée pour la Région wallonne à la Figure 35. La stabilité du rendement en maïs grain a tendance à augmenter de manière générale entre les scénarios et les modèles pour une grande partie de la Wallonie excepté pour l'extrême Nord-ouest (Figure 36). À travers l'ensemble des modèles, un gradient sud-est à nord-est est perceptible; allant d'une différence de stabilité très élevée par rapport à la période historique à une perte de stabilité en comparaison à la période historique (1980-2010). À noter que ces zones où il y a le plus d'augmentation de stabilité relative étaient les zones fortement instables dans la période historique (valeur de stabilité proche de zéro).

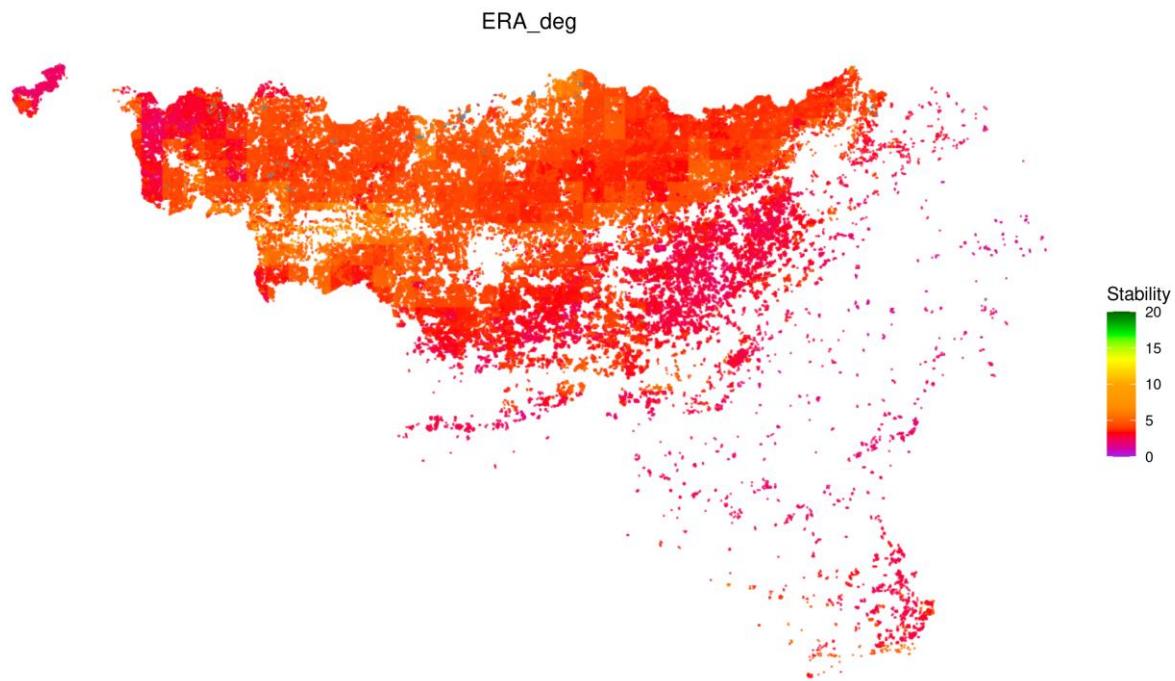


Figure 43: Carte de la stabilité des rendements du maïs entre les années de la période historique.

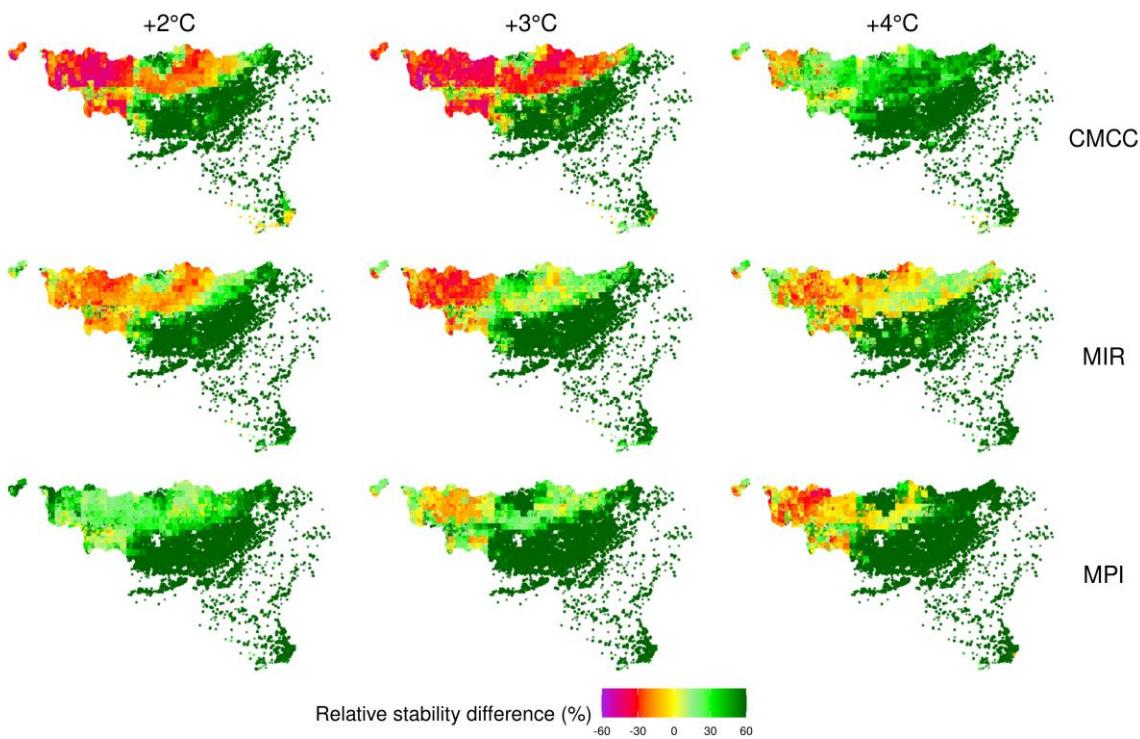


Figure 44: Cartes des différences relatives des niveaux de stabilité du maïs grain entre la période de référence (1980-2010) et les scénarios futurs. Toutes les valeurs inférieures à -60% sont en mauve tandis que toutes les valeurs supérieures à 60% sont en vert foncé.

Stress sur la culture

Les relations entre les scénarios climatiques et les différents stress de la culture du maïs sont représentées sur la Figure 21 à travers les deux premières dimensions de l'analyse en composantes

principales. Les variables supplémentaires (rajoutées à postériori) ne pointent pas toutes dans la même direction. Cela signifie que celles-ci ne sont pas exactement impactées de la même façon par les différents stress. Le rendement du maïs pointe dans la direction opposée du stress par déficit hydrique à la phase juvénile et végétative. Ces stress sont donc ceux qui impacteraient le plus la culture de maïs. Les centroïdes des différents modèles se déplacent sur l'axe horizontal de droite à gauche avec l'historique à l'extrême droite, et le MIROC en +4°C à l'extrême gauche. Par contre, une variabilité selon le deuxième axe est observée entre les modèles. Ces différences impliquent une diminution des stress par excès d'eau, mais par contre, selon les modèles, une augmentation ou une diminution du stress par déficit hydrique.

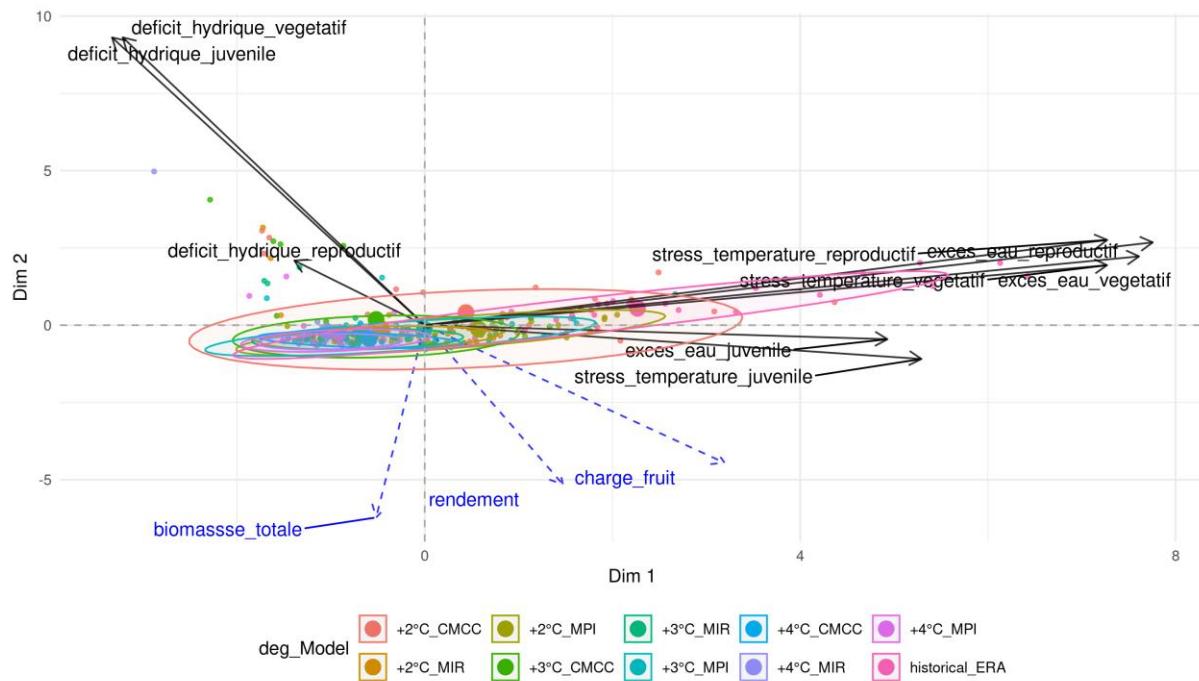


Figure 45: Représentation graphique des deux premières dimensions de l'analyse en composantes principales sur la culture du maïs grain. Pour chaque scénario climatique (réchauffement global croisé au modèle climatique), un centroïde de chaque année a été calculé (petit point de couleur). De plus, un centroïde a été calculé pour chaque scénario climatique (réchauffement global croisé au modèle climatique) toutes années confondues (gros point de couleur). Les flèches en bleu correspondent aux variables relatives au rendement de la culture. Celles-ci ont été rajoutées à postériori et n'ont pas participé à la "création" des axes.

Prairie

Rendement

La répartition spatiale du rendement médian historique de la pousse de l'herbe est présentée sur la Figure 46.

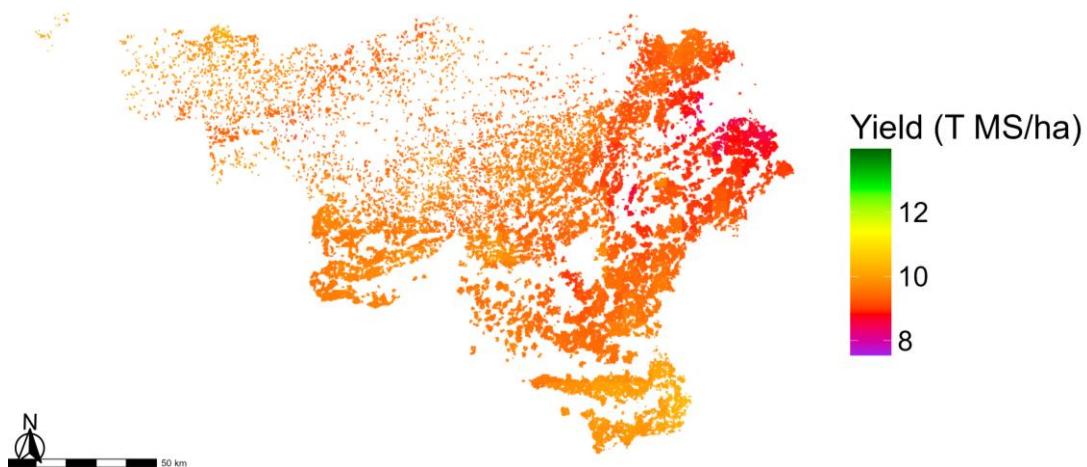


Figure 46: Rendement spatial médian exprimé en T MS/ha de la période historique pour la pousse de l'herbe .

Les différences relatives de rendement médian de la biomasse d'herbe réparties sur l'ensemble de la Wallonie sont présentées sur la Figure 47.

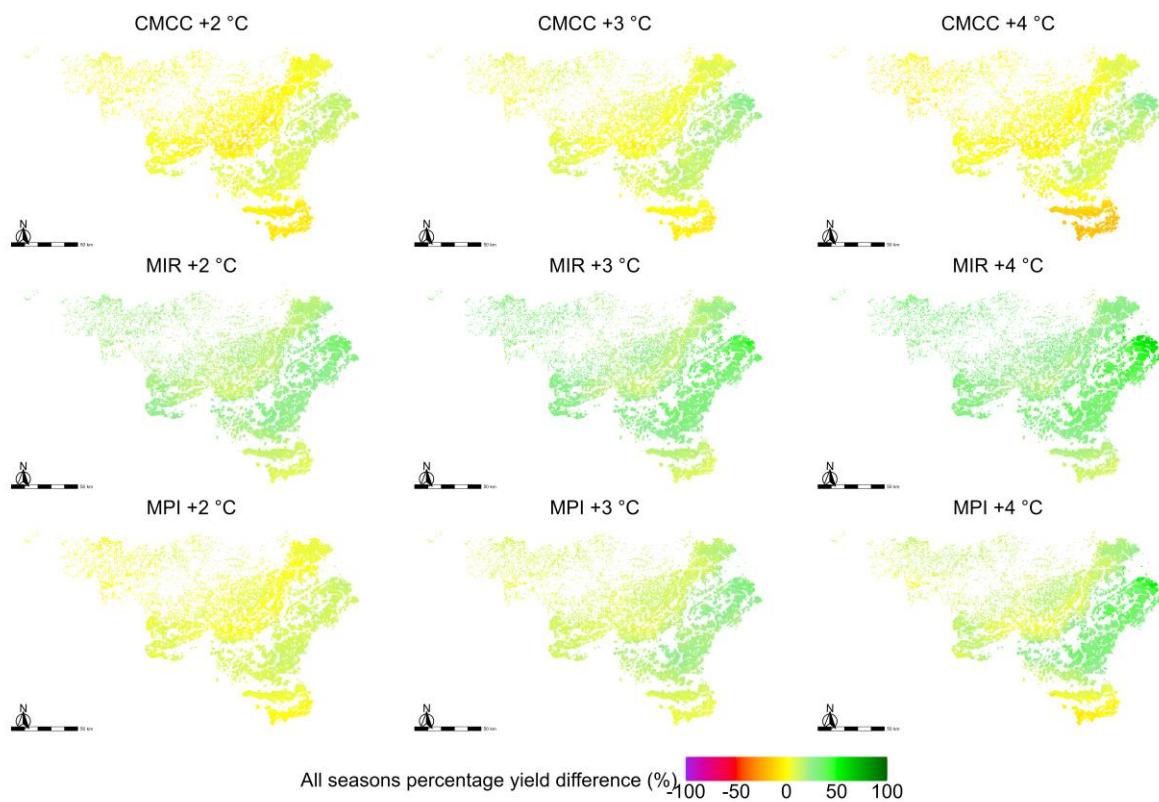


Figure 47: Cartes des différences de rendement relatif de la pousse de l'herbe en pourcentage pour les différents scénarios globaux de changement climatique et des différents modèles de prédictions en fonction de la période historique.

Les différents niveaux de rendement de la pousse de l'herbe selon les scénarios de réchauffement global et les modèles climatiques sont représentés sur la Figure 25. L'ensemble des modèles dès +2°C de réchauffement global prédisent une augmentation médiane de la quantité d'herbe produite comparée à la période historique. Le modèle CMCC est le modèle qui prédit la plus faible augmentation du rendement médian de l'herbe, avec une augmentation la plus importante sous +3°C. Les modèles

MIROC et MPI prédisent quant à eux des niveaux de rendements d'autant plus importants que le réchauffement global est important. Le modèle MIROC est le modèle qui prédit la plus grande augmentation du rendement en herbe par rapport à la période historique (Figure 48). Les différents niveaux de rendement de maïs grain selon les scénarios de réchauffement globaux et les modèles climatiques sont représentés sur la Figure 8. Les modèles CMCC et MIROC prédisent une chute de rendement assez stable entre les différents scénarios de réchauffement globaux (entre -5 et -10,5%). Par contre, le modèle MPI à +2°C ainsi qu'à +3°C prédit une augmentation des rendements de respectivement +6,7 et +8,7%. Sous 4°C par contre, le niveau de rendement médian est identique à la période historique (1980-2010).

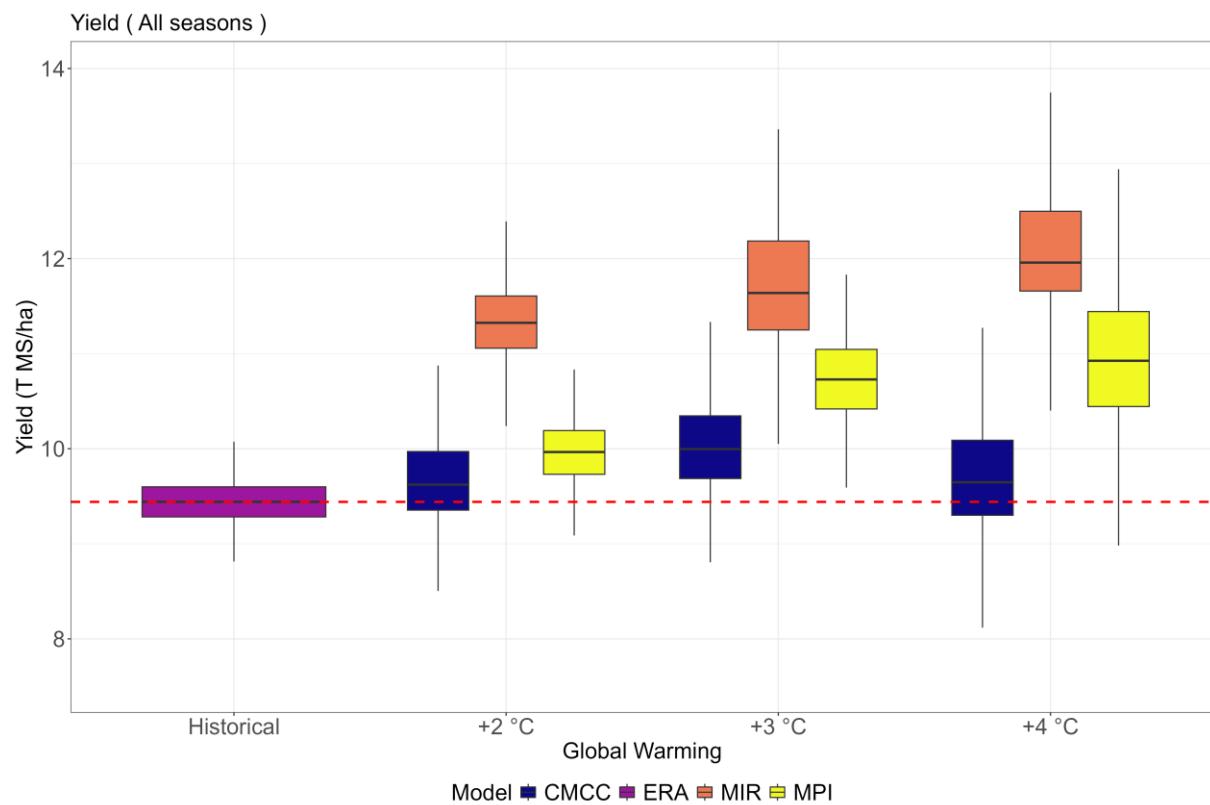


Figure 48: Boxplot du rendement total de la pousse de l'herbe exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques.

L'augmentation de la production annuelle sur l'ensemble de l'année cache des différences de dynamique de croissance par rapport à la période historique (Figure 49, Figure 50 et Figure 51). Sur la période de printemps, excepté sous MPI en +2°C, l'ensemble des modèles prédisent une augmentation importante de la production d'herbe d'autant plus que le réchauffement global est important. Le modèle MIROC est le modèle qui prédit la plus haute augmentation de production d'herbe sur la période printanière. À contrario, à l'été, les modèles CMCC et MIROC prédisent une diminution du niveau de rendement dès +2°C avec une aggravation de la chute du niveau de rendement d'autant plus que le réchauffement global est élevé (Figure 50.). Les prédictions de niveaux de rendement entre ces deux modèles (CMCC et MIROC) estiment des valeurs semblables. Le modèle MPI, quant à lui, prédit une augmentation du rendement en herbe à +2°C et +3°C sous la période de l'été. Par contre, sous le scénario le plus extrême, le modèle MPI prédit une chute des niveaux de production d'herbe. Enfin, pour la période de croissance de l'automne (Figure 51), le modèle CMCC prédit une légère augmentation de production de biomasse par rapport à la période historique et qui est pratiquement identique selon les niveaux de réchauffement global. Le modèle MPI prédit la même tendance avec

toutefois un rendement plus faible en +2°C comparé à un scénario à +3 ou +4°C, mais qui reste supérieur à la période historique.

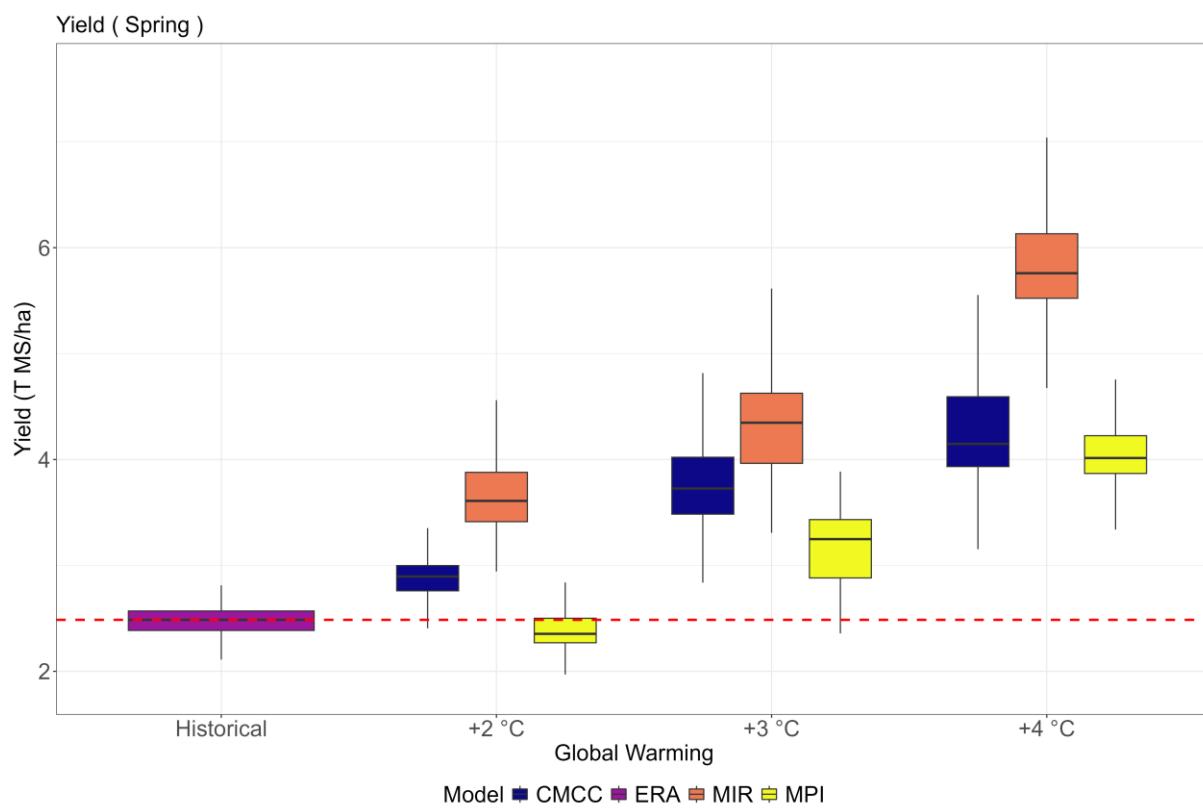


Figure 49: Boxplot du rendement de la pousse de l'herbe au printemps exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques.

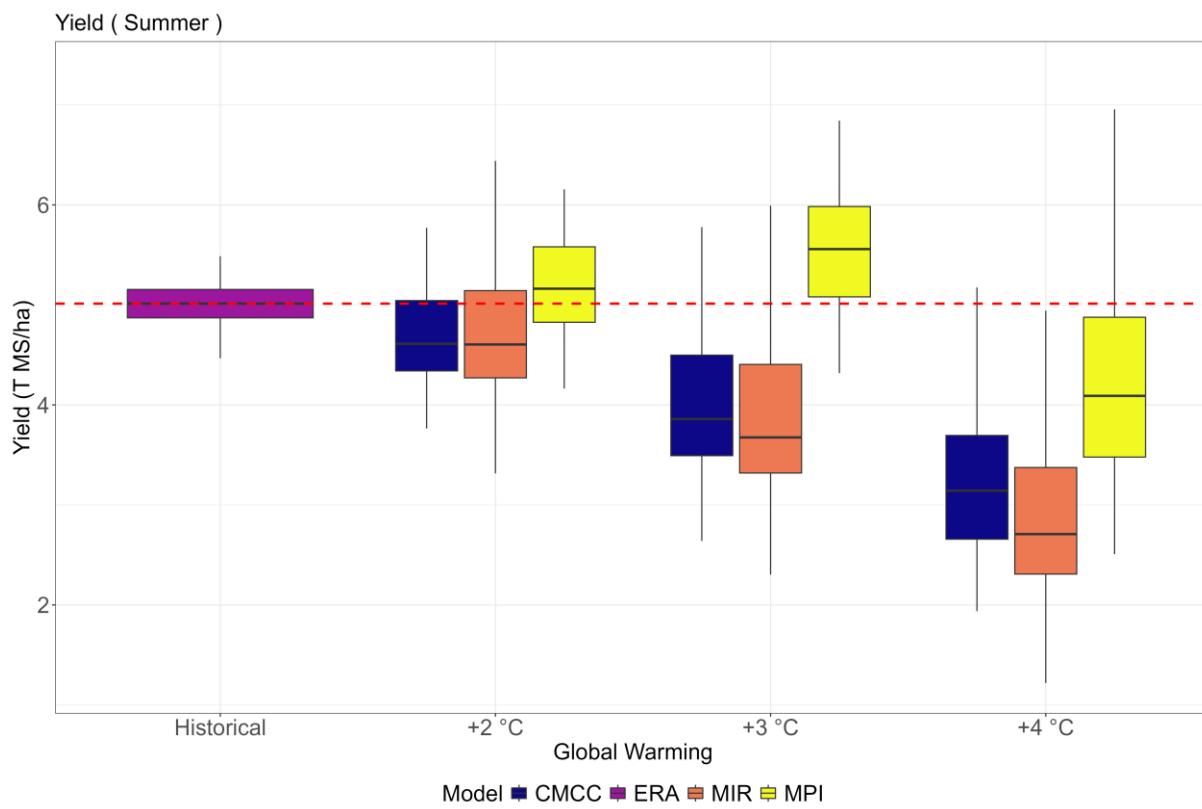


Figure 50: Boxplot du rendement de la pousse de l'herbe à l'été exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques.

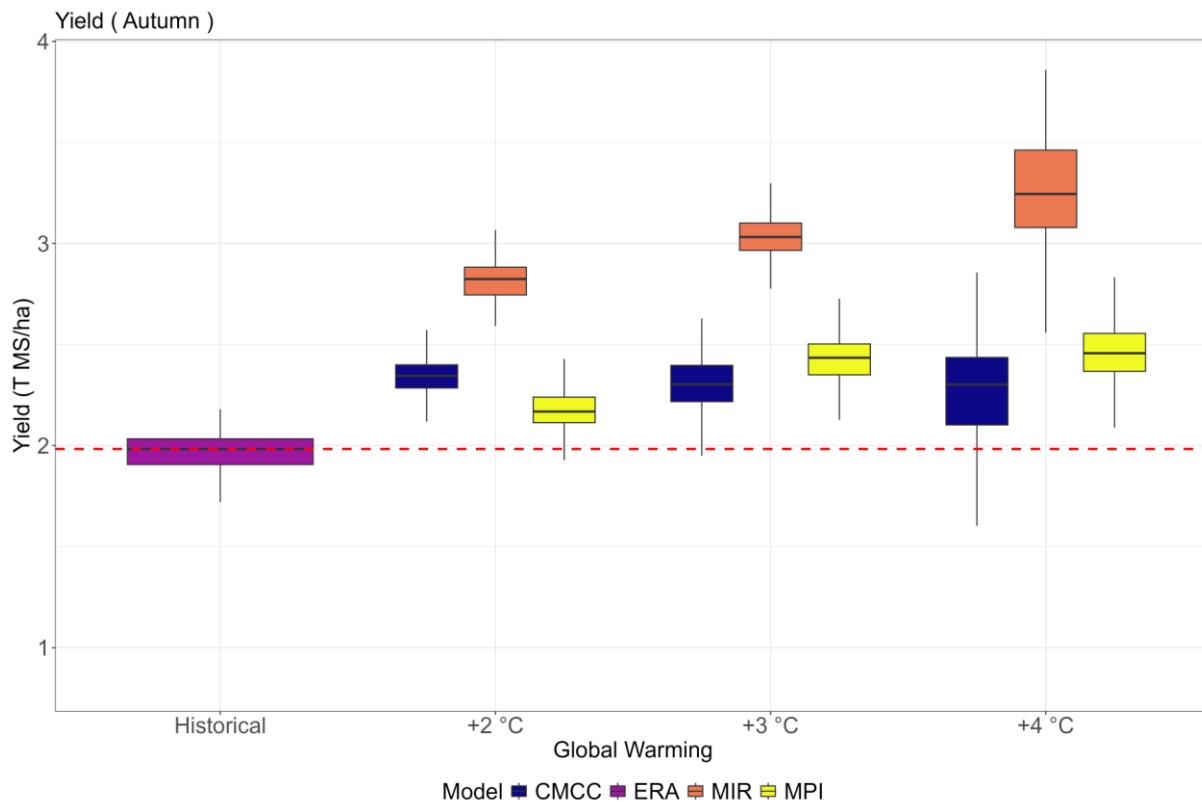


Figure 51: Boxplot du rendement de la pousse de l'herbe à l'automne exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques.

Disparité régionale

Les tendances régionales de la pousse de l'herbe sur l'ensemble de la saison sont assez semblables, mais avec des intensités différentes. Ces tendances identiques ne sont toutefois pas le cas pour la zone Jurassique (Figure 47 et Figure 52). En effet dans le Jurassique selon le modèle CMCC, la quantité d'herbe produite sur la saison va chuter par rapport à la période historique et de manière importante sous 4°C. MPI et MIROC prédisent quant à eux une augmentation des niveaux de rendement, mais qui est moins importante que dans les autres régions agricoles. La région ardennaise semble la région qui aura la plus forte augmentation de rendement et surtout sous MPI et MIROC.

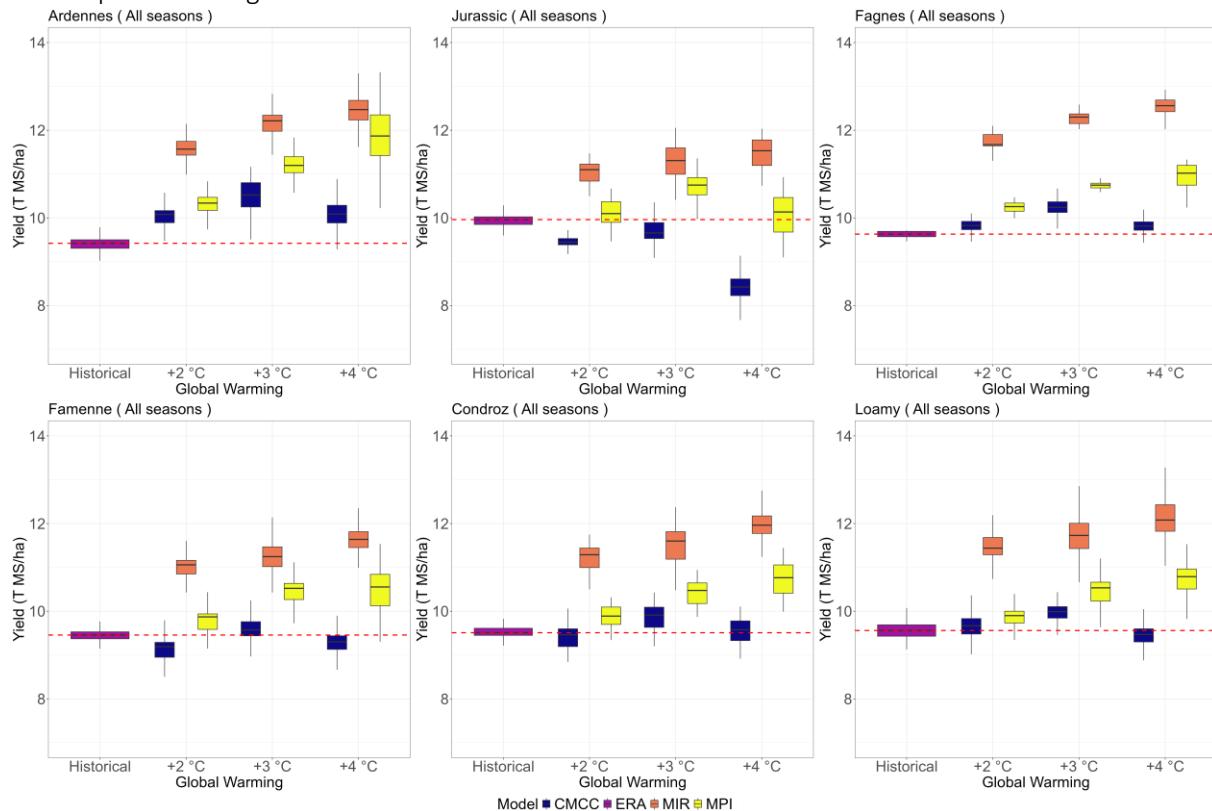


Figure 52: Boxplot du rendement en herbe pour les principales régions agricoles de Wallonie exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques.

La croissance de l'herbe au printemps semble peu impactée par la région agricole. Les différents modèles prédisent une augmentation de rendement par rapport à la période historique assez conséquente excepté sous MPI en +2°C qui a tendance à avoir une légère chute de rendement (Figure 53 et Figure 54).

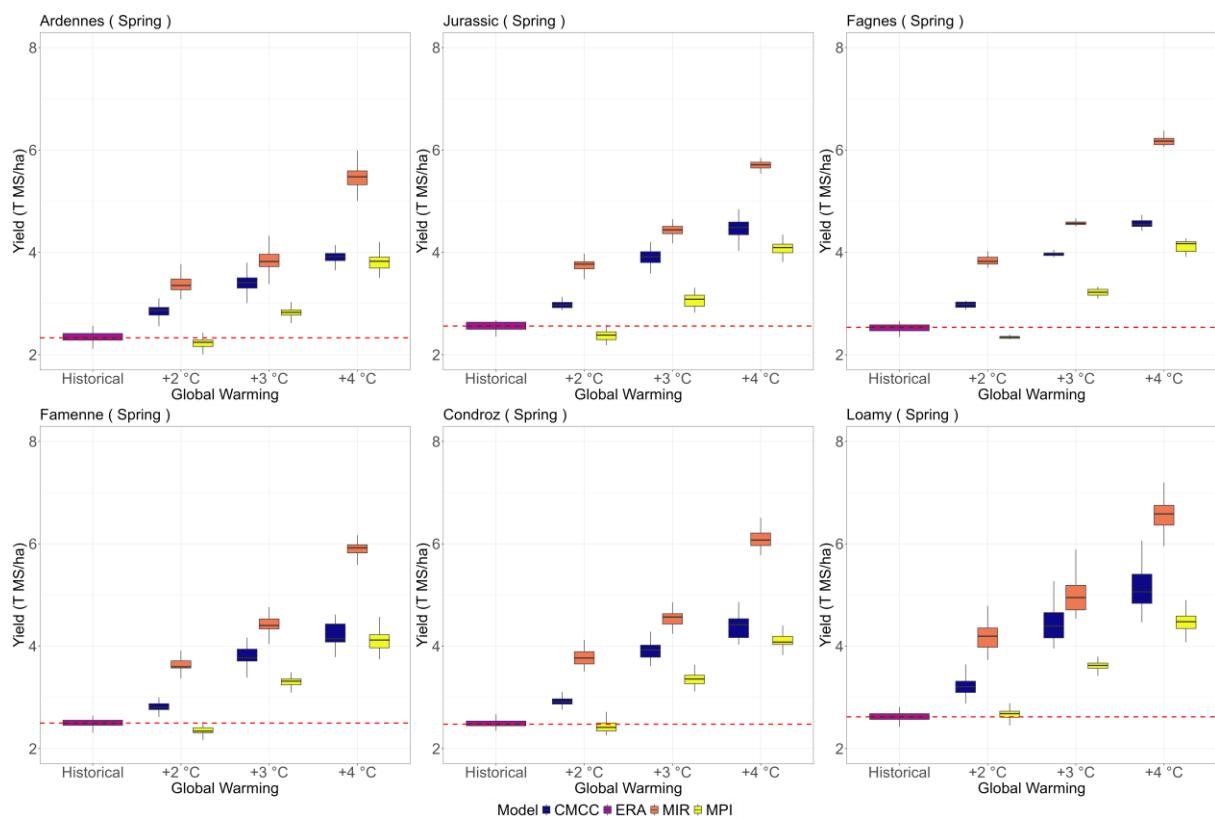


Figure 53: Boxplot du rendement en herbe sur la période du printemps pour les principales régions agricoles de Wallonie exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques.

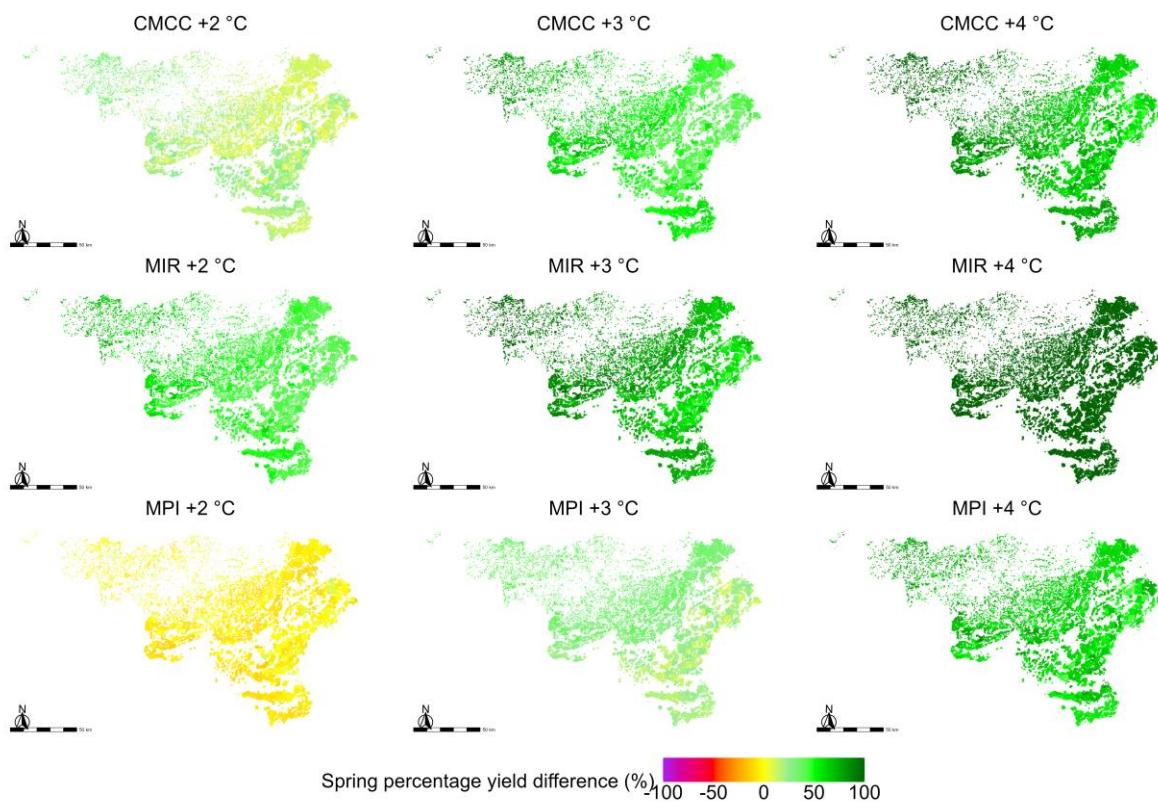


Figure 54: Cartes des différences de rendements relatives de la pousse de l'herbe au printemps en pourcentage pour les différents scénarios globaux de changement climatique et des différents modèles de prédictions en fonction de la période historique. Une valeur supérieure à +100% est représentée en vert foncé.

La croissance de l'herbe sur la période estivale observe une disparité régionale importante surtout sous le modèle MPI en +4°C (Figure 55 et Figure 56). Sous ce scénario, la région ardennaise ne prédit pas de chute de rendement par rapport à la période historique tandis que les autres régions prédisent une chute de rendement. La région ardennaise, tous modèles confondus, est la région agricole qui prédit la plus faible chute de rendement. À contrario, la région jurassique semble être la région qui souffrira le plus du changement climatique pour la pousse de l'herbe en comparaison à son niveau de production historique.

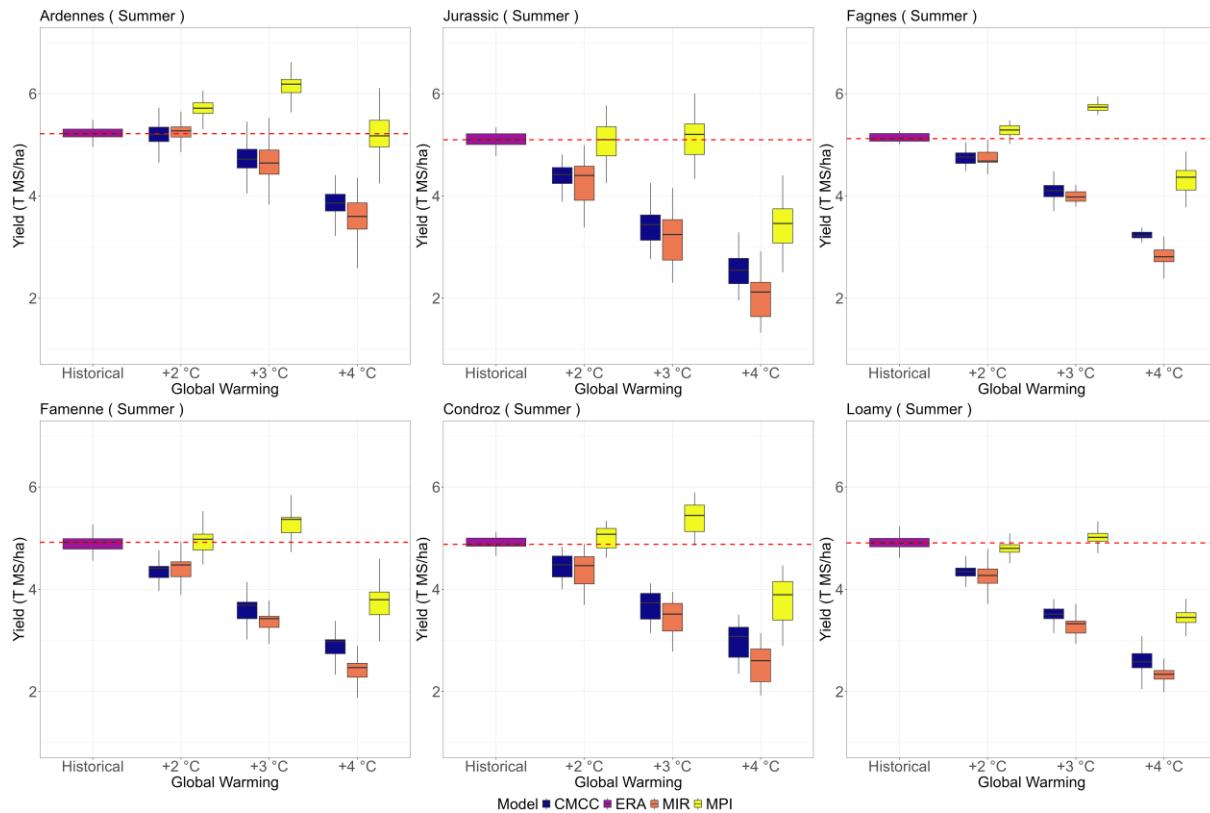


Figure 55: Boxplot du rendement en herbe sur la période de l'été pour les principales régions agricoles de Wallonie exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques.

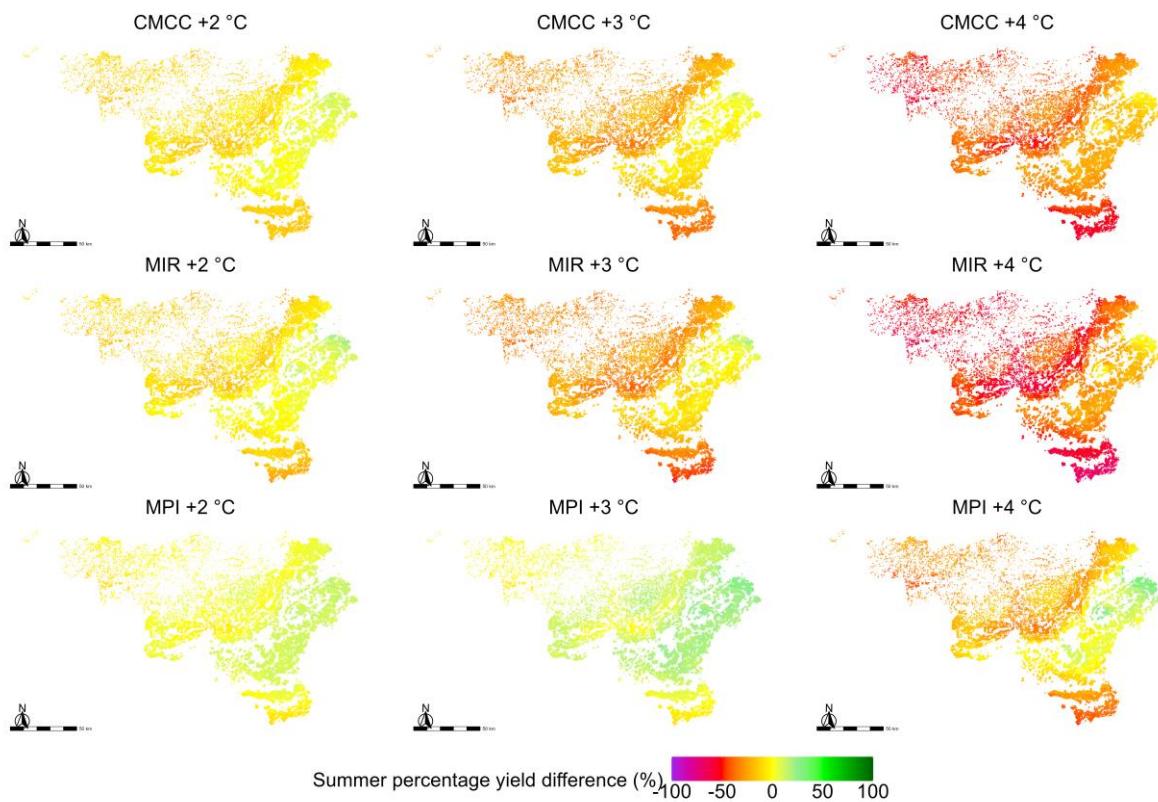


Figure 56: Cartes des différences de rendements relatives de la pousse de l'herbe à l'été en pourcentage pour les différents scénarios globaux de changement climatique et des différents modèles de prédictions en fonction de la période historique.

La période automnale aura tendance à suivre les disparités régionales déjà observées en été. La région ardennaise est la région qui profitera le plus du réchauffement climatique sur cette période. La région Jurassique est la région qui est la plus variable selon le modèle climatique utilisé. En effet sous CMCC celui-ci prédit une augmentation du rendement en herbe en +2°C, une augmentation plus faible en +3°C et une chute de rendement assez conséquente en +4°C. Les modèles MPI et MIROC prédisent une augmentation de rendement qui est d'autant plus importante que le réchauffement climatique global est important. L'augmentation est par contre beaucoup plus importante sous MIROC que sous le modèle MPI.

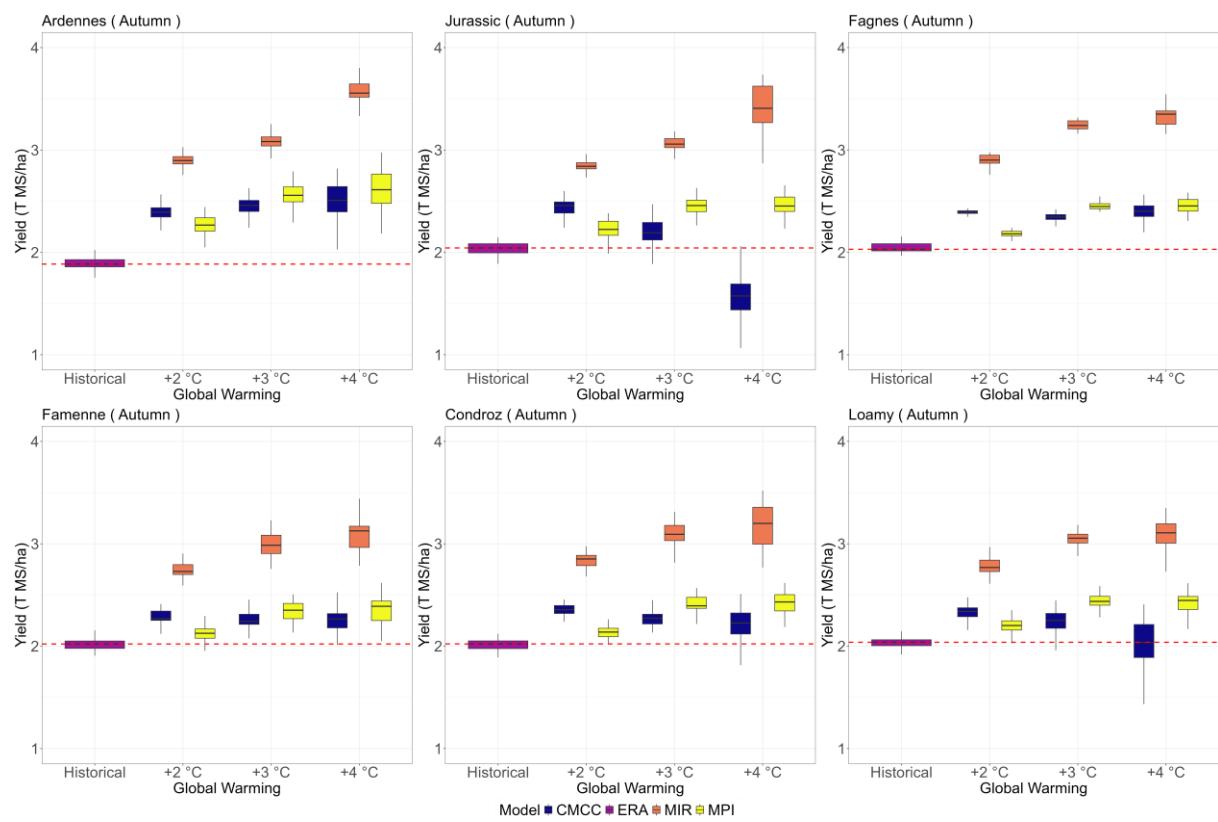


Figure 57: Boxplot du rendement en herbe sur la période de l'automne pour les principales régions agricoles de Wallonie exprimé en T de MS/ha en fonction du scénario de réchauffement global et des différents modèles climatiques.

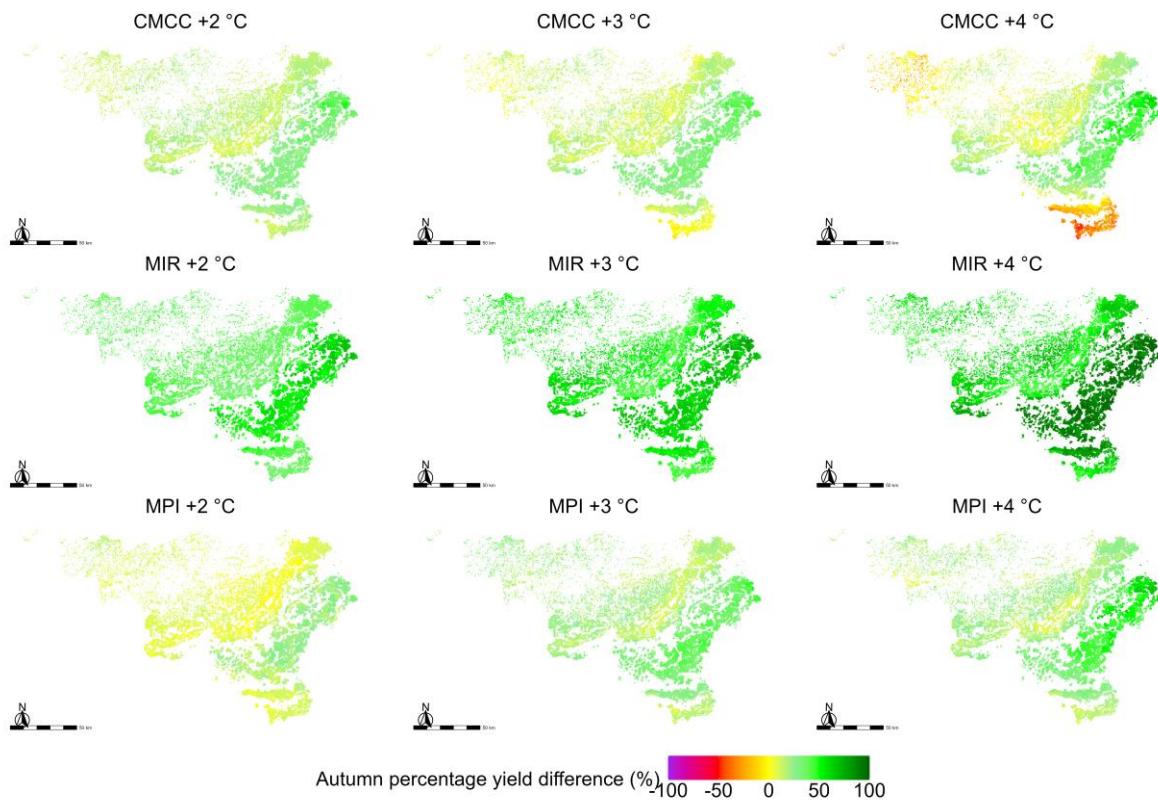


Figure 58: Cartes des différences de rendements relatives de la pousse de l'herbe à l'automne en pourcentage pour les différents scénarios globaux de changement climatique et des différents modèles de prédictions en fonction de la période historique.

Stabilité

La stabilité des rendements de l'herbe entre les années de la période historique est présentée pour la Région wallonne à la Figure 35. Celle-ci a une stabilité assez homogène entre les régions agricoles avec une stabilité principalement comprise entre 7,5 et 10. Par contre, avec le réchauffement climatique la stabilité n'évolue pas de manière homogène au sein de la Wallonie (Figure 60). De plus selon le niveau de réchauffement global et le modèle climatique, les réponses ne sont pas identiques. De manière générale, on peut observer une chute de la stabilité par rapport à la période historique. Celle-ci est la plus importante sous CMCC en +3°C. La région la moins touchée par la chute de stabilité sous le modèle climatique MPI et CMCC est la région ardennaise. Par contre sous MIROC, cela dépend le niveau de réchauffement global. En +2 et +3°C, les régions ardennaise et limoneuse semblent celles qui auront des chutes de stabilité les plus faibles, tandis que sous +4°C la région ardennaise semble être la zone avec la plus grande chute de stabilité par rapport à la période historique.



Figure 59: Carte de la stabilité des rendements de l'herbe entre les années de la période historique.

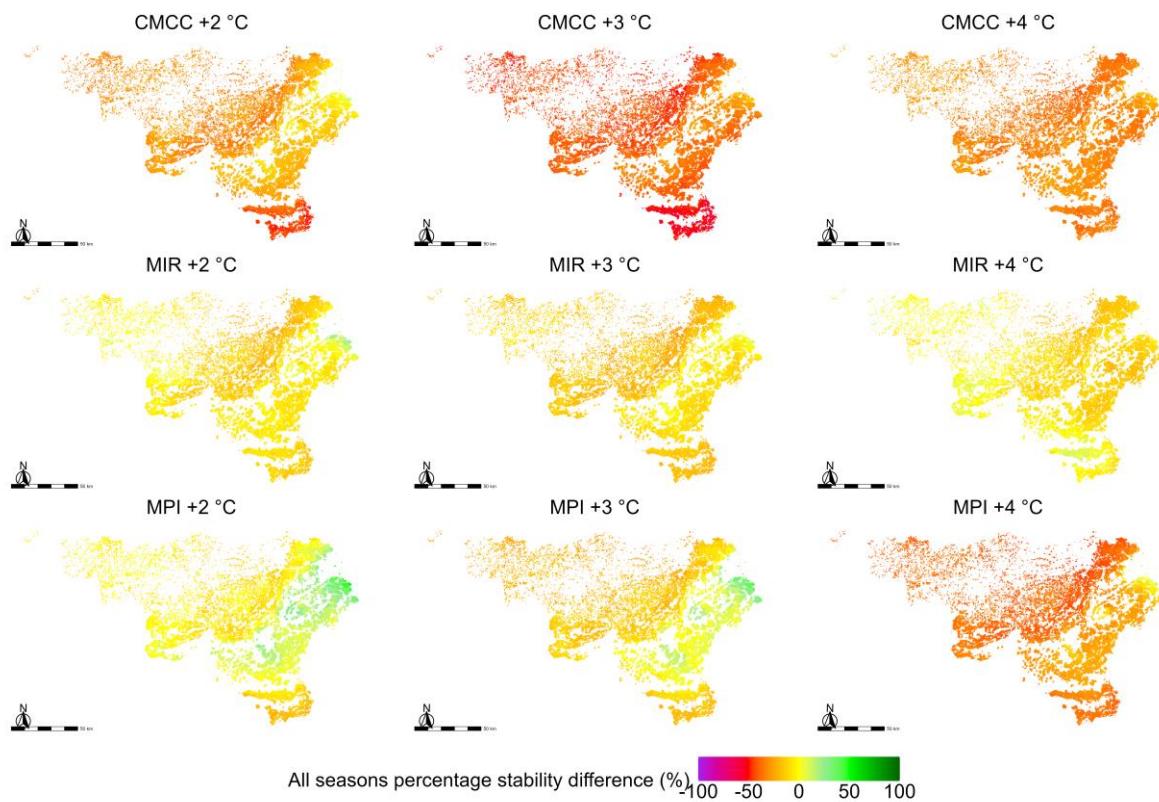


Figure 60: Cartes des différences relatives du niveau de stabilité de l'herbe entre la période de référence (1980-2010) et les scénarios futurs. Toutes les valeurs inférieures à -100% sont en mauve tandis que toutes les valeurs supérieures à + 100% sont en vert foncé.

Si on décompose l'analyse en saison de croissance de la pousse de l'herbe, des tendances différentes se reflètent selon la saison (Figure 61, Figure 62 et Figure 63). La chute de stabilité observée sur l'ensemble du territoire sur la période de croissance totale de l'herbe ne se retrouve pas sur la période printanière. En effet, le nord-ouest a tendance dans la majorité des modèles climatiques et des niveaux de réchauffement globaux à avoir une stabilité qui augmente légèrement par rapport à la période historique (Figure 61). Par contre, cela n'est pas le cas pour d'autres régions agricoles qui voient leurs niveaux de stabilité chuter par rapport à la période de référence (1980-2010) tel que le Condroz, la Famenne ou encore la zone jurassique. La réponse du changement climatique sur la stabilité de la région ardennaise semble quant à elle être fort modèle-dépendant; avec dans certains cas et sur certains sols une augmentation de la stabilité en comparaison à la période historique (MIROC +2°C et +3°C, certains sols isolés sous MPI +3 et +4°C), tandis que sous d'autres modèles tels que CMCC ou MPI, la stabilité par rapport à la période historique semble chuter.

Concernant la phase estivale, la stabilité semble chuter de manière drastique (-70 à -100%) par rapport à la période de référence sur une grande partie du territoire (Figure 62). Cette chute de stabilité est d'autant plus importante que le niveau de réchauffement global est important. De plus celle-ci est plus marquée sous les modèles climatiques CMCC et MIROC que sous le modèle MPI. Malgré une tendance générale assez homogène sur l'ensemble de la Belgique, la région ardennaise semble la région la moins touchée. Cette région est d'ailleurs sous MPI à +2°C la seule zone avec une stabilité assez proche de la période historique.

Enfin la période automnale a une différence de stabilité par rapport à la période historique qui dépend fortement du niveau de réchauffement global, du modèle et de la région agricole. Sous CMCC, le modèle a tendance à prédire une chute de la stabilité qui est d'autant plus importante que le niveau de réchauffement global est important. La zone ardennaise est celle qui a la stabilité qui va le moins changer par rapport à la période historique, avec des valeurs quasiment identiques en +2 et +3°C.

Toutefois sous +4°C, le modèle grassSim prédit une stabilité plus faible que sur la période historique. La région jurassique est quant à elle celle qui subira la plus forte chute de stabilité, et ce dès +2°C.

À contrario du modèle CMCC, le modèle MIROC prévoit une augmentation de la stabilité sur l'ensemble du territoire en +2 et +3°C par rapport à la période historique. Un gradient nord-ouest vers sud-est est observable, avec une augmentation faible de la stabilité au Nord-Ouest et une augmentation importante (jusqu'à +100% par rapport à l'historique) vers le Sud-Est. Sous +4°C par contre, seule la région ardennaise a une stabilité qui augmentera par rapport à la période historique.

Finalement, le modèle MPI quant à lui suit la même tendance que le modèle CMCC, mais avec une chute de la stabilité plus faible que celle prédictive par le modèle CMCC.

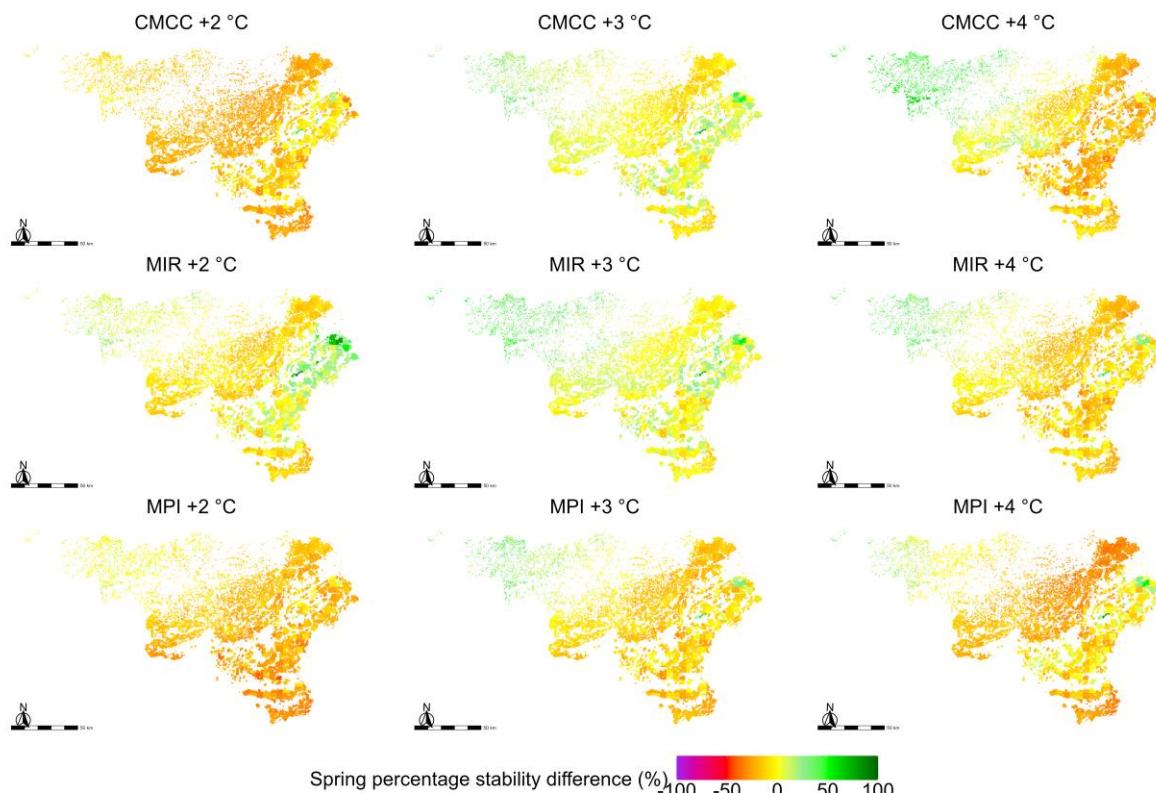


Figure 61: Cartes des différences relatives du niveau de stabilité de l'herbe sur la période printanière entre la période de référence (1980-2010) et les scénarios futurs. Toutes les valeurs inférieures à -100% sont en mauve tandis que toutes les valeurs supérieures à + 100% sont en vert.

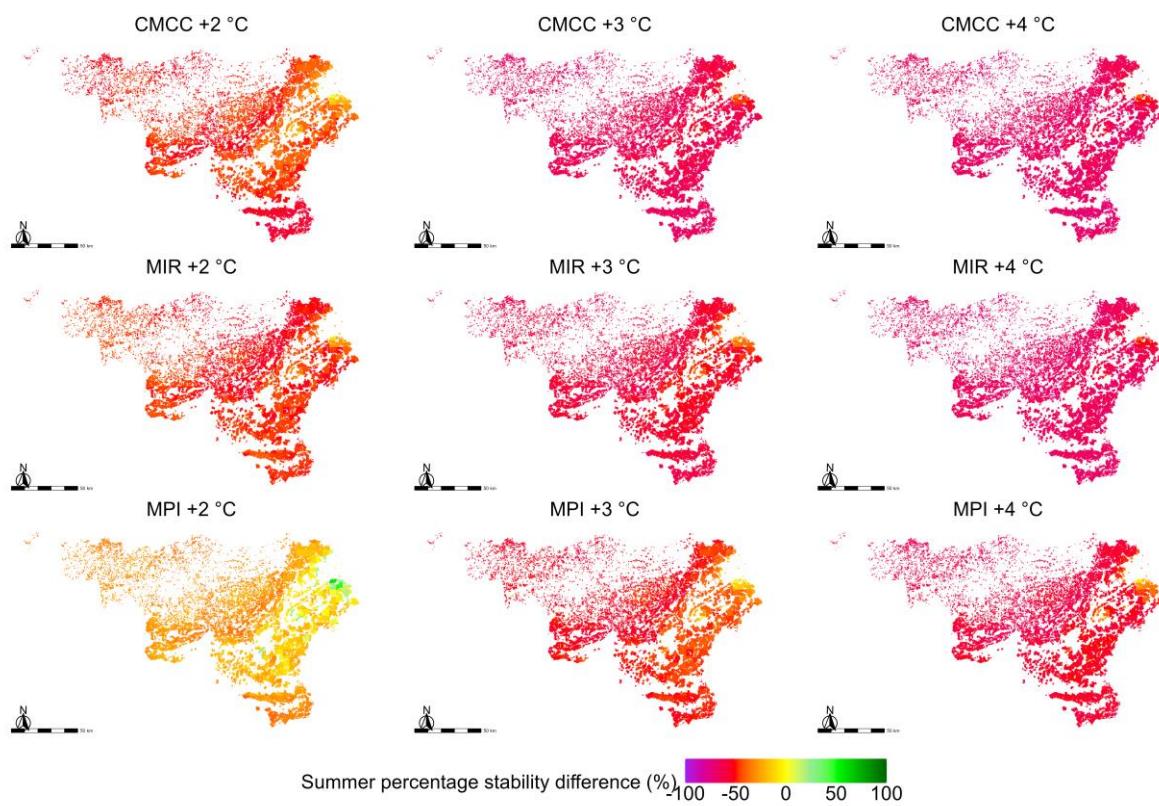


Figure 62: Cartes des différences relatives du niveau de stabilité de l'herbe sur la période estivale entre la période de référence (1980-2010) et les scénarios futurs. Toutes les valeurs inférieures à -100% sont en mauve tandis que toutes les valeurs supérieures à + 100% sont en vert.

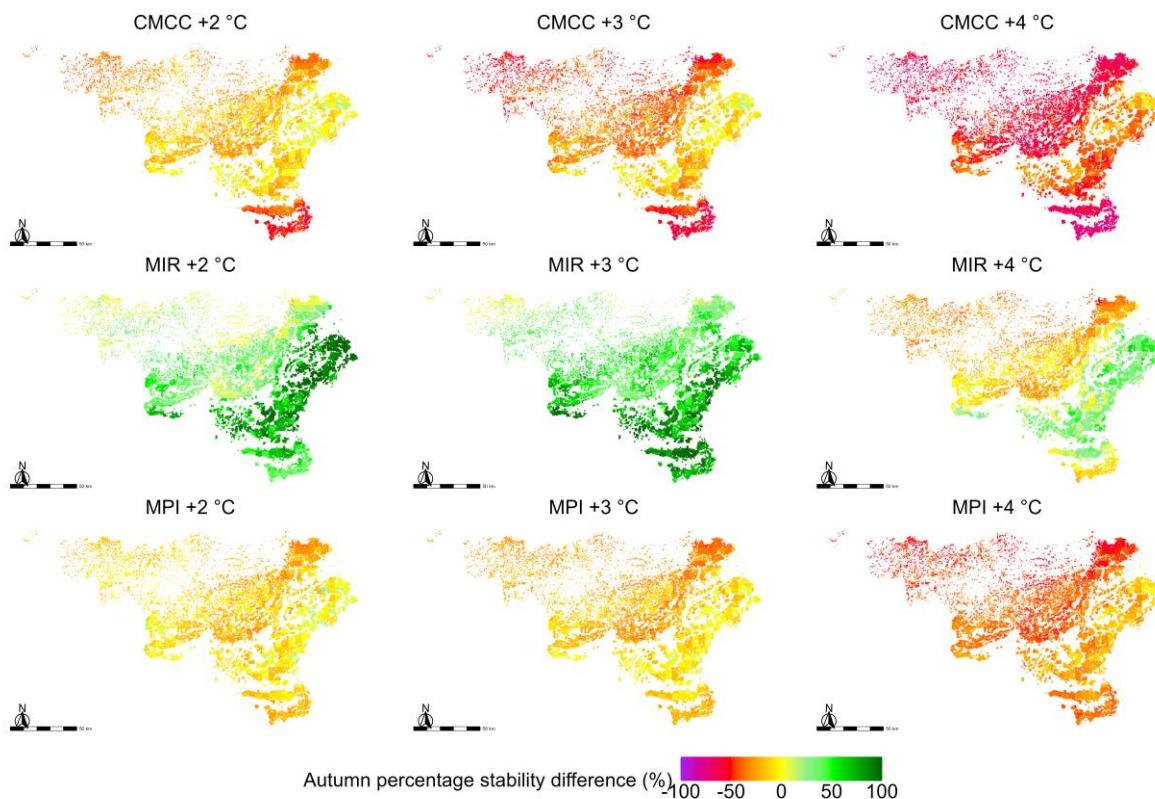


Figure 63: Cartes des différences relatives du niveau de stabilité de l'herbe sur la période automnale entre la période de référence (1980-2010) et les scénarios futurs. Toutes les valeurs inférieures à -100% sont en mauve tandis que toutes les valeurs supérieures à + 100% sont en vert foncé

6. Discussion

L'impact du changement climatique sur les grandes cultures est fortement variable selon la culture, le réchauffement global considéré et le modèle climatique utilisé. La non-concordance des modèles sur certaines cultures rend l'interprétation plus compliquée ainsi que son adaptation. Il est important de rappeler que, pour arriver à un scénario +2,+3,+4°C, les différents modèles climatiques considérés sont caractérisés par des plages temporelles différentes. Cela implique une concentration en CO₂ différente, impactant directement la réponse de la plante par l'effet fertilisant qu'il procure (ou par l'effet de modification de la conductance stomatique).

Un tableau synthétisant les tendances obtenues pour les différentes cultures, selon les modèles et le niveau de réchauffement global, est présenté au Tableau 5. Celui-ci permet de mettre en évidence si les tendances entre les modèles au sein d'un même réchauffement climatique global sont identiques ou non.

Tableau 5: Récapitulatif des tendances de l'évolution des rendements médians par rapport à la période historique pour les différents niveaux de réchauffement globaux et les différents modèles par culture.

	Réchauffement global								
	+2°C			+3°C			+4°C		
	CMCC	MIROC	MPI	CMCC	MIROC	MPI	CMCC	MIROC	MPI
Froment	↓	↓	↓	≈	↗	↓	≈	↗	≈

Colza	≈	↗	↘	↘	↗	≈	↘	↗	≈
Betterave	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Pomme de terre	de	↘	↘	↘	↗	↗	↘	↗	↗
Maïs	↘	↘	↗	↘	↘	↗	↘	≈	

Dans un futur proche, qui correspond à un réchauffement global de +2°C, la culture de froment d'hiver et de pommes de terre seront vraisemblablement caractérisées par une diminution de rendement. Concernant le maïs deux GCM sur trois prédisent une chute de rendement médian tandis qu'en colza, un modèle prédit un statu quo, le second une augmentation et enfin le troisième une diminution. Il n'y a que la betterave qui, dans un futur proche, devrait voir son rendement médian augmenter indifféremment du modèle GCM. Dans des avenirs plus lointains (scénario à +3°C et à +4°C) :

- Le modèle CMCC tend à prédire des diminutions ou au mieux des stagnations de rendements (sauf pour la betterave) ;
- Le modèle MPI tend à aboutir à des stagnations ou des augmentations de rendement ;
- Le modèle MIROC est, excepté pour le maïs, caractérisé par une augmentation des rendements.

Malgré ces augmentations de rendement pour une série de cultures selon certains modèles, les principales régions agricoles ne réagissent pas de la même façon entre elles. Une augmentation des rendements médians pour l'ensemble du territoire peut cacher des zones vulnérables qui subiront des chutes de rendements médians, comme par exemple pour le blé dans la zone jurassique, où, quel que soit le GCM et le niveau de réchauffement global, une chute des rendements est prédictive. La zone jurassique semble, selon les prédictions du modèle, être une région sujette à un impact négatif du réchauffement climatique sur les niveaux de rendements.

La stabilité des rendements va aussi être fortement impactée, avec des variabilités de niveaux de rendements qui vont s'accroître pour une partie des cultures, tandis que d'autres vont gagner en stabilité (comme pour le maïs, excepté pour le nord-ouest du pays). Les cultures à petites graines, telles que la betterave et le colza, sont les deux cultures qui ont une variabilité interannuelle beaucoup plus grande, avec des prédictions de rendement pour certaines années qui peuvent être nulles. En effet, la culture de colza a besoin d'humidité pour lever à une période où, avec le réchauffement climatique, l'humidité pourrait manquer. Ce manque d'humidité peut entraîner la mort de la plantule. Le même raisonnement peut être appliqué à la culture de la betterave lors de printemps très secs. La stabilité est par ailleurs fortement impactée par l'aspect régional. Souvent les zones de faibles potentiels de rendement verront leur stabilité s'accroître.

Les stress des différentes cultures vont évoluer avec le changement climatique. Les cultures d'hiver (colza et blé) risquent de subir des stress par excès d'eau à la phase végétative, plus importants dans le futur, avec un impact direct sur le rendement. La réponse des cultures de printemps, telles que le maïs et la betterave, aux différents stress est par contre moins claire sur l'impact sur le rendement. Ces cultures ont tendance à avoir un stress par excès d'eau qui va diminuer par rapport à la période historique, mais elles auront un stress par déficit hydrique qui pourrait augmenter selon certains modèles météorologiques (principalement CMCC). La culture de la pomme de terre, quant à elle, est sensible à deux stress majeurs : le stress par excès d'eau à la phase juvénile, ainsi que le stress hydrique lors du remplissage du tubercule. Le stress hydrique à la phase juvénile aura tendance à diminuer sous le réchauffement climatique, par contre, des modèles climatiques tels que le modèle CMCC



augmenteront le stress hydrique de la culture. Suite à ces différents stress présents pour les différentes cultures, l'agriculteur devra prendre en compte ces modifications de risques de stress pour minimiser l'impact sur le rendement, en installant par exemple un système d'irrigation pour les cultures telles que la pomme de terre et le maïs.

Concernant les prairies, celles-ci auront tendance à produire plus d'herbe sous le changement climatique. Toutefois, ces résultats médians à l'échelle annuelle cachent de grandes différences dans les périodes de croissance de l'herbe au sein même de l'année. En effet, les modèles MIROC et CMCC prédisent une chute importante de la production d'herbe en été, tandis qu'il y aura une croissance de l'herbe plus importante au printemps et à l'automne. Ces résultats ont donc des implications directes quant à la gestion du pâturage et de la gestion des stocks, avec des périodes en été où il risque de falloir apporter du fourrage aux animaux ruminants. De plus, la stabilité de la production risque de chuter, entraînant des niveaux de production annuels très variables, avec de très bonnes années suivies d'années avec une croissance de l'herbe plus faible, impliquant donc un besoin de gestion des stocks de manière pluriannuelle. La région ardennaise semble être la région qui va le plus bénéficier dans son ensemble du réchauffement climatique. Cette région, plus haute en altitude, a des températures moyennes plus faibles, permettant, dans les périodes de pic de chaleur, de ne pas stopper le développement de la pousse de l'herbe. En effet, le ray-grass arrête sa croissance au-dessus de 25°C.

Zones/cultures à risque

Les risques de vulnérabilité sont de plusieurs types. La variabilité de productions et les niveaux de production moyens. Ce tableau présentera selon les prédictions actuelles les zones à risques ainsi que les cultures pour un réchauffement global de +2°C (futur très proche) et à +3°C (futur plus lointain). Le plus 4°C n'est pas présenté pour plus de clarté.

Zone la plus à risque:

- Froment:
 - +2°C: Jurassique et Fagne-Famenne
 - +3°C: Jurassique et Fagne-Famenne
- Colza
 - +2°C: Limoneuse et argilo-limoneuse ainsi que Jurassique
 - +3°C: Limoneuse et argilo-limoneuse ainsi que Jurassique
- Betterave
 - +2°C: Jurassique (uniquement le modèle CMCC)
 - +3°C: Jurassique (uniquement le modèle CMCC)
- Pomme de terre
 - +2°C: Jurassique mais surtout pour des raisons de lieu de production la région limoneuse et sablo-limoneuse
 - +3°C: Jurassique (2 modèles sur 3) mais surtout pour des raisons de lieu de production la région limoneuse et sablo-limoneuse (uniquement modèle CMCC)
- Maïs grain
 - +2°C: Campine hennuyère et la région limoneuse et sablo-limoneuse
 - +3°C: Campine hennuyère et la région limoneuse et sablo-limoneuse
- Prairie
 - +2°C: région basse altitudes (à cause du stress thermique)
 - +3°C: région basse altitudes (à cause du stress thermique)

Culture la plus à risque

Il est difficile de déterminer une culture plus à risques qu'une autre toutefois la grande variabilité de niveaux de rendement de la betterave et du colza pourrait rendre ces cultures à risques puisqu'elles engendreraient des différences de niveaux de productions importantes impactant potentiellement le portefeuille de l'agriculteur.



A +2°C la pomme de terre mais aussi le froment et le maïs (uniquement prédit par deux cultures sur 3 dans ce dernier cas) ont tendance à avoir une chute de niveaux de rendement par rapport à l'historique.

Concernant les prairies, la période d'été est la période la plus critique de production de fourrage, avec une chute de production conséquente. Une adaptation par rapport aux périodes de pâturage et d'affouragement devra sans doute être réalisé. De plus il n'est pas à oublier que des différences de niveaux de production de fourrage interannuelle vont être présentes ayant un impact direct sur la gestion des stocks de ceux-ci.

Limites et perspectives de l'étude

Ce travail a permis de donner un premier diagnostic de la vulnérabilité de l'agriculture wallonne face aux changements climatiques attendus dans cette région. Ces résultats, étant basés sur des modèles et des postulats de base, nécessitent certaines précautions. C'est ainsi qu'une série d'améliorations pour des recherches futures sont proposées.

- Dans la base de données sol, une profondeur de sol constante a été utilisée. Celle-ci pourrait être remplacée par des données de profondeurs de sol estimées provenant de bases de données telles que WalonMap ou de l'ISRIC ;
- La base de données sol est principalement issues des données de l'ISRIC. Toutefois, la Wallonie n'a procuré que très peu de données à cette base de données internationale, la rendant moins précise dans cette région du monde. En contrepartie, elle offre une description de profil à la résolution 250mx250m, et ce pour les données d'entrée requises pour faire tourner les modèles de culture et prairie. Recréer une nouvelle base de données d'entrée à l'échelle wallonne pourrait donc améliorer davantage la qualité spatiale de l'information ;
- Certains fichiers plantes pourraient subir une calibration supplémentaire. En effet, certaines cultures telles que le colza ont été calibrées sur des jeux de données peu fournis. Un travail d'amélioration continue de ces fichiers est en cours et pourrait rendre la certitude des résultats des différentes cultures plus sûre. De plus, l'ensemble de la calibration est basé sur des essais dans les alentours de Gembloux ; avoir des données sur des zones agricoles différentes, telles que le Condroz, permettrait d'assurer une plus grande robustesse de paramétrisation, préliminaire à une bonne spatialisation des résultats ;
- Deux grands choix de simulation peuvent être réalisés : des simulations réinitialisées (comme ici), pour lesquelles toutes les simulations démarrent avec des données de départ identiques, et des simulations séquentielles (enchainement à travers les années). La première approche permet d'isoler l'effet de l'année. L'autre méthode permet de prendre en compte l'effet météorologique d'une année sur l'année suivante/la culture suivante et de faire varier des paramètres connus pour évoluer dans le temps long, tels que la teneur en matière organique. Cependant, cela requiert de définir des séquences culturales propres à chaque région (rotations), ce qui sortait du cadre de la présente étude, mais en constitue la prolongation directe. Il convient ainsi de préciser que les effets du changement climatique sur la matière organique ne sont pas à négliger, car les stocks de celle-ci dans les sols risquent de diminuer du fait d'une minéralisation intensifiée (Wiesmeier et al., 2016 ; Basso et al., 2018). Cette diminution de carbone dans les sols a des effets sur les simulations de rendement, dont les grandes tendances sont une possible surestimation des situations ou l'effet du changement



climatique sur les rendements des cultures est a priori positif, et une possible sous-estimation des pertes de rendements des cultures dans les situations où les effets du changement climatique sont a priori négatifs (Basso et al., 2018) ;

- Les modèles prennent en compte l'effet fertilisant du CO₂ il n'est pas exclu que celui-ci soit surestimé par le modèle. En effet, certains chercheurs ont prouvé qu'une exposition à une concentration élevée en CO₂ avait tendance à diminuer la densité stomatique des feuilles (Gray et al., 2000), contrebalançant la capacité d'assimilation du CO₂.

Deux autres limites de l'étude sont indépendantes des hypothèses posées pour conduire les simulations, mais sont toutefois liées à l'emploi général du modèle mécanistique STICS :

- L'ensemble des stress biotiques (relatifs aux bioagresseurs) n'est pas simulé par le modèle STICS en l'état. Or, ceux-ci pourraient augmenter avec l'augmentation des températures (Schneider et al., 2022). Pour pouvoir prendre en compte les stress biotiques, il faudrait réaliser un couplage de modèles afin d'estimer les pressions biotiques qu'il pourrait y avoir (e.g. MILA-STICS pour simuler l'effet des maladies fongiques) ;
- Le modèle STICS ne prend pas en compte l'effet érosif des pluies et les risques engendrés de coulées de boue. Les dégâts liés à ces aléas climatiques sur les cultures ne sont donc pas simulés. Toutefois, la partie sol du projet AWAC donne des informations supplémentaires quant au risque d'érosivité des pluies et doit donc servir de données complémentaires à ce rapport (cfr. Rapport Volet 3 – eau et sol). De plus, disposer d'informations sur la portance des sols lors des interventions culturales pourrait être une information importante. En effet, cette information n'est pas prise en compte pour les opérations de semis, récoltes et autres interventions dans le modèle STICS. D'autres modèles relatifs à la portance pourraient être croisés avec ces résultats pour envisager le risque d'impossibilité de réaliser certaines opérations culturales, dans les fenêtres climatiques disponibles, comme cela a pu se réaliser durant l'automne 2023 et l'année 2024.

Finalement, l'une des menaces futures sur la sécurité alimentaire est la synchronisation, au niveau régional et mondial, de rendements faibles à cause d'une année climatique extrême ayant lieu à grande échelle et/ou sur plusieurs spéculations à la fois. Ce risque de synchronisation n'a pas été étudié, mais il est important de le garder à l'esprit, comme mentionné par Kornhuber et al. (2023).

7. Annexes



Figure 64: Différentes régions agricoles de Wallonie. (EAW_source : DA_SPW ARNE- SPW-2024)

8. Bibliographie :

Basso B. et al., 2018. Soil Organic Carbon and Nitrogen Feedbacks on Crop Yields under Climate Change. Agricultural & Environmental Letters, 3(1):180026. doi:10.2134/ael2018.05.0026. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/ael2018.05.0026>.

Beaudoin N. et al., editors, 2023. STICS soil-crop model: Conceptual framework, equations and uses. éditions Quae. doi:10.35690/978-2-7592-3679-4. Accepted: 2023-11-14T12:18:30Z.

Brisson N. et al., 2003. An overview of the crop model stics. European Journal of Agronomy, 18(3-4):309–332. doi:10.1016/S1161-0301(02)00110-7.

Coucheney, E., Buis, S., Launay, M., Constantin, J., Mary, B., García de Cortázar-Atauri, I., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F., Andrianarisoa, K. S., Le Bas, C., Justes, E., & Léonard, J. (2015). Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. Environmental Modelling & Software : With Environment Data News, 64, 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.024>

Delandmeter, M., Léonard, J., Ferchaud, F., Heinesch, B., Manise, T., Faurès, A., Bindelle, J., & Dumont, B. (15 September 2023). A comprehensive analysis of CO₂ exchanges in agro-ecosystems based on a generic soil-crop model-derived methodology. Agricultural and Forest Meteorology, 340, 109621. doi:10.1016/j.agrformet.2023.109621



Delandmeter, M., Colinet, G., Pierreux, J., Bindelle, J., & Dumont, B. (27 July 2024). Combining field measurements and process-based modelling to analyse soil tillage and crop residues management impacts on crop production and carbon balance in temperate areas.

Fernandez-Ugalde, O; Scarpa, S; Orgiazzi, A.; Panagos, P.; Van Liedekerke, M; Marechal A. & Jones, A. LUCAS 2018 Soil Module. Presentation of dataset and results, EUR 31144 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2022, ISBN 978-92-76-54832-4, doi:10.2760/215013, JRC129926

Gray, J., Holroyd, G., van der Lee, F. et al. The HIC signalling pathway links CO₂ perception to stomatal development. *Nature* 408, 713–716 (2000). <https://doi.org/10.1038/35047071>

Isbell, Forest, Dylan Craven, John Connolly, Michel Loreau, Bernhard Schmid, Carl Beierkuhnlein, T. Martijn Bezemer, et al. “Biodiversity Increases the Resistance of Ecosystem Productivity to Climate Extremes.” *Nature* 526, no. 7574 (2015): 574–77. <https://doi.org/10.1038/nature15374>.

Kokah, E.U., Knoden, D., Lambert, R., Himdi, H., Dumont, B., Bindelle, J., 2023. Modeling the daily dynamics of grass growth of several species according to their functional type, based on soil water and nitrogen dynamics: Gras-Sim model definition, parametrization and evaluation. *Journal of Agriculture and Food Research* 14, 100875. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100875>

Kornhuber, K., Lesk, C., Schleussner, C.F. et al. Risks of synchronized low yields are underestimated in climate and crop model projections. *Nat Commun* 14, 3528 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38906-7>

Launay M. & Guerif M., 2005. Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 111:321–339. doi:10.1016/j.agee.2005.06.005.

Lenoir, A. (2024). Opportunité des outils numériques pour optimiser la fertilisation azotée du blé à l'échelle d'un territoire [Doctoral thesis, ULiège - Université de Liège]. ORBi-University of Liège. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/318782>
<https://hdl.handle.net/2268/318782>

Muller, F. (2024). Spatialisation d'un modèle de culture en vue de l'évaluation de la vulnérabilité du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) face au changement climatique à l'échelle wallonne. (Unpublished master's thesis). Gembloux Agro Bio-Tech Université de Liège, Gembloux, Belgique. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/21448>

Pelleg D. & Moore A., 2002. X-means: Extending K-means with Efficient Estimation of the Number of Clusters. *Machine Learning*, p.

Schneider, L., Rebetez, M., & Rasmann, S. (2022). The effect of climate change on invasive crop pests across biomes. *Current Opinion in Insect Science*, 50, 100895-. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2022.100895>

Service public de Wallonie (SPW) - CARBIOSOL - Carbone organique total des Sols – Série (2022-01-31)<http://geodata.Wallonie.be/id/47e4ea34-fe00-4712-b795-4a85fdab7dd7>

Statbel, 2023. Chiffres clés de l'agriculture 2023. <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/chiffres-cles-de-lagriculture-2023>. Consulté le 19 mars 2024.



Statbel, 2023. Superficie agricole utilisée. In: Etat de l’Agriculture Wallonne. <http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorsheets/EAW-1.html>. Consulté le 19 mars 2024.

Wiesmeier, M., Poeplau, C., Sierra, C. et al. Projected loss of soil organic carbon in temperate agricultural soils in the 21st century: effects of climate change and carbon input trends. *Sci Rep* 6, 32525 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep32525>