QUEL CLIMAT FUTUR POUR NOS FORÊTS?

par Sylvain Marchi[1], Mathieu Jonard[2], Frédéric André[2], Nicolas Ghilain[1], Hugues Goosse[3]
1 Institut Royal Météorologique de Belgique, *Climate modeling and impact studies*.
2 Université catholique de Louvain, *Earth and Life Institute, Environmental Sciences*.
3 Université catholique de Louvain, *Earth and Life Institute, Earth & Climate*.

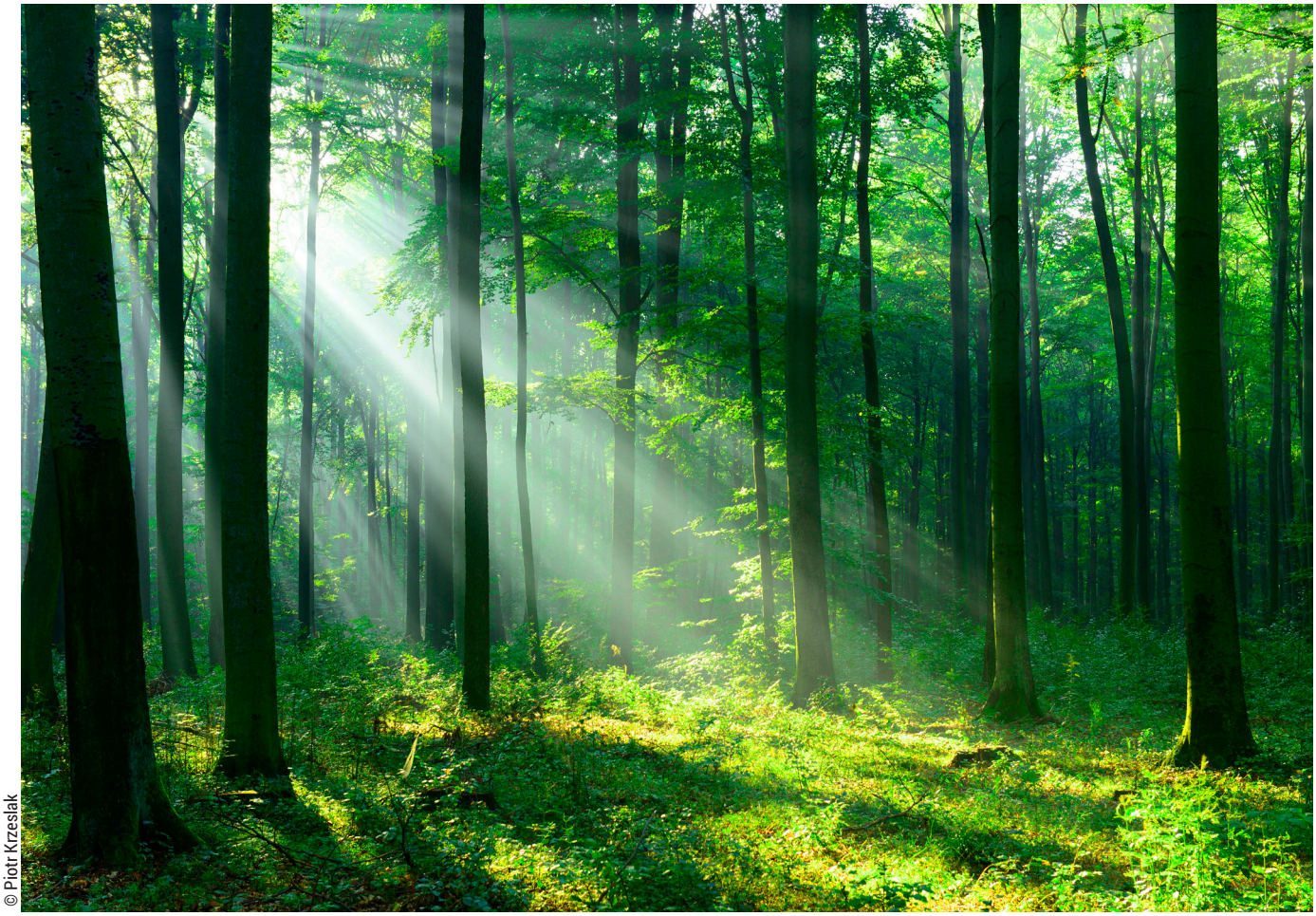
CONTEXTE

Selon l'Organisation météorologique mondiale, 2023 a été l'année la plus chaude jamais enregistrée dans le monde depuis l'ère préindustrielle (*World Meteorological Organization*, 2024). Les températures de surface ont ainsi été de 1,45°C supérieures à la période 1850-1900. Cela nous rapproche dangereusement des 1,5°C de réchauffement fixé par l'Accord de Paris. L'Europe n'échappe pas à l'augmentation des températures. Il s'agit même du continent qui se réchauffe le plus vite, deux fois plus vite que la moyenne globale (*World Meteorological Organization*, 2022). En Belgique, 2023 est la troisième année la plus chaude depuis le début des observations en 1833. Elle se classe juste derrière 2020 et 2022, où la température moyenne était 3°C supérieure à la période 1850-1900 (soit 12,2°C) à Uccle, le site de référence des observations météorologiques en Belgique (Centre Belge du Climat, 2024). Le dérèglement climatique ne concerne pas uniquement les températures. Nous entrevoyons ces effets sur les précipitations, une atmosphère plus chaude pouvant contenir davantage de vapeur d'eau. On observe ainsi pour Uccle une augmentation de la contribution des jours de fortes pluies au cumul annuel (Institut Royal Météorologique de Belgique, 2023). Cet effet augmente le risque d'inondation, comme nous l'ont rappelé les événements de 2021 dans la vallée de la Vesdre et de 2023 dans le Westhoek.

Ce portait, dressé pour 2023, illustre en partie les dérèglements climatiques auxquels nous sommes aujourd'hui confrontés. Il nous donne également un avant-goût des changements à venir. La dynamique forestière est, entre autres, conditionnée par le climat. De ce fait, elle est vulnérable aux changements climatiques. Anticiper ces changements et comprendre leur influence sur nos forêts est indispensable si l'on désire prendre les mesures de gestion qui s'imposent pour les préserver. Cet article vise à fournir des renseignements climatiques pertinents aux forestiers, les informant sur les changements climatiques auxquels les forêts wallonnes sont susceptibles d'être confrontés au cours du XXIe siècle.

OUTILS

Les modèles numériques du climat sont des outils privilégiés pour étudier l'évolution du climat. Ils reposent sur la formulation mathématique des mécanismes essentiels qui régissent le système Terre et sur la résolution numérique de ces équations. Ainsi, les principes fondamentaux de la thermodynamique et de la mécanique des fluides constituent la base de tous les modèles dynamiques. Si certains processus physiques, chimiques ou biologiques intégrés dans ces modèles sont bien compris, d'autres, moins bien connus, sont abordés à l'aide d'hypothèses qui varient d'un modèle à



© Piotr Krzeslak

l'autre. Chaque modèle peut adopter des stratégies numériques ou algorithmiques spécifiques pour les implémenter. Ces différences peuvent entraîner des variations dans les projections climatiques fournies par différents modèles. Il est donc essentiel de considérer les projections de plusieurs modèles pour tirer des conclusions solides sur les changements climatiques à venir.

La 6e génération du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP6) fournit un cadre unifié dans lequel des expériences communes à chaque modèle sont conçues pour comparer les résultats des modèles climatiques dans des conditions identiques et les mettre à l'essai. En particulier, la réponse des modèles climatiques aux perturbations d'origine humaine décrits par les scénarios socioéconomiques partagés (SSP) y est étudiée dans le cadre du projet ScenarioMIP (*Scenario Model Intercomparison Project*). Ces scénarios définissent des trajectoires possibles d'émissions (gaz à effet de serre, aérosols) et d'utilisation du sol, en lien avec des évolutions possibles des sociétés humaines. Dans le cadre du projet REGE+[1], les scénarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 ont été utilisés afin d'estimer l'impact de la réalisation d'un scénario sur la dynamique des peuplements en forêt wallonne. Ces quatre scénarios induisent un forçage radiatif (une mesure de la perturbation du bilan énergétique de la Terre par les activités humaines) de respectivement 2,6 Wm^{-2}, 4,5 Wm^{-2}, 7,0 Wm^{-2} et 8,5 Wm^{-2}, ce qui correspond à un réchauffement planétaire d'environ 1,8°C, 2,7°C, 3,6°C et 4,4°C pour la fin du siècle. Ce sont ces scénarios qui sont utilisés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC en français, IPCC en anglais) pour évaluer l'ampleur, les causes et les conséquences du changement climatique en cours.

Dans cette étude, nous utilisons onze modèles (ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1-5, CanESM5, CMCC-ESM2, INM-CM4-8, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0) parmi la trentaine de modèles disponibles participant au projet ScenarioMIP. Sauf mention contraire, les simulations utilisées ont fait l'objet d'une correction statistique préalable (*quantile mapping*) permettant de corriger certains biais systématiques de ces modèles sur base d'un produit observationnel développé à l'IRM afin de rendre l'analyse sur la Belgique plus fiable.

1 https://www.regeplus.be/

Figure 1. Dix sites forestiers étudiés dans le cadre du projet REGE+.

RÉSULTATS

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé l'évolution des précipitations, de la température, du rayonnement solaire et de la vitesse du vent en surface pour dix sites forestiers situés en Wallonie et sélectionnés comme cas d'étude dans le cadre du projet REGE+ (voir Figure 1). Ces sites couvrent les principaux types de forêts qui seront régénérés dans les 40 prochaines années en Wallonie. Les résultats sont présentés, sauf mention du contraire, pour les périodes de croissance (15 avril au 15 novembre) et de dormance (16 novembre au 14 avril) de la végétation. Les changements climatiques sont calculés relativement à la période 1976-2014 pour trois périodes dans le futur : 2015-2040, 2041-2070 et 2071-2100. Ces changements sont moyennés sur les dix sites forestiers.

Les précipitations, en moyenne annuelle, ne montrent pas de changements prononcés au cours du 21e siècle. Leur évolution indique une augmentation légère comprise entre 0 et 5 % pour la majorité des modèles avec peu d'effet du scénario sur les précipitations projetées. Cette description cache en réalité une disparité dans les changements à l'échelle saisonnière, avec des tendances de signes contraires attendues pour les périodes de dormance et de croissance de la végétation (Figure 2). Nous devons nous attendre à des hivers plus pluvieux et des étés plus secs. L'amplitude des changements est conditionnée par la sévérité du scénario. Néanmoins, il subsiste de larges incertitudes sur les changements projetés avec des fortes différences en fonction du modèle retenu. Par exemple, les modèles qui utilisent le scénario le plus pessimiste prévoient une diminution (augmentation) des précipitations en été (hiver) comprise entre 10 % et 50 % pour la période 2071-2100.

La diminution des précipitations estivales augmente le risque de stress hydrique des arbres (voir encadré). Il est donc essentiel d'évaluer l'effet de la diminution des précipitations sur la distribution des jours de pluie. Cet aspect est envisagé à la Figure 3 (page 34), où sont représentés les changements dans la fréquence des périodes de sécheresse de courte, moyenne et longue durées. On y voit pour les scénarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 une diminution des sécheresses de courte durée au profit des sécheresses de moyenne et longue durées. L'augmentation du nombre de jours sans pluie composant les sécheresses de longue durée est la résultante de l'augmentation de la fréquence de ce type d'événements, mais également de l'apparition de sécheresses de très longue durée encore jamais observées en Belgique. Alors que nous

LE STRESS HYDRIQUE DES ARBRES

Les arbres ont différents mécanismes d'adaptation au stress hydrique. Dans un premier temps, ils peuvent réguler les pertes d'eau par transpiration en fermant les stomates (petites ouvertures situées à la surface des feuilles permettant les échanges gazeux). Toutefois, quand l'atmosphère devient fortement desséchante suite à des températures très élevées et que cela se produit après une longue période de sécheresse, il se peut que la transpiration résiduelle de l'arbre (après fermeture des stomates) ne puisse plus être compensée par un prélèvement d'eau suffisant. Il se produit alors un phénomène d'embolie gazeuse (entrée d'air dans les vaisseaux conducteurs), ce qui endommage une partie du système hydraulique de l'arbre et peut conduire à un jaunissement prématuré des feuilles ainsi qu'à la mort de rameaux secondaires. Certains individus entrent alors dans une spirale progressive de dépérissement qui conduit à la mort de l'arbre. D'autres voient le volume de leur couronne se réduire suite à la chute des rameaux morts mais parviennent ensuite à récupérer petit à petit.

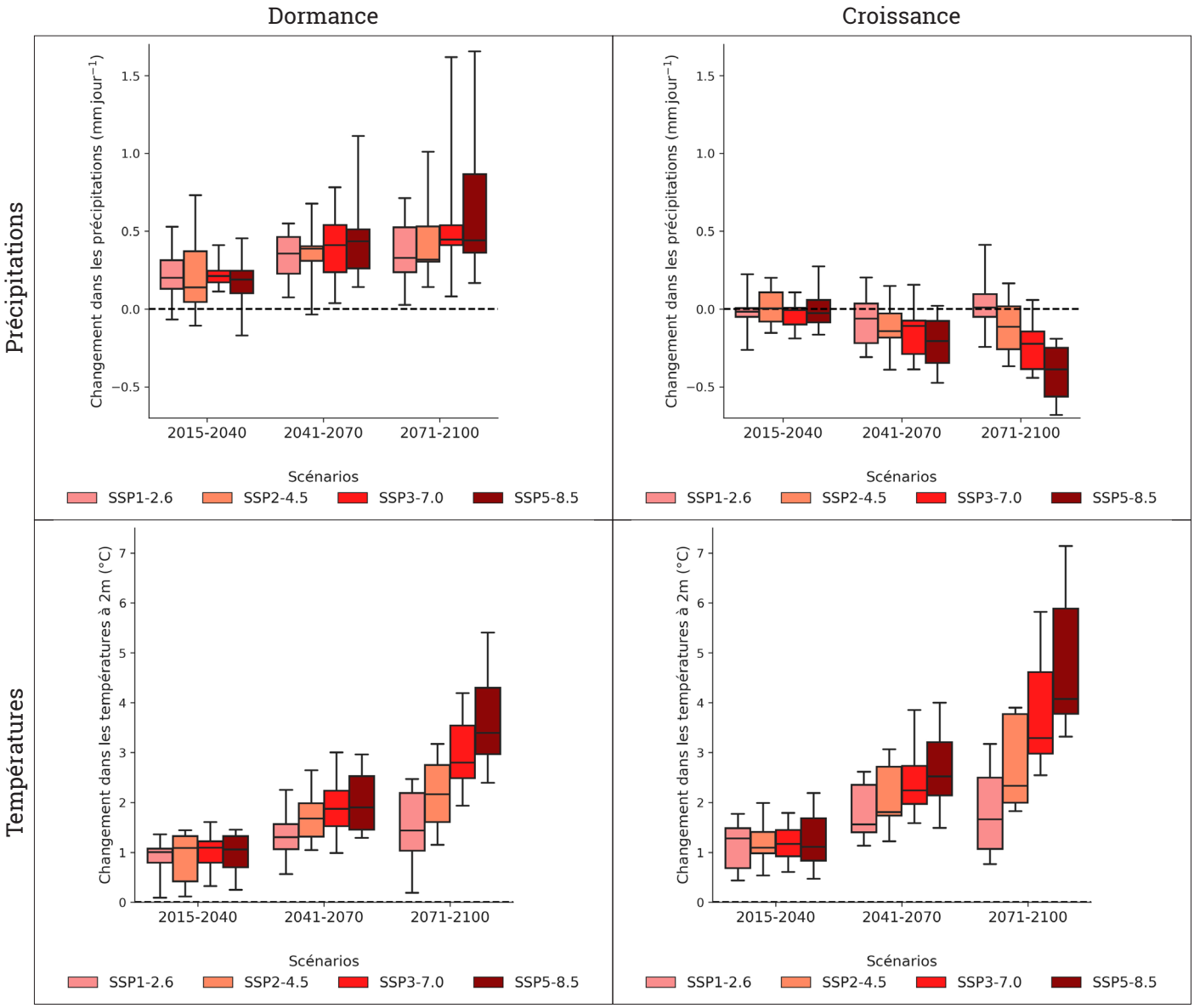


Figure 2. Changements moyens dans les précipitations (haut) et les températures à 2 m (bas) en période de dormance (gauche) et de croissance (droite) de la végétation simulés par onze modèles du climat pour quatre scénarios climatiques.

sommes touchés par une période de sécheresse de longue durée tous les 3 ans en moyenne, nous risquons, sur base du scénario SSP5-8.5, d'être confrontés à ce genre d'événements toutes les années sur la période 2071-2100. Toujours sur base de ce scénario et cette période, la longueur des sécheresses de longue durée passerait de 19,7 à 21,6 jours en moyenne. Enfin, la sécheresse la plus longue passerait de 44 jours à 66 jours, cette estimation se basant sur les cinq modèles qui simulent le mieux ce paramètre sur la période passée.

L'Europe est particulièrement touchée par l'augmentation des températures de surface. Il s'agit du continent qui se réchauffe actuellement le plus vite. Les projections climatiques du CMIP6 indiquent que l'Europe devrait continuer à se réchauffer plus vite que la moyenne globale au cours du 21e siècle. Pour les sites forestiers étudiés, la Figure 2 montre que l'ensemble des modèles projette une augmentation des températures de surface. L'effet du scénario sur les températures n'est visible qu'à partir du milieu du siècle, avec des températures plus élevées pour les forçages radiatifs plus intenses. Il est intéressant de remarquer que seul le scénario SSP1-2.6 permet une stabilisation des températures pour la fin du siècle. Il s'agit également du seul scénario limitant l'augmentation des températures à 2°C par rapport à la période 1976-2014. L'augmentation

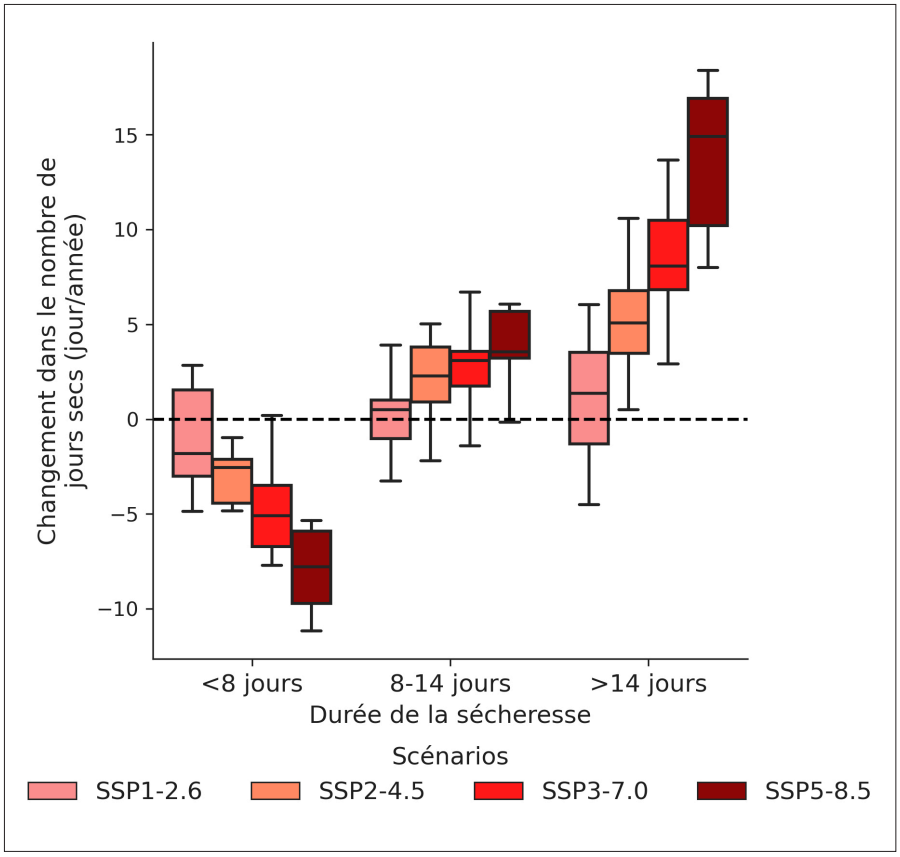


Figure 3. Changements dans la distribution du nombre de jours consécutifs sans pluie en été (juin, juillet et août) entre la fin du siècle (2071-2100) et la période présente (1985-2014). La distribution est constituée de trois catégories comptabilisant les sécheresses d'au plus une semaine, d'une à deux semaines et de plus de deux semaines. Une journée est considérée sans pluie si les précipitations cumulées ne dépassent pas 1 mm.

des températures touche les quatre saisons, l'été se distinguant par une augmentation plus prononcée.

L'augmentation des températures entraîne un allongement de la saison de végétation du fait d'un débourrement plus précoce et d'une sénescence des feuilles plus tardive. L'augmentation des températures à la sortie de l'hiver avance le débourrement des arbres (de Wergifosse, et al., 2020), mais également la date des dernières gelées. Alors que le premier effet participe à l'augmentation du risque de gelées tardives (gelées se produisant après le débourrement), le second effet diminue ce risque. En Wallonie, ces deux effets antagonistes conduiraient à une diminution du risque de gelées tardives dans le futur d'après le mémoire de fin d'études de Boris Borlon (Borlon, Évolution du risque de gelées tardives en forêt wallonne avec le changement climatique, 2022) (Borlon, Goosse, André, & Jonard, 2022). Par ailleurs, l'augmentation des températures en période de végétation est en moyenne favorable au métabolisme des plantes mais induit une consommation d'eau accrue. En revanche, les pics de chaleur, surtout s'ils sont combinés à un manque d'eau, peuvent conduire à une surchauffe des organes fragiles comme les feuilles qui peuvent alors être littéralement brûlées. Ce phénomène est accentué quand l'arbre réduit sa transpiration par manque d'eau, ce qui limite l'effet refroidissant de celle-ci.

Un indice utile à l'étude du stress thermique consiste à calculer le nombre de jours par année où la température dépasse 30°C (appelé jour chaud dans la suite). La Figure 4 montre comment cet indicateur évolue en fonction du scénario retenu pour la fin du siècle. Par rapport à la période de référence 1985-2014, les quatre scénarios prévoient une augmentation du nombre de jours chauds. En moyenne annuelle, ce nombre passerait de 3,4 jours (2,7 jours dans les observations) à 9,1 jours pour le scénario SSP1-2.6, 16,4 jours pour le scénario SSP2-4.5, 24,3 jours pour le scénario SSP3-7.0 et 33,5 jours pour le scénario SSP5-8.5. Les modèles simulent également un étalement de la distribution du nombre de jours chauds, induisant une plus grande représentation des années avec beaucoup de jours chauds. Ainsi, alors que pour 9 années sur 10 le nombre de jours chauds reste inférieur à 9 jours pour la période de référence (7 jours dans les observations), cette valeur monterait respectivement à 21 jours, 33 jours, 47 jours et 62 jours pour les scénarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5. Il est également à noter que le seuil des 30°C devrait être dépassé à de très rares exceptions au moins un jour chaque année pour chaque site pour les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5.

Dans le futur, les forêts wallonnes devraient faire face à une diminution des précipitations et à une augmentation des températures en été. Leur vulnérabilité est accrue lorsqu'elles sont simultanément confrontées à une vague de chaleur et une période de sécheresse. Les modèles prédisent une augmentation de la simultanéité de ces deux types d'événements dans le futur. De plus, la probabilité d'avoir un jour chaud en période de sécheresse augmente avec la durée de la sécheresse (de l'ordre de 2 % entre chaque catégorie) et la sévérité du scénario (de 5 à 10 % entre chaque scénario). Ainsi, pour le scénario le plus pessimiste

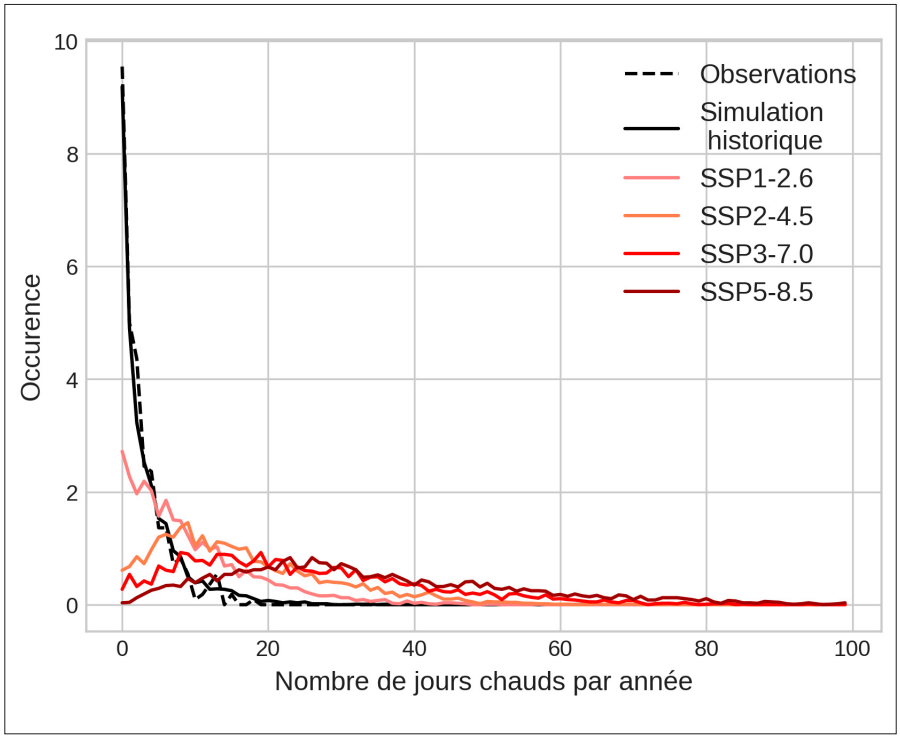


Figure 4. Distributions du nombre de jours chauds par année pour la période 1985-2014 (observations et simulation historique) et la période 2071-2100 (scénarios). Les distributions montrées sont moyennées sur les dix sites et, pour les simulations numériques, les onze modèles.

SSP5-8.5, les sécheresses de longues durées pourraient se composer d'environ 35 % de jours chauds à la fin du siècle pour un peu plus de 5 % sur la période passée.

Tous les modèles prévoient une diminution progressive de l'humidité relative au cours du 21e siècle (figure 5 - page suivante). Cette baisse est particulièrement marquée durant l'été, ce qui implique une augmentation de la demande évaporatoire pendant cette saison et, par conséquent, un stress hydrique accru pour les arbres. L'ampleur de cette diminution varie cependant considérablement d'un modèle à l'autre. Cet effet pourrait être atténué grâce à une plus grande efficience dans l'utilisation de l'eau (meilleure régulation stomatique) liée à l'augmentation de la concentration de CO2 dans l'atmosphère (Norby & Zak, 2011).

Le rayonnement solaire incident est une autre variable climatique d'intérêt. Il influence directement la photosynthèse et donc la production primaire. L'augmentation attendue du rayonnement solaire incident (voir la Figure 5), surtout en été, a donc un effet positif sur la croissance des arbres pour autant que l'atmosphère ne soit pas trop desséchante. Alors qu'une majorité de modèles s'accorde sur une augmentation du rayonnement solaire incident, l'amplitude des changements varie fortement d'un modèle à l'autre. Le scénario n'influence que de manière limitée les résultats. Cette augmentation de la lumière du soleil interceptant la surface a pour origine la réduction de certains aérosols émis par les activités humaines, notamment les dérivés de la chimie du soufre (Streets, Wu, & Chin, 2006). Les émissions de dioxyde de soufre ont été approximativement divisées par cinq entre 1980 et 2010 (Drugé, Nabat, Mallet, & Somot, 2021). Ces particules absorbent et diffusent la lumière, ce qui empêche une partie du rayonnement incident d'atteindre la surface. Moins d'aérosols favorise donc le passage de la lumière dans l'atmosphère, permettant le réchauffement de la surface. Les politiques strictes menées dans les années 90 visant à réduire ces aérosols dans l'air expliquent pourquoi les changements sont effectifs dès le premier tiers de la projection. Pour la période de croissance (l'été et l'automne), la tendance à l'augmentation du rayonnement solaire incident s'accentue au cours du siècle.

Les forêts sont également sensibles aux vents violents, qui induisent des chutes de branches et d'arbres (chablis) par déracinement ou cassure au niveau du tronc. La Figure 5 présentent les changements attendus dans la vitesse maximale journalière du vent à 10 m. Contrairement aux autres variables, la vitesse maximale journalière du vent n'a pas fait l'objet d'une correction préalable. Comme la correction appliquée est généralement identique pour la période actuelle et future, elle n'influence que marginalement le signal du changement climatique obtenu. Pendant la période de croissance, la plupart des modèles simulent une diminution de la vitesse maximale du vent. En période de dormance, aucune tendance claire ne se dégage avec des modèles simulant une augmentation du vent, d'autres une diminution. Les changements dans la vitesse maximale du vent (en termes de signe et d'amplitude) sont très incertains et dépendent avant tout autre chose du modèle utilisé. Aussi, ce ne sont pas nécessairement les mêmes modèles qui simulent toujours une augmentation (diminution) des vitesses pour les trois horizons de temps envisagés. Ceci traduit une grande variabilité multi-décennale dans l'évolution de cette variable, ce qui complexifie l'attribution des changements du vent au réchauffement climatique. Des tendances similaires ont également été trouvées pour les vitesses extrêmes du vent (99e percentile de la distribution des vitesses journalières maximales). Ces résultats suggèrent que l'in-

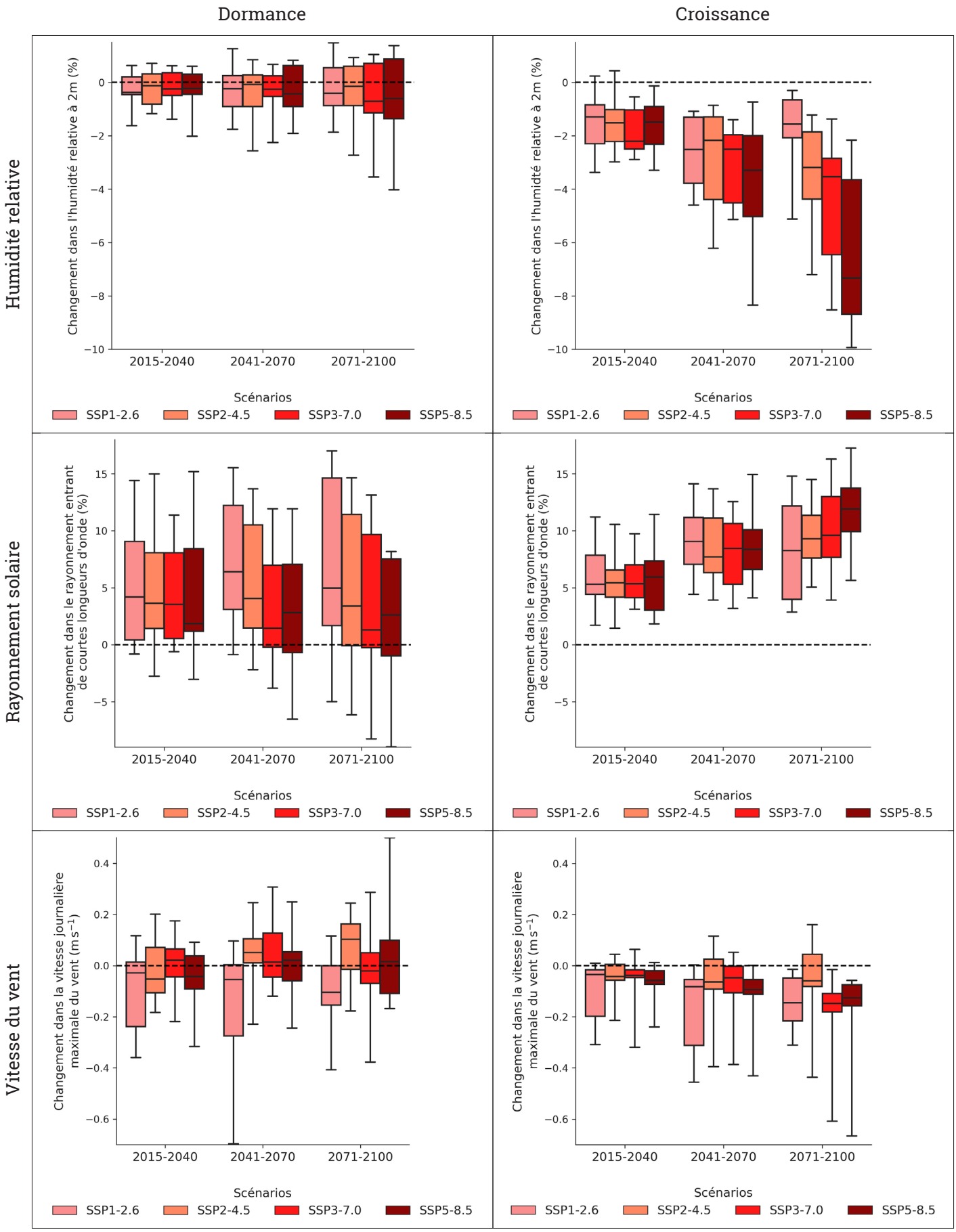


Figure 5. Changements moyens dans l'humidité relative à 2 m (haut), le rayonnement solaire incident en surface (changements relatifs) (milieu) et la vitesse journalière maximale du vent à 10 m (bas) en période de dormance (gauche) et de croissance (droite) de la végétation simulés par onze modèles du climat pour quatre scénarios climatiques.

fluence de la variabilité naturelle du climat sera dominante par rapport à un potentiel effet du changement climatique sur le risque de chablis.

CONCLUSION

Ces tendances ont été mises en évidence à partir des projections climatiques utilisées dans le cadre du projet REGE+. Les projections proviennent de modèles climatiques globaux et ont été corrigées localement grâce aux observations météorologiques. Elles sont actuellement utilisées pour une étude de simulation visant à analyser l'impact de la gestion, de l'évolution du climat et de la pression de gibier sur la dynamique à long terme des peuplements forestiers en Wallonie. Cette étude permettra de faire des recommandations sylvicoles plus précises sur les itinéraires sylvicoles à privilégier pour renforcer la résilience.

L'analyse des projections climatiques révèle des tendances claires dans l'évolution des températures et dans une moindre mesure des précipitations au cours du siècle, tant pendant les périodes de dormance que de croissance de la végétation. Il est donc conseillé d'augmenter la proportion d'essences capables de tolérer des températures plus élevées et un déficit de précipitations estivales. Bien que l'impact des autres variables analysées (humidité relative, rayonnement solaire et vitesse du vent) sur l'évolution de nos forêts ne soit pas à négliger, il est prématuré de conclure sur leur influence précise sur les peuplements forestiers.

Par ailleurs, de grandes incertitudes demeurent quant à l'ampleur des changements futurs, les divergences entre modèles étant parfois aussi importantes que le signal de changement climatique détecté. L'amélioration de ces modèles, notamment à travers les prochains exercices CMIP, devrait permettre de réduire certaines de ces incertitudes mais la variabilité naturelle d'une année à l'autre reste une caractéristique importante de notre climat limitant la précision des projections.

Il subsiste également des incertitudes importantes, parfois plus élevées que celles liées à la modélisation climatique, concernant la réalisation d'un scénario socio-économique donné. Ces incertitudes influencent directement l'évolution prévue des concentrations en gaz à effet de serre d'origine anthropique dans l'atmosphère. La réduction de ces incertitudes dépendra des mesures internationales mises en œuvre pour lutter contre le réchauffement climatique.

Par conséquent, il est difficile d'identifier avec précision quelles seront les essences les mieux adaptées dans le futur. Dans ce contexte, il est préférable de miser sur la diversification des espèces forestières plutôt que de se concentrer sur quelques essences « miracles ».

Bibliographie

- Borlon, B. (2022). Évolution du risque de gelées tardives en forêt wallonne avec le changement climatique. mathesis, Université catholique de Louvain. Récupéré sur http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:37023
- Borlon, B., Goosse, H., André, F., & Jonard, M. (2022, October). Le risque de gelées tardives va-t-il augmenter en forêt wallonne suite au changement climatique ? *Forêt.Nature, 53-57.*
- Centre Belge du Climat. (2024, mars). 2023 a été l'année la plus chaude jamais enregistrée dans le monde. Récupéré sur https://climat.be/actualites/2024/2023-a-ete-lannee-la-plus-chaude-jamais-enregistree-dans-le-monde
- de Wergifosse, L., André, F., Goosse, H., Caluwaerts, S., de Cruz, L., de Troch, R., … Jonard, M. (2020, July). CO2 fertilization, transpiration deficit and vegetation period drive the response of mixed broadleaved forests to a changing climate in Wallonia. *Annals of Forest Science, 77.* doi:10.1007/s13595-020-00966-w
- Drugé, T., Nabat, P., Mallet, M., & Somot, S. (2021, May). Future evolution of aerosols and implications for climate change in the Euro-Mediterranean region using the CNRM-ALADIN63 regional climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics, 21*, 7639–7669. doi:10.5194/acp-21-7639-2021
- Institut Royal Météorologique de Belgique. (2023). Tendances observées à Uccle. Récupéré sur https://www.meteo.be/fr/climat/changement-climatique-en-belgique/a-uccle/precipitations/indices-dextremes/jours-de-fortes-precip
- Norby, R. J., & Zak, D. R. (2011, December). Ecological Lessons from Free-Air CO2 Enrichment (FACE) Experiments. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 42,* 181–203. doi:10.1146/annurev-ecolsys-102209-144647
- Streets, D. G., Wu, Y., & Chin, M. (2006, August). Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition. *Geophysical Research Letters, 33.* doi:10.1029/2006gl026471
- World Meteorological Organization. (2022, November). Temperatures in Europe increase more than twice global average. Récupéré sur https://wmo.int/news/media-centre/temperatures-europe-increase-more-twice-global-average
- World Meteorological Organization. (2024). State of the Global Climate 2023. *State of the Global Climate 2023*. Geneva : United Nations.