



# Rapport sur l'évolution de la température de la Meuse sur une période de 20 ans (1999-2019) évaluée sur base des données du réseau de mesures homogène de la Commission Internationale de la Meuse

## Avertissement

*Nous attirons l'attention du lecteur sur les points suivants :*

*1/ Ce rapport proprement dit est très technique et non nécessairement accessible à tout un chacun, mais le résumé permet d'en comprendre les principales conclusions.*

*2/ Ce rapport s'est limité à l'analyse des données observées de température sur la Meuse sur 2 stations de mesure en Wallonie et 2 stations situées plus à l'aval (Pays-Bas). Les données sont disponibles auprès du service public de Wallonie et du Rijkswaterstaat.*

*3/ Les résultats n'ont pas été mis en perspective avec les données de la bibliographie relatives au changement climatique et en particulier avec les derniers rapports du GIEC (2022).*

*4/ Les résultats sont locaux et ne doivent pas être extrapolés au reste de la Meuse et de ses affluents.*

*L'utilisateur de tout ou partie des éléments du rapport devra mentionner la source suivante lorsqu'il les publie : Commission Internationale de la Meuse (Liège).*



# Rapport sur l'évolution de la température de la Meuse sur une période de 20 ans (1999-2019) évaluée sur base des données du réseau de mesures homogène de la Commission Internationale de la Meuse

## Résumé

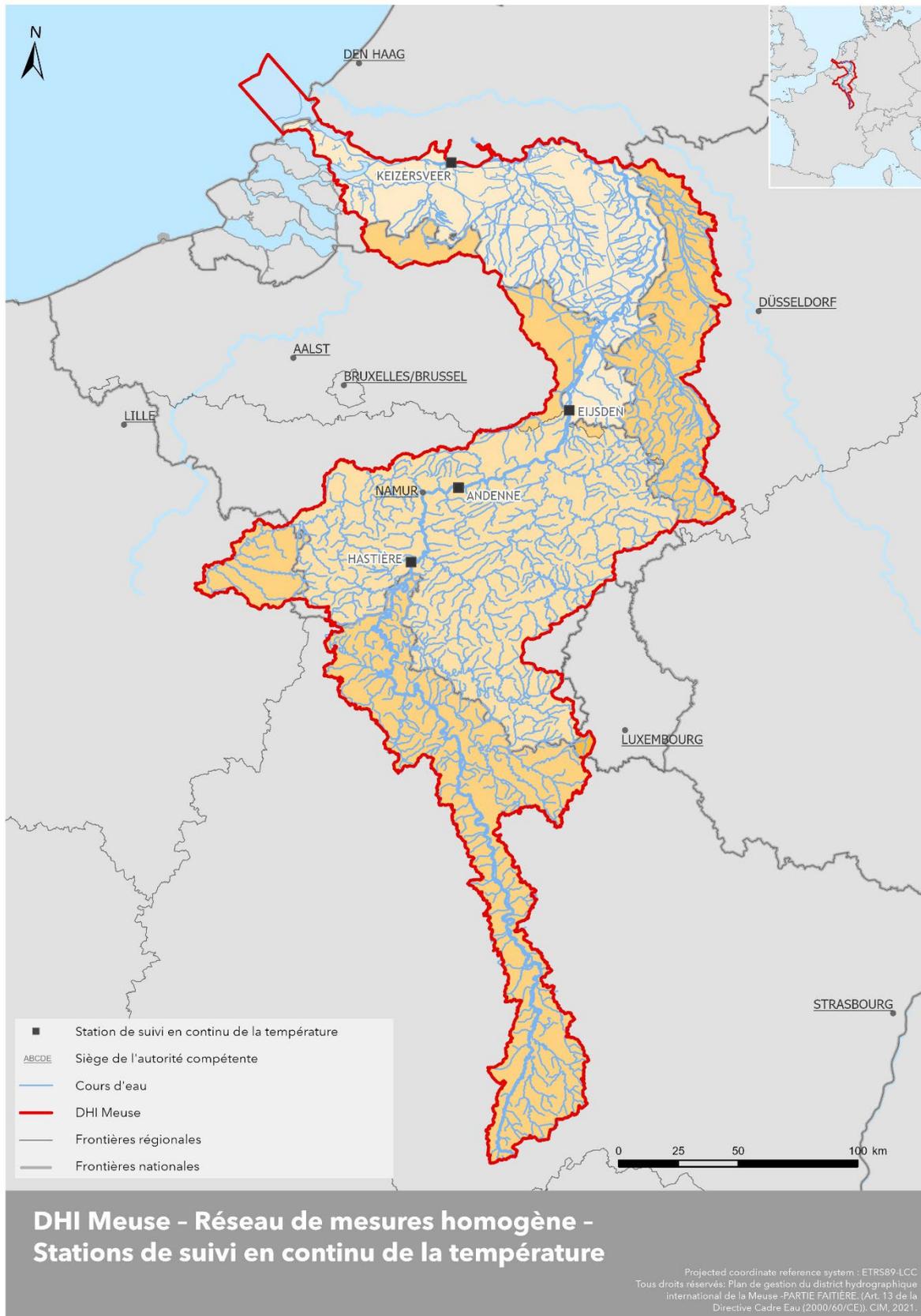
L'évolution de la température de la Meuse a fait l'objet d'une analyse statistique pour la période 1999-2019 sur base des données de mesures en continu de 4 sites, deux wallons et deux néerlandais. Les résultats de modélisation obtenus montrent que la température du fleuve a significativement augmenté sur la période considérée et ce, de près de 1°C. De plus, la température du fleuve remonte plus vite au printemps en fin de période (2019) qu'au début de celle-ci (1999), le maximum atteint en fin de période étant plus élevé, durant plus longtemps et étant atteint plus tôt dans l'année qu'en début de période. Cette augmentation est visible tant à l'échelle globale que nationale, avec une faible variation entre sites et saisons. Le nombre de jours où la température moyenne de la Meuse sur un moins un des quatre sites dépasse 25°C est brièvement analysé. Il n'y a pas de différence de température entre pays. Les données actuellement disponibles restent encore insuffisantes pour proposer des prédictions fiables concernant les années futures. L'ajout de nouvelles données, y compris françaises, devrait permettre de diminuer l'intervalle de confiance des prédictions et d'affiner les modélisations dans un rapport ultérieur.

## Introduction

**Mandat et historique de celui-ci.** Faisant suite à la décision des chefs de délégation du 28 juin 2013, approuvant les conclusions et actions proposées dans le document Maqua/13-15rev relatif au traitement de la température au sein de la Commission Internationale de la Meuse (CIM), le groupe de travail Monitoring (GT M) de la CIM a reçu pour mandat de « contribuer à l'évaluation du suivi des conséquences du changement climatique en collaboration avec le GT R, le GT A et le GT H ». Pour ce faire, il a pour tâche de :

1. Collecter et exploiter les résultats du réseau de suivi de l'évolution de la température des eaux de la Meuse sur la base des relevés à des sites de suivi en continu disposant déjà de chroniques de résultats de plusieurs années ;
2. Publier un rapport de l'évolution de la température pour une première période de mesure de 20 ans et ensuite tous les 10 ans (Mmonitor 15-13 et 16-1def).

**But du présent document.** Fournir un premier rapport sur l'évolution de la température du fleuve pour une période de 20 ans, sur base de quatre sites (deux en Wallonie, deux aux Pays-Bas) ayant fait l'objet d'un suivi durant au moins une partie de la période considérée, à savoir 1999-2019. Les affluents du district hydrographique de la Meuse ne sont actuellement pas pris en compte.



Carte 1 : Stations de suivi en continu de la température du RMH.



## Matériel et méthodes

**Stations de suivi.** Les quatre sites de suivi (carte 1) sont, de l'amont vers l'aval : Hastière (X = 182309, Y = 98660, Lambert 72), Andenne (X = 199729, Y = 131480, Lambert 72) (stations wallonnes), Eijsden ponton (N 50.8108 E 5.6949, coordonnées GPS) et Keizersveer (N 51.7202 E 4.8944, coordonnées GPS) (stations néerlandaises).

### **Appareils de mesure, précision, validation.**

- **Wallonie.** La mesure de température en continu s'effectue via le capteur température inclus dans la sonde pH (Capteurs température : Pt 100) du réseau Aquapol (réseau de mesure en continu de la qualité physico-chimique des cours d'eau wallons). Pour les sites qui nous concernent, les sondes sont placées à l'intérieur des stations et mesurent donc la température de l'eau qui est pompée dans le cours d'eau. Les données font l'objet d'une première validation algorithmique automatique, puis d'une validation manuelle.

- **Pays-Bas.** Les mesures de la température de l'eau sont effectuées dans le cadre du Réseau national de surveillance des eaux (Landelijk Meetnet Water). La température est mesurée en continu par une électrode en platine, placée dans le cours d'eau. Avec un galvanomètre, on mesure la résistance du fil, qui est corrélée à la température de l'eau de la rivière.

Voir : <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/monitoring/gegevensinwinning/chemisch-fysisch/temperatuur/>

### **Données disponibles.**

- **Wallonie.** Pour les deux stations wallonnes, la période de mesure s'étend du 01/01/1999 au 31/12/2019, à raison d'une donnée toutes les 15 minutes. Une telle masse d'information n'étant pas nécessaire pour mettre en évidence une évolution pluriannuelle, une moyenne quotidienne fut calculée sur cette base (données brutes reprises au tableau 1 disponible au secrétariat), générant ainsi un total attendu de 15340 données pour les deux sites, soit 7670 données attendues par station correspondant au nombre de jours de la période. Le nombre de données effectivement disponible s'avère de 6895 à Hastière (89,9% des données attendues) et 6470 à Andenne (84,3% des données attendues). En effet, suite à des problèmes techniques, les mesures furent interrompues plusieurs fois sur la période 1999-2019 soit pour un des deux sites, soit pour les deux sites à la fois (se marquant dans les tableaux originaux par toutes les valeurs = 0 ou, pour 3 dates à Hastière, par une ligne totalement blanche). Ces périodes d'interruption correspondent à 775 jours d'interruption sans mesure à Hastière et 1161 jours d'interruption sans mesure à Andenne, donc à un total de 1200 jours avec des mesures manquantes sur au moins une des deux stations.

- **Pays-Bas.** Pour les deux stations néerlandaises, la période de mesure s'étend du 14/01/2013 à Eijsden et du 21/01/2013 à Keizersveer au 31/12/2019, à raison d'une donnée toutes les secondes, moyennées sur 10 minutes. Une telle masse d'information n'étant pas nécessaire pour mettre en évidence une évolution pluriannuelle, une moyenne quotidienne fut calculée sur cette base (tableau 1 disponible au secrétariat), générant ainsi 2538 données à Eijsden et 2535 à Keizersveer.



**Amélioration du jeu de données wallon.** Si l'on réalise un graphique portant la température moyenne annuelle (calculée sur base de ces moyennes quotidiennes) en fonction de l'année afin de visualiser une éventuelle évolution, on note immédiatement d'importantes baisses des moyennes annuelles à Hastière en 2011-2012 et à Andenne en 2014-2015 (Fig. 1). Ces baisses sont artéfactuelles, liées aux nombreuses données manquantes (remplacée par la valeur 0) pour ces deux stations durant les périodes en question.

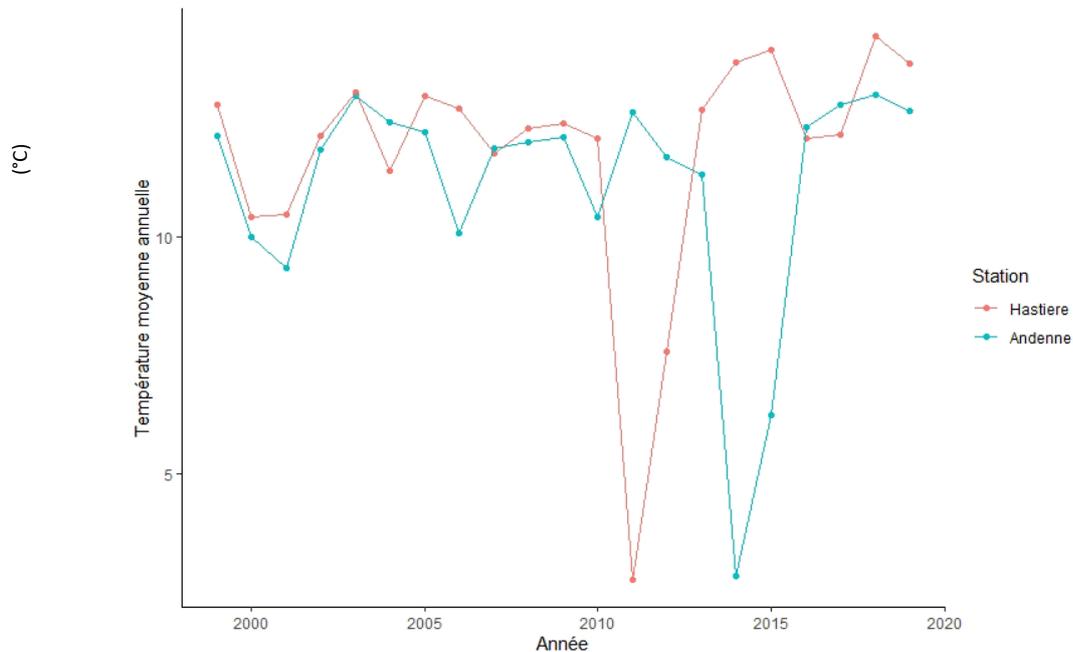


Fig. 1. Température annuelle moyenne de deux sites wallons pour la période 1999-2019 : données brutes.

Dans la mesure où l'on admet que les températures enregistrées à Hastière et à Andenne devraient varier de manière assez comparable, chaque donnée manquante sur un site wallon sera remplacée par la valeur observée sur l'autre site le même jour lorsque cette valeur est disponible.

Il reste un total de 116 jours sans données de température, aucun des deux sites wallons n'en disposant à la date en question. Les données manquantes étant étalées sur de courtes périodes de temps (de 1 à 12 jours consécutifs), une moyenne pondérée progressive basée sur les données existantes encadrant la période manquante a été générée.

Si l'on réalise un nouveau graphique de température annuelle moyenne en fonction de l'année sur base du jeu de données ainsi modifié, on obtient la Fig. 2.

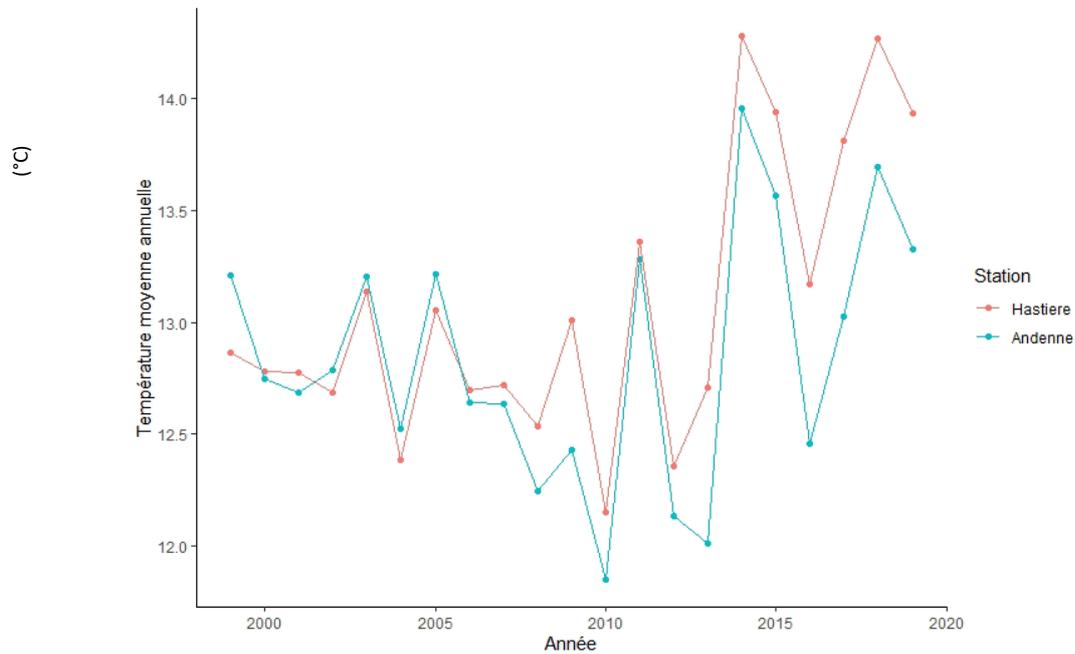


Fig. 2. Température annuelle moyenne de deux sites wallons pour la période 1999-2019 : données modifiées.

### ***Méthodes statistiques utilisées.***

Les synthèses de données et les calculs furent effectués à l’aide du logiciel R par le Dr A. Latli, attaché à la Direction Nature et Eau (DEMNA, DGARNE) du Service Public de Wallonie lors de la rédaction du présent rapport.

Les données seront synthétisées sous forme de moyennes annuelles par site (soit un total de 56 valeurs pour les 4 sites des 2 pays, tableau 2 disponible au secrétariat) et de moyennes mensuelles par site (soit un total de 672 valeurs pour les 4 sites des 2 pays, 168 pour les Pays-Bas et 504 pour la Wallonie, tableau 3 disponible au secrétariat).

Une régression de Loess sera appliquée aux moyennes annuelles par site. La régression de Loess (package “stats” en R) est une méthode non paramétrique permettant de produire des courbes ajustées et lissées localement pour un nuage de points à l’aide d’une succession de polynômes de degré 2, d’un paramètre  $\alpha$  de « voisinage » (ayant par défaut une valeur de 0,75) entre un point de la courbe et les points du nuage les plus voisins et d’un paramètre P de pondération de ce même point de la courbe.

Les températures moyennes mensuelles par site seront, elles, modélisées à l’aide de modèles mixtes additifs généralisés (GAMM) (package “mgcv” de R). Un modèle additif généralisé (en anglais, “generalized additive model” ou GAM) est un modèle statistique fusionnant les propriétés du modèle linéaire généralisé (GLM en anglais, une généralisation de la régression linéaire) avec celles du modèle additif, en se basant sur la somme des différentes variables explicatives (d’où le terme additif). Un modèle mixte additif généralisé combine les propriétés d’un GAM avec ceux d’un modèle mixte (combinant lui-même des effets fixes et aléatoires). Cette approche est couramment utilisée afin de modéliser des tendances d’évolution de paramètres abiotiques ou biotiques (Zuur *et al.* 2009).



Les GAMMs seront construits, dans un premier temps, à l'aide d'un modèle dit naïf, c'est à dire sans prendre en compte l'autocorrélation éventuelle des données (à savoir l'influence de la température d'un jour sur celle mesurée les jours suivants). Celui-ci sera ensuite amélioré via l'addition d'un argument ("corStruct" du package "lme" en R) visant à quantifier et réduire les biais liés à l'autocorrélation intra annuelle comprise dans les données. Plusieurs modèles réduisant plus ou moins fortement l'autocorrélation pouvant en résulter, le choix du modèle le plus pertinent sera réalisé via une ANOVA en testant le gain d'ajustement (AIC) entre modèles (Wood 2004, 2006a et 2006b). Les résultats de l'analyse sont développés dans les tableaux 4-6 disponibles au secrétariat. Seuls ceux relatifs au modèle à préférer (en gras dans les tableaux 4-6 précités) seront présentés et discutés ci-dessous.

Les données seront analysées successivement pour la Wallonie seule, pour les Pays-Bas seuls puis pour l'ensemble des 4 sites des deux pays, selon les mêmes méthodes. L'évolution des températures minimales et maximales annuelles pour l'ensemble des sites et par site sera en outre synthétisée graphiquement et le nombre de jours de dépassement d'une température seuil (25°C) fourni.

## Résultats

### Données wallonnes

#### *Moyennes annuelles par site*

Lorsque, sur le graphique température annuelle moyenne en fonction de l'année basé sur le jeu de données consolidés repris à la Fig. 2, on applique une régression de Loess, on obtient le graphique de la Fig. 3. Les courbes semblent montrer, après une faible diminution entre 2005 et 2010, une augmentation assez nette de la température, en particulier à Hastière, sans qu'il soit possible d'en tirer davantage d'information à ce stade.

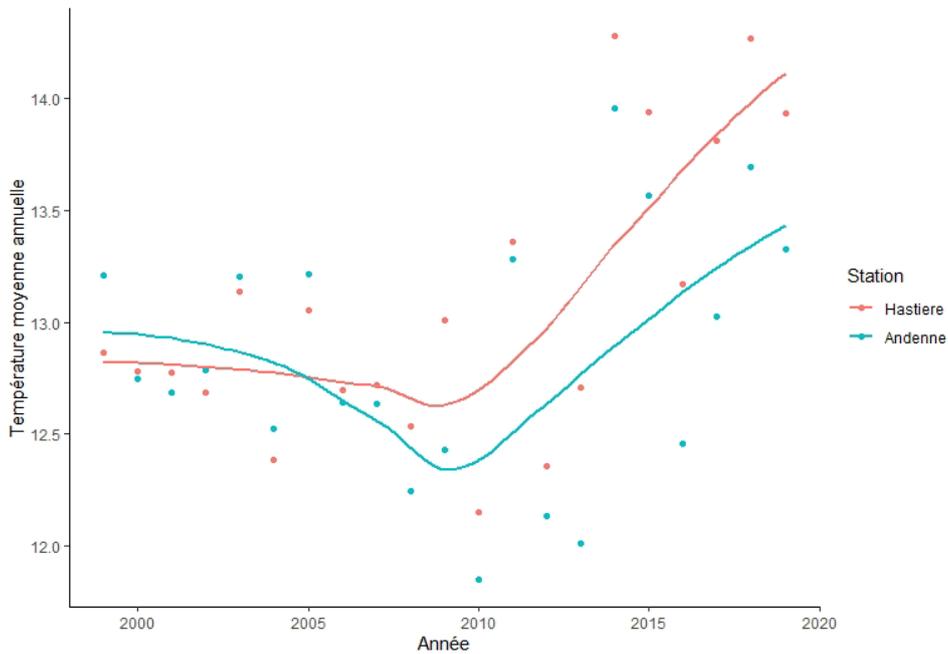


Fig. 3. Température annuelle moyenne de deux sites wallons pour la période 1999-2019 : régression de Loess.

### *Moyennes mensuelles par site*

Afin de pouvoir analyser plus finement les données disponibles, un modèle mixte additif généralisé est appliqué aux moyennes de température mensuelles. Il prend en compte (1) l'effet « mois de l'année » (car la température moyenne varie naturellement au fil des mois) ('s(Mois)' en R), (2) l'effet station éventuel ('Station') et (3) l'effet de l'évolution temporelle ('s(Time)' en R), lequel pourrait découler du changement climatique. Le modèle est sélectionné de manière à minimiser l'autocorrélation des données (tableau 4 disponible au secrétariat).

Le modèle à préférer appliqué aux 504 moyennes mensuelles pour les deux sites wallons est :

$$T_{moy} \sim s(\text{Mois}, bs = "cc", k = 12) + s(\text{Time}) + (\text{Station})$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
Intercept	13,05	0,11	123,46	< 0,001
Station	-0,26	0,15	-1,81	0,07
R <sup>2</sup> adjusted	0,956			

	Edf	Ref.df	F	p-value
s(Mois)	9,30	10,000	721.92	< 0,001
s(Time)	2,45	2,47	8,66	< 0,001

Le graphique des températures prédites au cours d'une année est repris à la Fig. 4, celui des températures sur la période 1999-2019 à la Fig. 5. Ce dernier indique une augmentation de température nettement supérieure à 0,5°C entre 1999 et 2019.

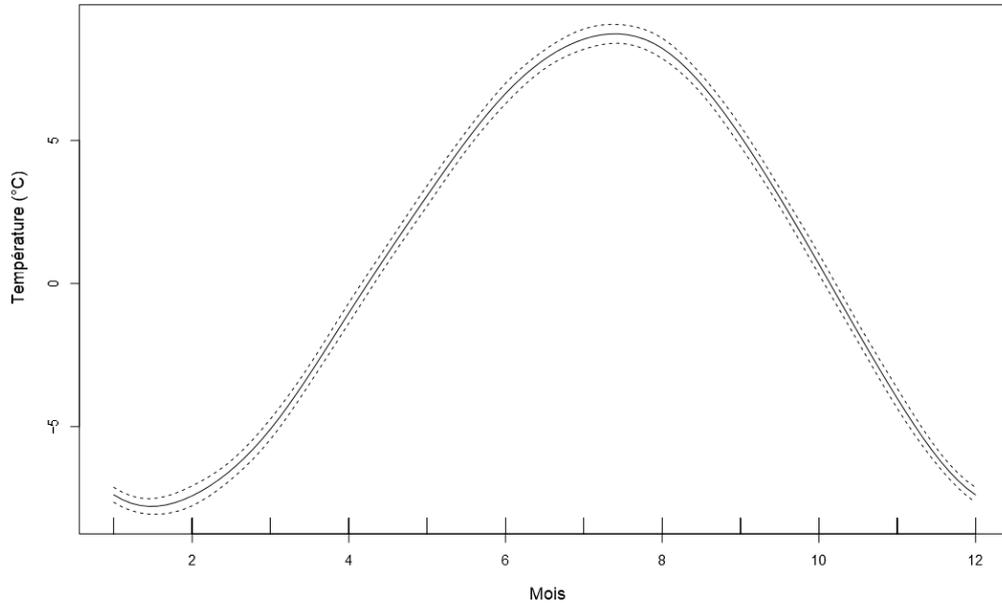


Fig. 4. Variation intra annuelle des températures moyennes centrées réduites (°C) modélisées via un GAM pour les deux sites wallons pendant la période 1999-2019. L'erreur standard est indiquée en pointillé.

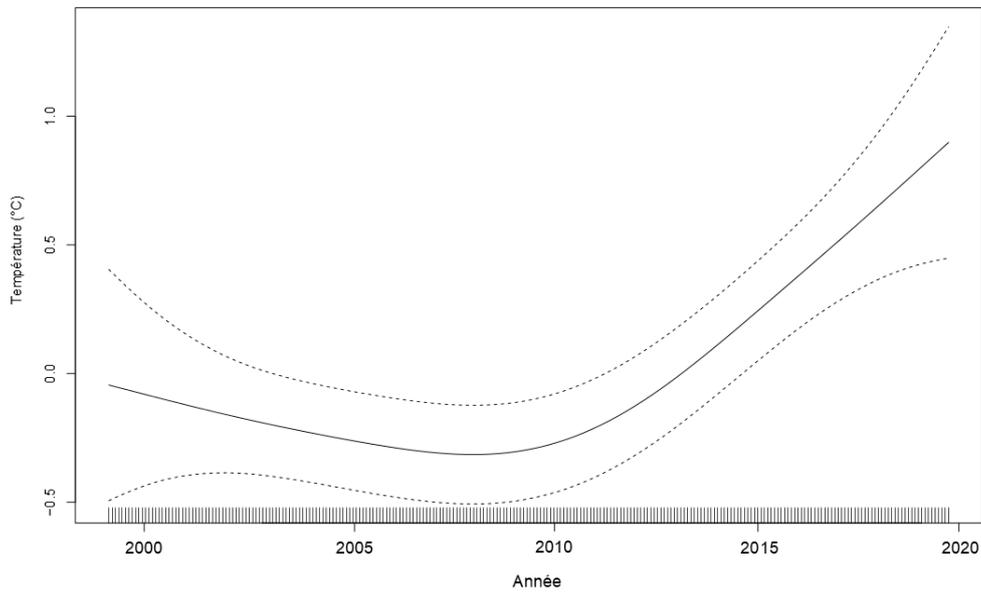


Fig. 5. Evolution des températures moyennes centrées réduites (°C) modélisées via un GAM pour les deux sites wallons pendant la période 1999-2019. L'erreur standard est indiquée en pointillé.



Les résultats obtenus repris au tableau ci-dessus montrent que

- (1) le modèle est pertinent ( $R^2 = 0,956$ ),
- (2) il n'y a pas de différence statistiquement significative entre sites wallons en termes d'évolution de la température ( $p = 0,07$ ),
- (3) l'effet mois est statistiquement très significatif ( $p < 0,001$ ), ce qui est attendu, tout comme l'effet temporel ( $p < 0,001$ ), qui est nettement positif,
- (4) l'autocorrélation résiduelle est très réduite.

Pour analyser l'évolution de la température mensuelle sur l'ensemble de la période 1999-2019 et réaliser des prédictions, un nouveau GAM est généré en moyennant les températures mensuelles des deux sites wallons ( $R^2$  ajusté de 0,956).

Lorsque l'on place, sur un même graphique, les températures prédites pour chaque mois de l'année et ce pour deux années aux extrémités de la période considérée, on obtient le premier graphique de la Fig. 6. La période considérée étant courte, les intervalles de confiance se chevauchent. On voit néanmoins clairement que la température du fleuve remonte plus vite au printemps en 2019 qu'en 1999 et que le maximum est aussi à la fois plus élevé, atteint plus tôt (en juillet au lieu d'août) et dure plus longtemps en 2019, les minimas hivernaux légèrement moindres semblant se décaler vers février. On tente ensuite une modélisation pour la période 2000-2030.

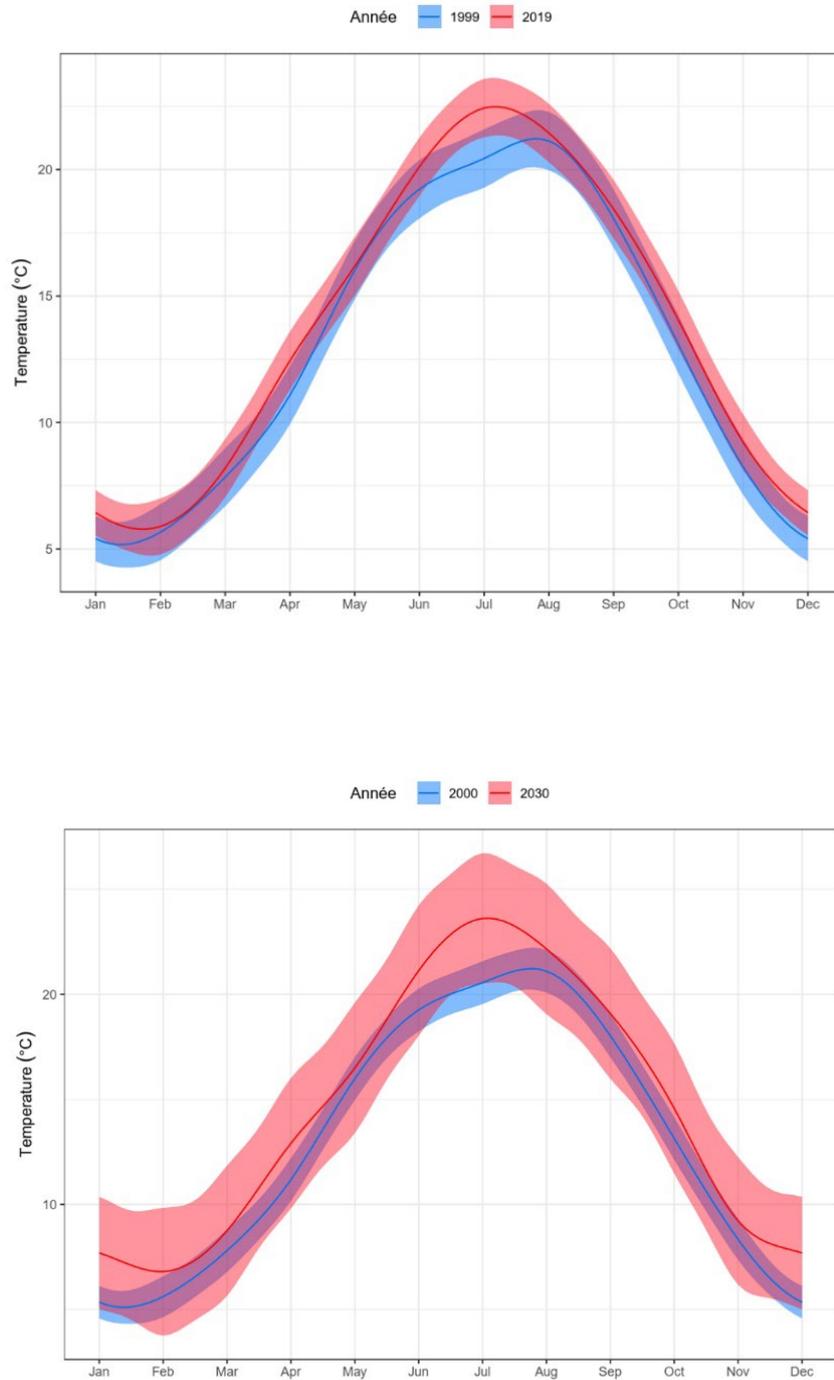


Fig. 6. Variation intra annuelle des températures moyennes modélisées pour les deux sites wallons, pour les années de référence 1999/2019 et 2000/2030. L'erreur standard est indiquée en bandes colorées.

La même modélisation pouvant fournir des prédictions de température mensuelle moyenne pour chacune des années de la période considérée, il est possible de présenter les prédictions mensuellement ou par saison pour l'ensemble de cette période. Cette dernière présentation, assez parlante, est reprise à la Fig. 7.

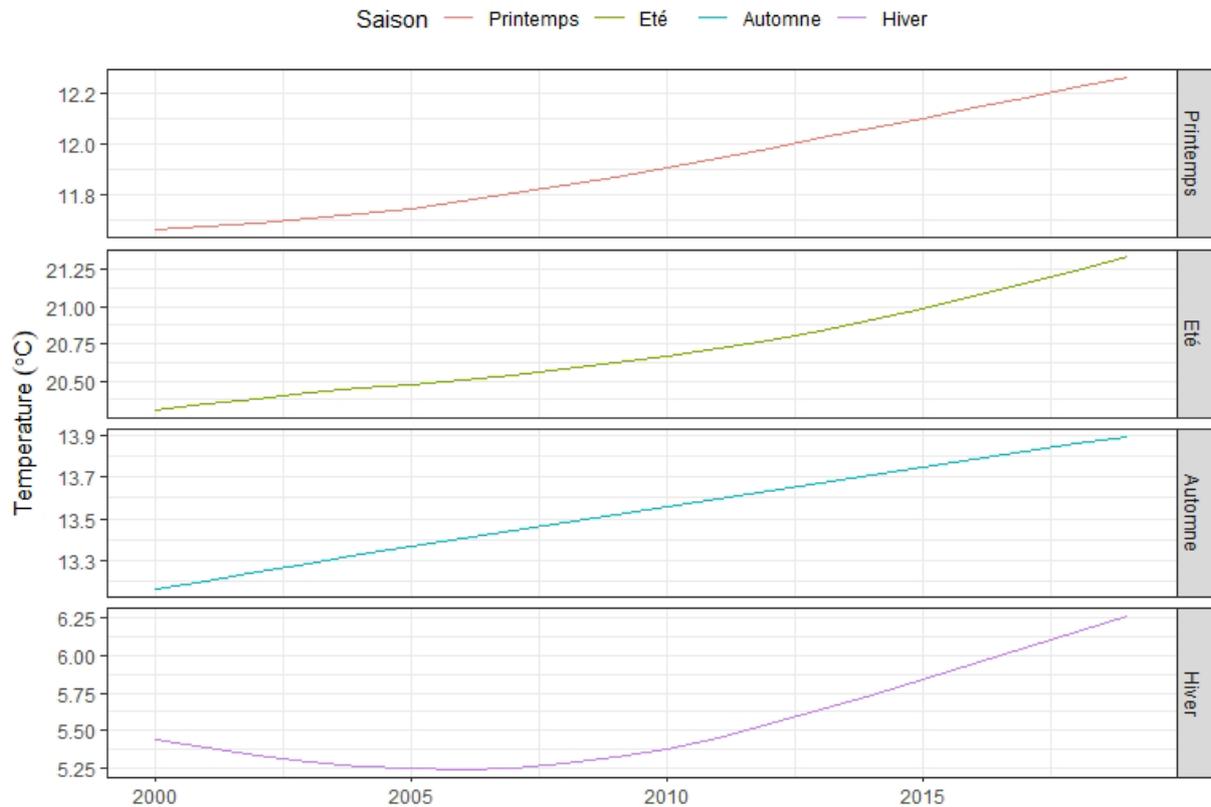


Fig. 7. Evolution des températures modélisées moyennées par saison pour les deux sites wallons au cours de l'année, pendant les années de référence 1999/2019.

### Données néerlandaises

Les données néerlandaises sont traitées selon la même méthodologie que les données wallonnes, sachant que l'intervalle temporel est nettement plus court, ce qui peut partiellement réduire la qualité et la précision de la modélisation.

*Moyennes annuelles par site*

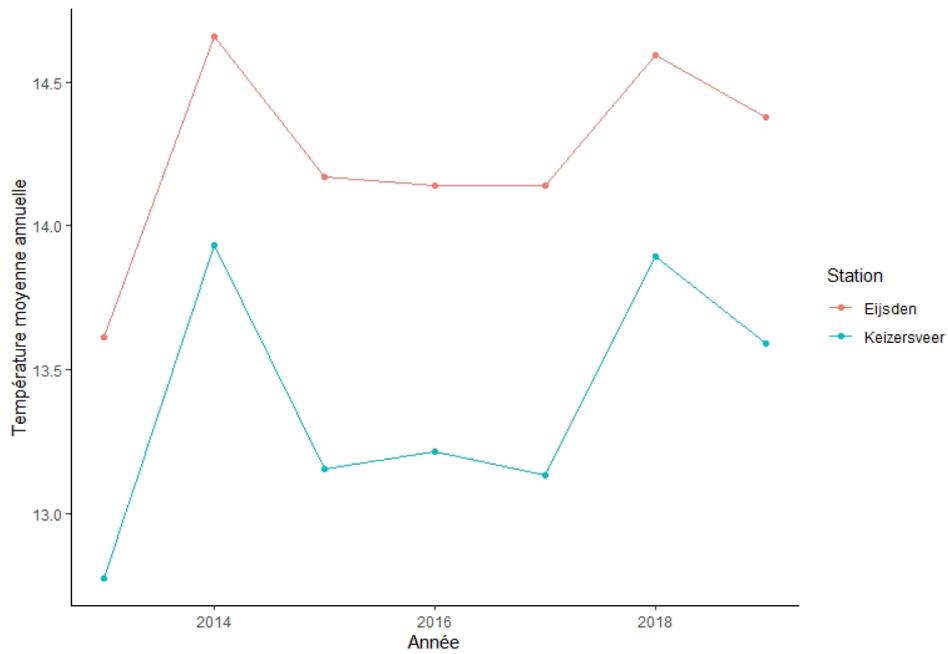


Fig. 8. Température annuelle moyenne de deux sites néerlandais pour la période 2013-2019.

Lorsque, sur le graphique température annuelle moyenne en fonction de l'année repris à la Fig. 8, on applique une régression de Loess, on obtient le graphique de la Fig. 9.

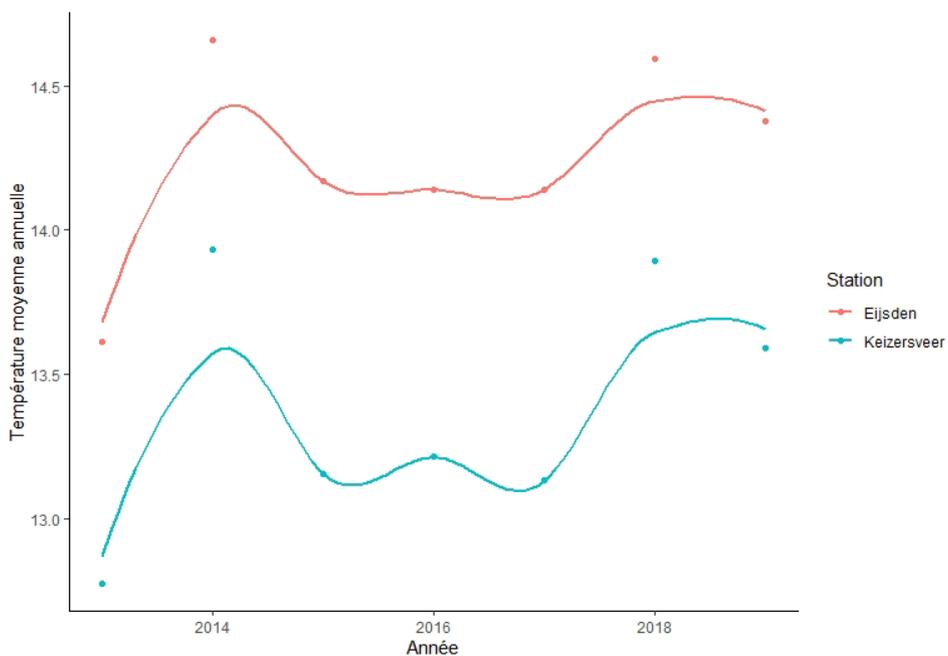


Fig. 9. Température annuelle moyenne de deux sites néerlandais pour la période 2013-2019 : régression de Loess.



### *Moyennes mensuelles par site*

Le modèle à préférer (annexe 3 disponible au secrétariat) appliqué aux 168 moyennes mensuelles pour les deux sites néerlandais est :

$$T_{\text{moy}} \sim s(\text{Mois}, \text{bs} = "cc", k = 12) + s(\text{Time}) + (\text{Station})$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
Intercept	14,20	0,16	89,14	< 0,001
Station	-0,98	0,22	-4,49	< 0,001
R <sup>2</sup> adjusted	0,96			

	Edf	Ref.df	F	p-value
s(Mois)	8,81	10,000	313,65	< 0,001
s(Time)	5,29	3,85	4,75	0,0016

Le graphique des températures prédites au cours d'une année est repris à la Fig. 10, celui des températures sur la période 2013-2019 à la Fig. 11.

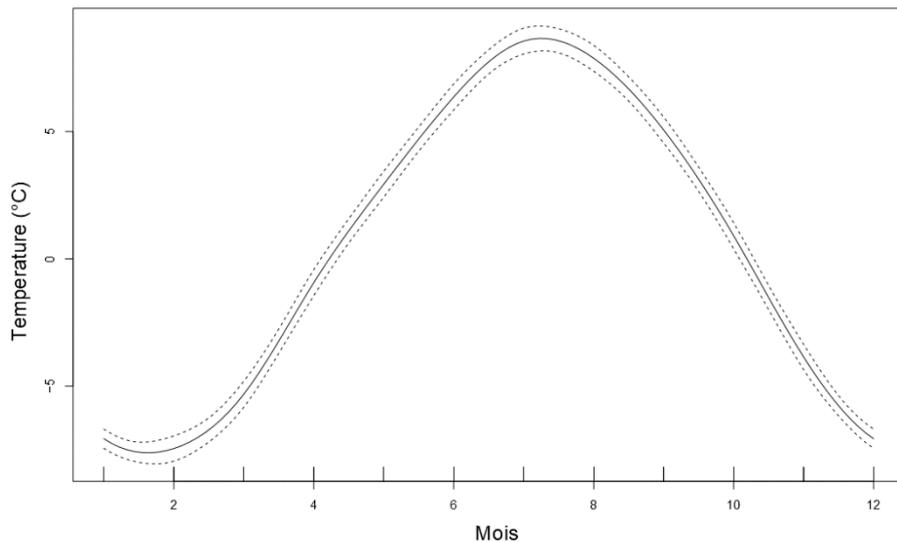


Fig. 10. Variation intra annuelle des températures moyennes centrées réduites (°C) modélisées via un GAM pour les deux sites néerlandais pendant la période 2013-2019. L'erreur standard est indiquée en pointillé.

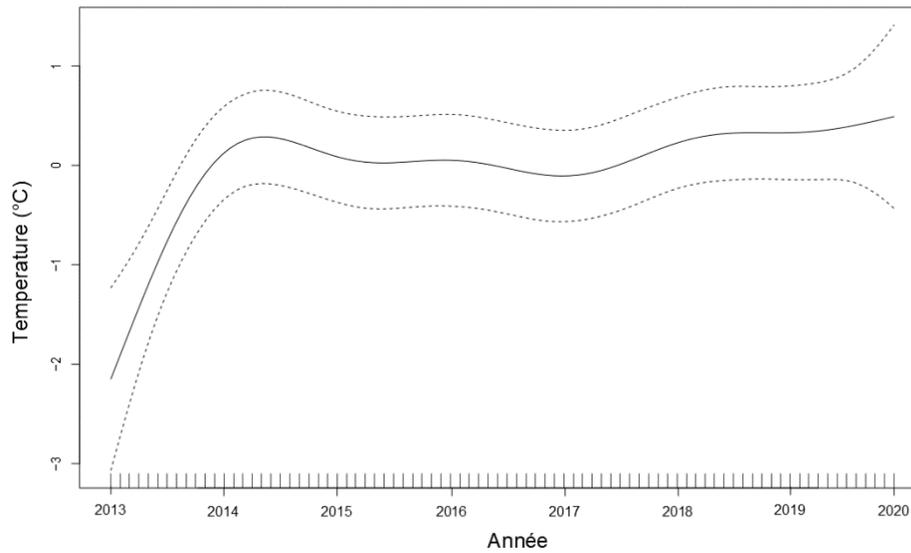


Fig. 11. Evolution des températures moyennes centrées réduites (°C) modélisées via un GAM pour les deux sites néerlandais pendant la période 2013-2019. L'erreur standard est indiquée en pointillé.

Les résultats obtenus repris au tableau ci-dessus, assez similaires aux résultats wallons, montrent que

- (1) le modèle est pertinent ( $R^2 = 0,96$ ),
- (2) il y a une différence significative entre les stations néerlandaises en termes d'évolution de la température ( $p = 1,39e-5$ ),
- (3) l'effet mois est très significatif statistiquement ( $p < 0,001$ ), ce qui est attendu, tout comme l'effet temporel ( $p = 0.0016$ ), qui est nettement positif,
- (4) l'autocorrélation résiduelle est très réduite.



Pour analyser l'évolution de la température mensuelle sur l'ensemble de la période 2013-2019, un nouveau GAM est généré en moyennant les températures mensuelles des deux sites néerlandais.

Lorsque l'on place, sur un même graphique, les températures prédites pour chaque mois de l'année et ce pour deux années aux extrémités de la période considérée, on obtient le premier graphique de la Fig. 12, une modélisation pour la période 2015-2025 étant ensuite tentée.

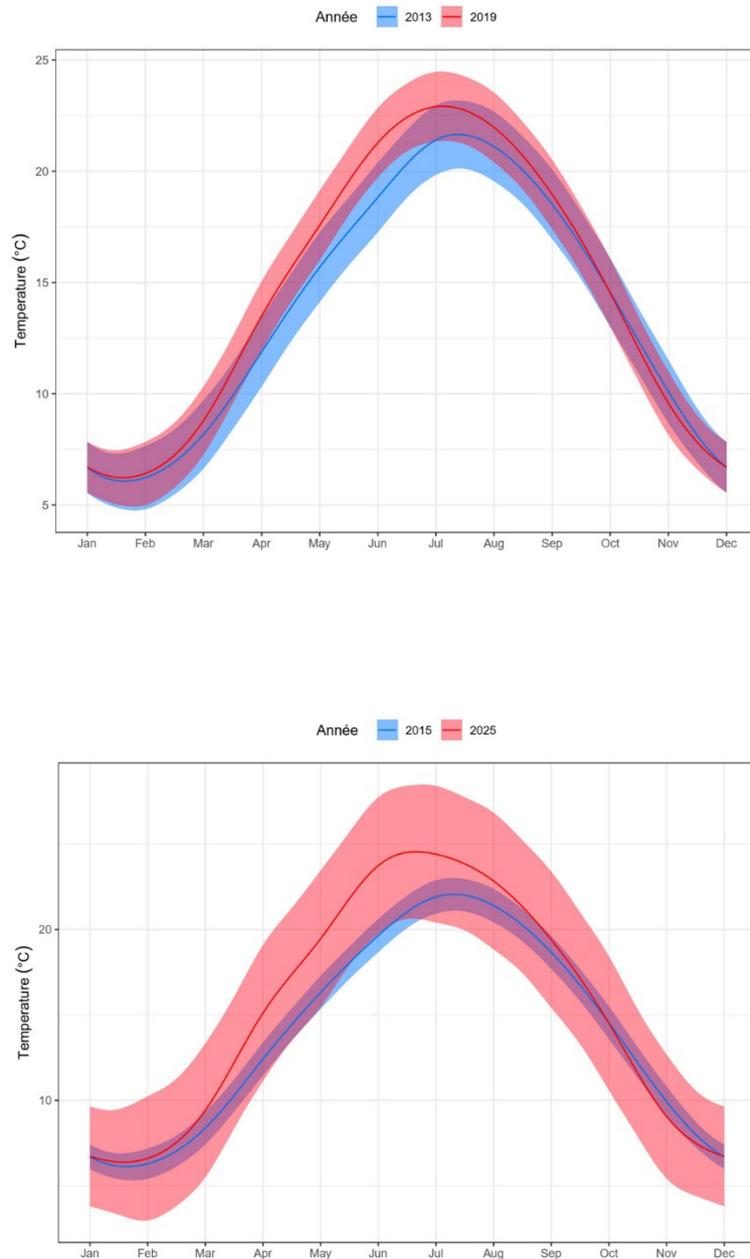


Fig. 12. Variation intra annuelle des températures moyennes modélisées pour les deux sites néerlandais, pour les années de référence 2013/2019 et 2015/2025. L'erreur standard est indiquée en bandes colorées.



La période considérée étant courte, les intervalles de confiance se chevauchent. On voit néanmoins à nouveau clairement sur la Fig. 12 que la température du fleuve remonte plus vite au printemps en 2019 qu'en 2013 et que le maximum est aussi à la fois plus élevé, atteint plus tôt (vers début juillet plutôt que mi-juillet) et dure plus longtemps en 2019.

La même modélisation pouvant fournir des prédictions de température mensuelle moyenne pour chacune des années de la période considérée, il est possible de présenter les prédictions mensuellement ou par saison pour l'ensemble de cette période. Cette dernière présentation est reprise à la Fig. 13.

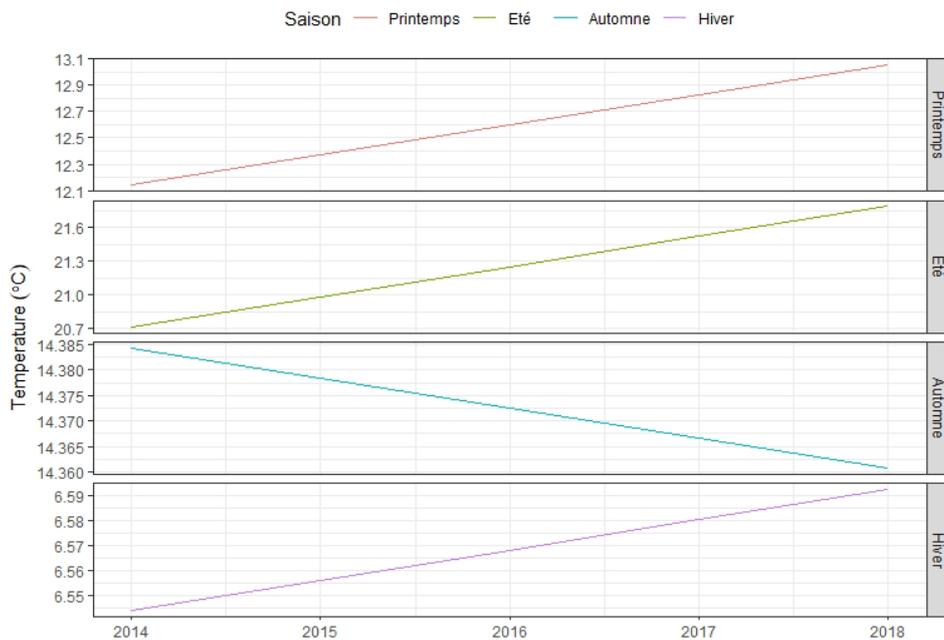


Fig. 13. Evolution des températures modélisées moyennées par saison pour les deux sites néerlandais au cours de l'année, au cours des années de référence 2014/2018.



## Analyse globale de l'ensemble des données

Les données des 4 sites des 2 pays sont analysées conjointement selon les mêmes méthodes que précédemment.

### *Moyennes annuelles par site*

La Fig. 14 reprend l'évolution de la moyenne annuelle de température pour l'ensemble des sites, faisant nettement ressortir le site de Eijsden.

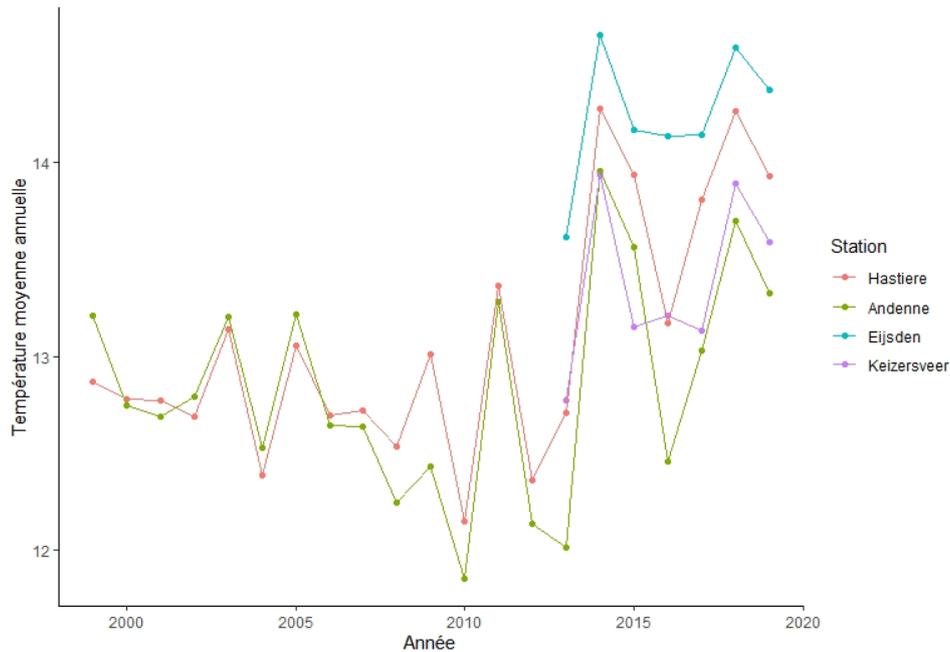


Fig. 14. Température annuelle moyenne des quatre sites wallons et néerlandais analysés, pour la période 1999-2019.

### *Moyennes mensuelles par site*

Comme précédemment, un modèle additif généralisé est appliqué aux moyennes mensuelles en prenant en compte l'effet mois, l'effet année éventuel et l'effet pays éventuel.

$$T_{\text{moy}} \sim s(\text{Mois}, \text{bs} = "cc", k = 12) + s(\text{Time}) + (\text{Pays})$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
Intercept	13,03	0,082	158,98	< 0,001
Pays	0,34	0,18	1.87	0,06
R <sup>2</sup> adjusted	0,96			

	Edf	Ref.df	F	p-value
s(Mois)	9,48	10,0	920,5	< 0,001
s(Time)	2,66	2,66	10,70	< 0,001

On remarquera que malgré les valeurs de température plus élevées constatées à Eijsden, l'effet "pays" n'est pas statistiquement significatif ( $p = 0,06$ ). En revanche, à l'instar des modélisations précédentes, le modèle est hautement significatif ( $R^2=0,96$ ), l'effet mois est bien marqué et surtout la température moyenne a très significativement augmentée ( $p < 0,001$ ) lors de la période étudiée.

Le graphique des températures modélisées au cours d'une année est repris à la Fig. 15, celui des températures sur la période 1999-2019 à la Fig. 16.

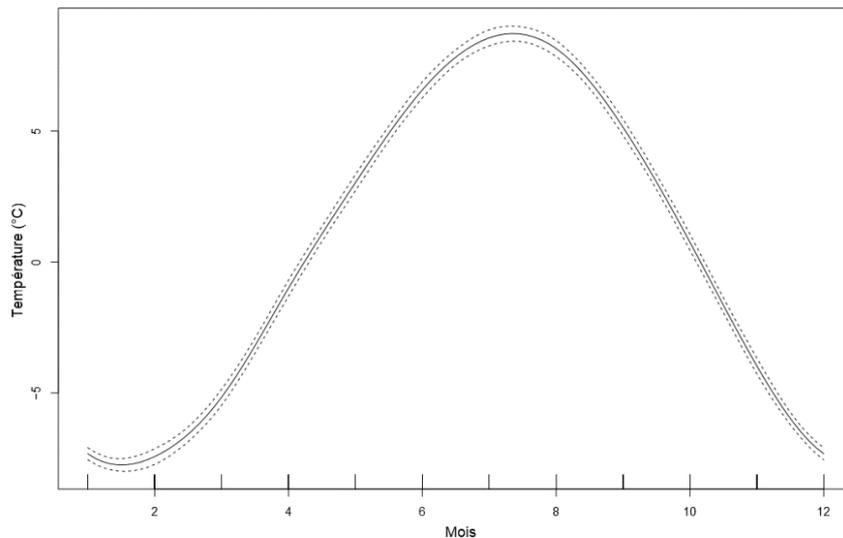


Fig. 15. Variation intra annuelle des températures moyennes centrées réduites (°C) modélisées via un GAM de la Meuse belge et néerlandaise pendant la période 1999-2019. L'erreur standard est indiquée en pointillé.

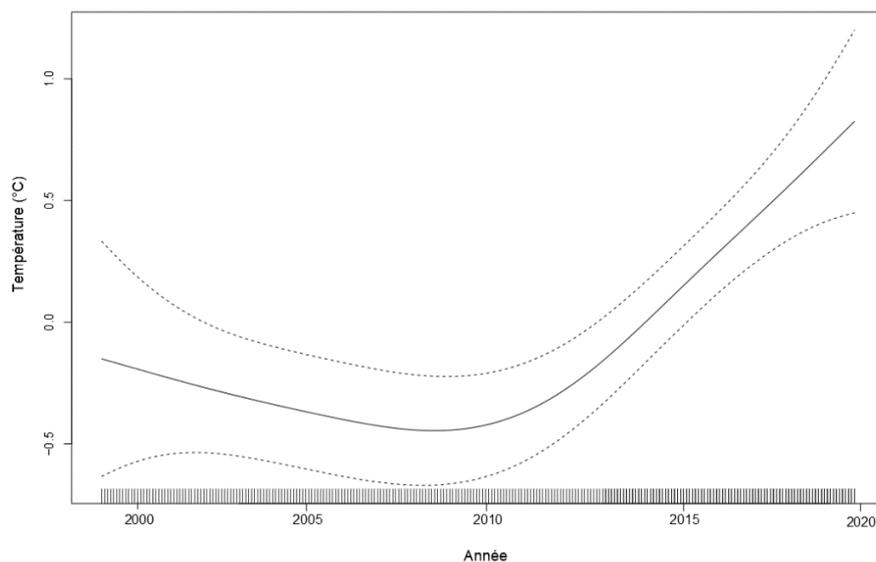


Fig. 16. Evolution des températures moyennes centrées réduites (°C) modélisées via un GAM de la Meuse belge et néerlandaise pendant la période 1999-2019. L'erreur standard est indiquée en pointillé. On notera que l'intégration des données néerlandaises permet de resserrer cet intervalle pour les périodes récentes (comparer à la Fig. 5).



Lorsque l'on place, sur un même graphique, les températures prédites par le modèle précédent pour chaque mois de l'année et ce pour deux années aux extrémités de la période considérée, on obtient le premier graphique de la Fig. 17, une modélisation pour la période 2000-2030 étant ensuite tentée.

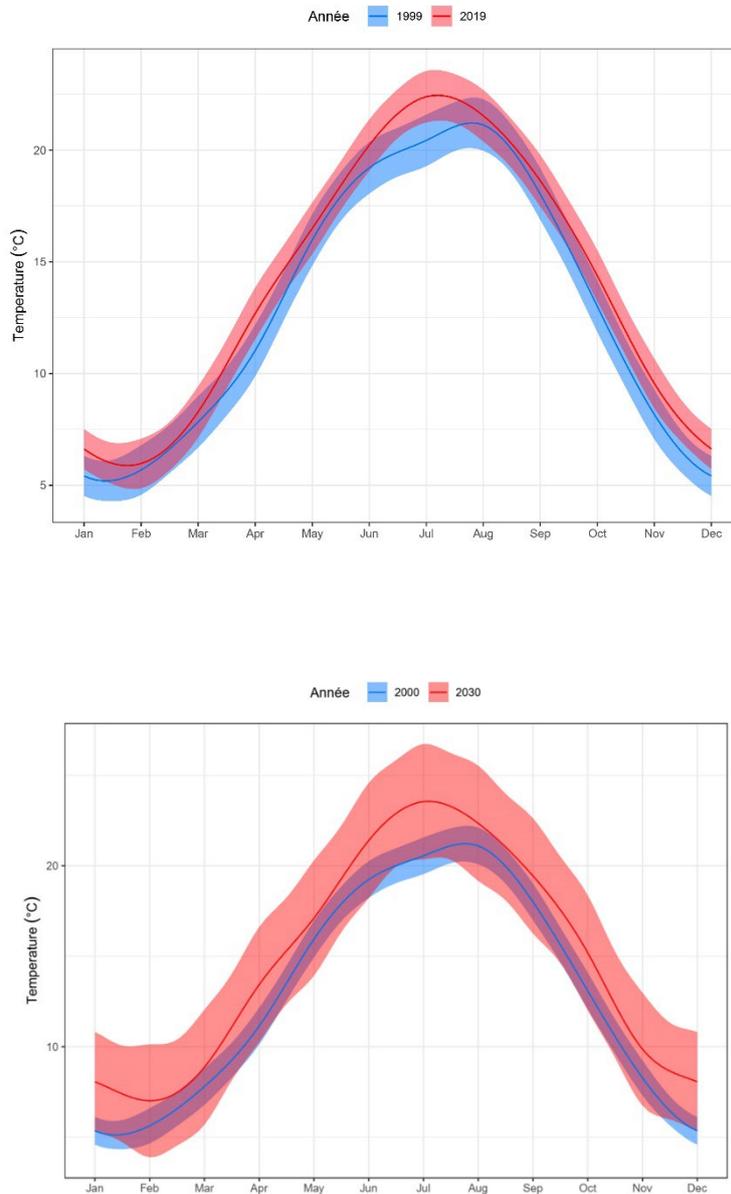


Fig. 17. Températures moyennes modélisées pour la Meuse belge et néerlandaise au cours de l'année, pour les années de référence 1999/2019 et 2000/2030. L'erreur standard est indiquée en bandes colorées.

La même modélisation pouvant fournir des prédictions de température mensuelle moyenne pour chacune des années de la période considérée, il est possible de présenter les prédictions mensuellement ou par saison pour l'ensemble de cette période. Cette dernière présentation est reprise à la Fig. 18.

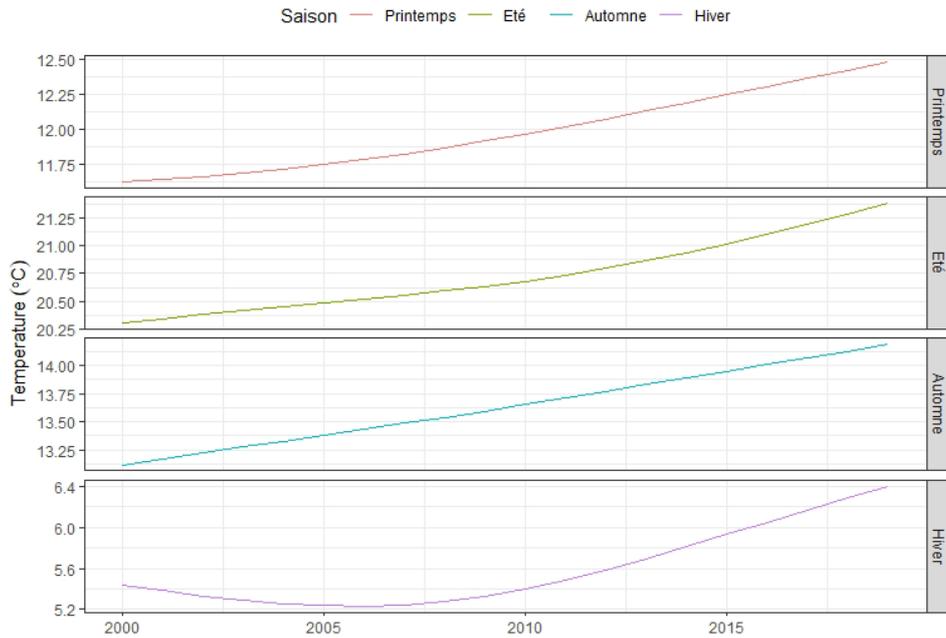


Fig. 18. Evolution des températures modélisées moyennées par saison pour la Meuse belge et néerlandaise au cours des années de référence 1999/2019.

**Evolution des températures minimales et maximales annuelles par site**

La Fig. 19 synthétise l'évolution des minimas annuels pour chacun des 4 sites suivis pris séparément, la Fig. 20 synthétisant celle des maximas.

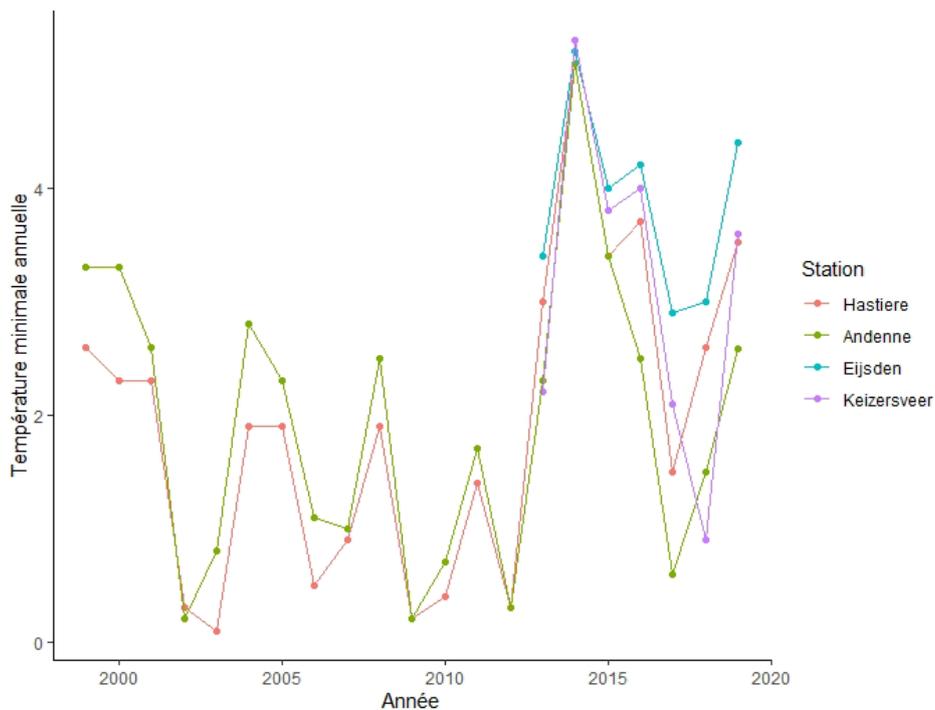


Fig. 19. Températures minimales annuelles sur quatre sites de la Meuse pour la période 1999-2019.

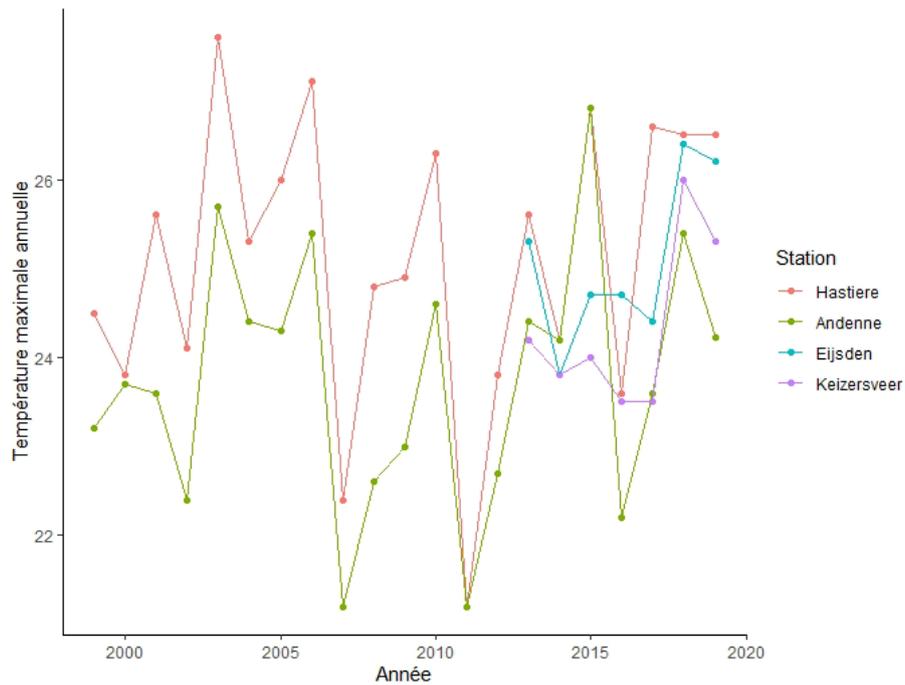


Fig. 20. Températures maximales annuelles sur quatre sites de la Meuse pris séparément pour la période 1999-2019.

***Evolution des températures minimales et maximales annuelles pour l'ensemble des sites***

L'évolution des températures minimales et maximales pour l'ensemble des sites est synthétisée respectivement aux Figs 21 et 22.

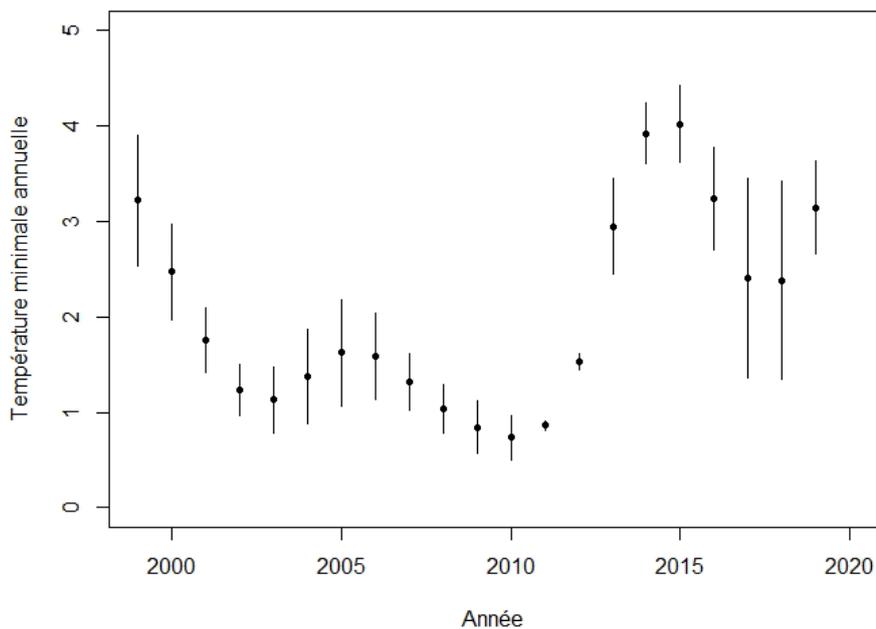


Fig. 21. Températures minimales annuelles sur l'ensemble des sites de la Meuse pour la période 1999-2019.

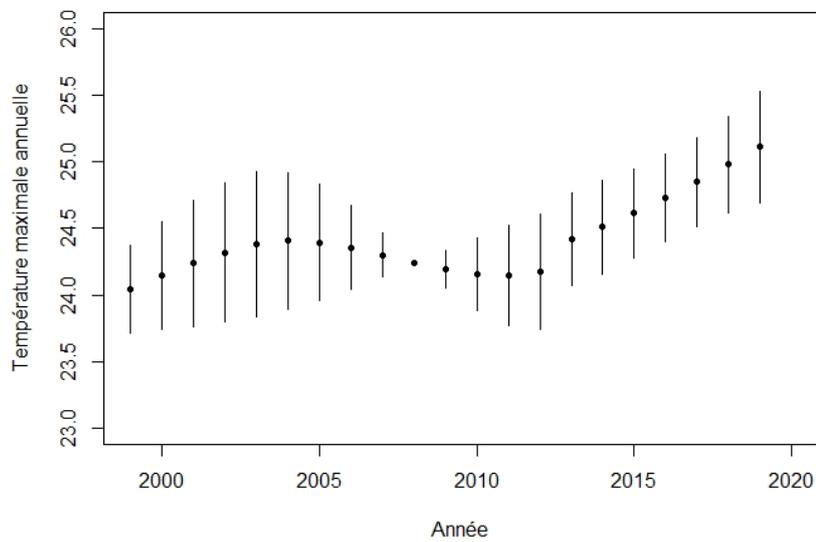


Fig. 22. Températures maximales annuelles sur l'ensemble des sites de la Meuse pour la période 1999-2019.

Une température élevée de l'eau peut avoir un effet néfaste pour la faune aquatique, notamment suite à la diminution de la solubilité de l'oxygène qu'elle entraîne. Il a dès lors paru intéressant de synthétiser, au tableau ci-dessous, le nombre de jours par an où la Meuse a présenté une température supérieure à 25°C tous sites confondus, température déjà élevée pour nos régions et un cours d'eau comme la Meuse.

Stations	2001	2003	2004	2005	2006	2010	2013	2015	2017	2018	2019	Somme
Hastière	2	13	6	7	17	10	5	5	4	15	10	94
Andenne	0	7	0	0	8	0	0	0	0	8	0	23
Eijsden	0	0	0	0	0	0	9	0	0	14	5	28
Keizersveer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	2	14
<b>Somme</b>	<b>2</b>	<b>20</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>25</b>	<b>10</b>	<b>14</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>49</b>	<b>17</b>	<b>159</b>

## Discussions et conclusions

Les résultats obtenus de l'analyse des données disponibles sur 4 sites belgo-néerlandais montrent que la température de la Meuse a significativement augmenté entre 1999 et 2019 de près de 1°C (Fig. 23). Cette augmentation de température est bien visible à l'échelle globale avec une légère variation entre les sites et les saisons. Elle est particulièrement marquée pour la période 2013-2019 (Fig. 23), l'eau de la Meuse ayant très probablement été impactée par les conditions météorologiques de ces dernières années.

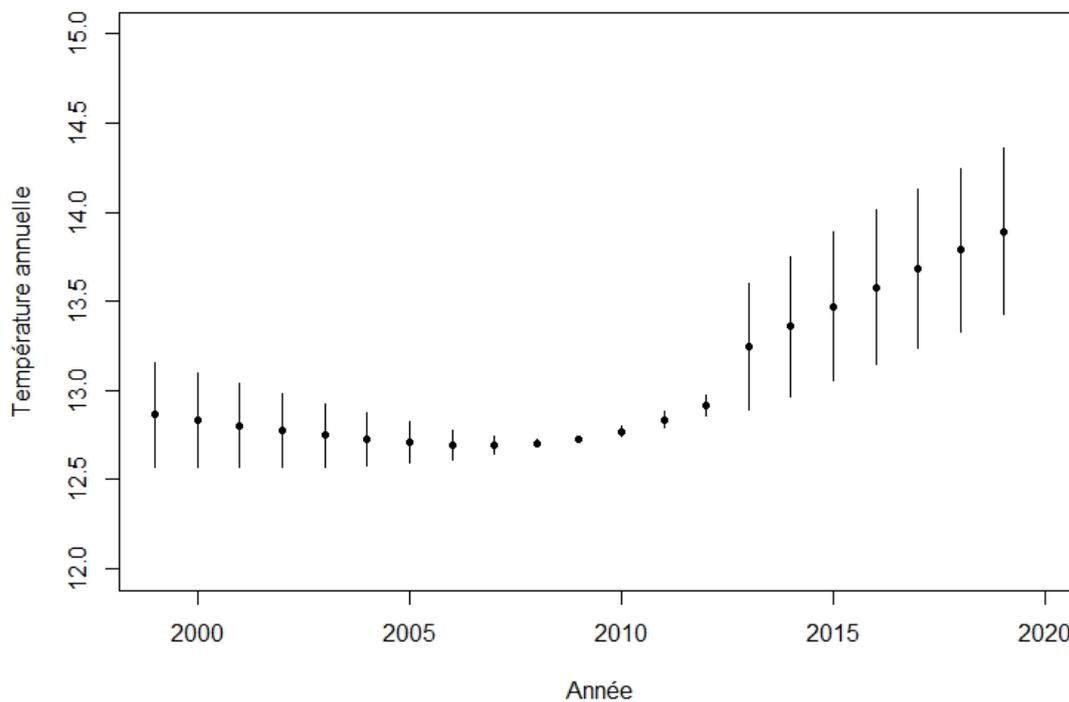


Fig. 23. Evolution des températures annuelles (°C) modélisées via un GAM de la Meuse belge et néerlandaise pendant la période 1999-2019. L'erreur standard, indiquée en bâtonnets verticaux, témoigne de la variabilité inter sites.

Il n'y a pas de différence significative de température entre les pays testés ( $p = 0,06$ ) en dépit de la station d'Eijsden dont la température est globalement plus importante comparée au site de Keizersveer ( $p < 0,001$ ) et des autres stations wallonnes.

L'ajout des données de température de cette station est visualisable via l'augmentation de l'erreur standard pour la période 2013-2019 (Figure 23). Le site de Keizersveer pourrait être à l'origine de l'accélération de l'augmentation des températures constatées à partir des années 2010. Bénéficier de données néerlandaises sur un plus long laps de temps pourrait contribuer à affiner la modélisation proposée et permettrait de proposer des prédictions fiables pour les années futures. Les modélisations proposées pour les années post 2019 restent très discutables et assez incertaines (erreur standard très important).



L'évolution de la température intra saison n'a pas été statistiquement testée mais on constate graphiquement que la température moyenne de la Meuse tend à augmenter plus rapidement au printemps pour atteindre des maximas records au cours de la période estivale. Les températures hivernales tendent également à être moins basses. La faible diminution de température observée à l'automne uniquement aux Pays-Bas pourrait, elle, n'être liée qu'au petit nombre de données disponibles.

L'ajout des données néerlandaises aux données wallonnes ayant permis de diminuer l'intervalle de confiance des prédictions, l'ajout futur de nouvelles données y compris françaises devrait permettre de restreindre celui-ci davantage et d'affiner les modélisations. On notera toutefois que les données disponibles restent encore insuffisantes pour proposer des prédictions fiables concernant les années futures.

Les différents sites de la Meuse dépassent la température de 25°C 159 jours durant la période considérée (1999-2019), dont 68 jours (presque 43%) pour les seules années 2018 et 2019 et 94 jours (59%) pour le seul site d'Hastière. Davantage de données devrait permettre d'éventuellement corroborer cette dernière observation voire de proposer une hypothèse explicative.

#### Références citées

- Pinheiro, J.C., and Bates, D.M. (2000) *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer.
- Wood, S.N. (2004) Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models. *Journal of the American Statistical Association*, 99: 673-686
- Wood, S.N. (2006a) Low rank scale invariant tensor product smooths for generalized additive mixed models. *Biometrics*, 62(4) :1025-1036.
- Wood S.N. (2006b) *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman and Hall/CRC Press.
- Zuur, A., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer Science & Business Media.