

Les dômes de chaleur en Europe : identification et analyse

Projet personnel en physique

CLÉMENCE GEORGES^{1,*}

¹ Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

* clemence.georges@student.uclouvain.be

Compiled April 10, 2025

Ces dernières décennies, les événements climatiques extrêmes se sont multipliés. Parmi eux, les dômes de chaleur, liés à des systèmes anticycloniques stationnaires, provoquent des canicules particulièrement intenses. Ce projet propose une méthode d'identification de ces événements à partir des données ERA5 de température à 2 mètres et de géopotential à 500 hPa. Après la validation sur des cas reconnus, la méthode est appliquée à la ville de Bruxelles sur la période 1950–2024. L'analyse des tendances à long terme permet ensuite d'évaluer l'évolution de la fréquence et de l'intensité des dômes de chaleur dans un contexte de réchauffement climatique.

<http://dx.doi.org/10.1364/ao.XX.XXXXXX>

1. INTRODUCTION

Ces dernières décennies ont connu une augmentation drastique des catastrophes climatiques à travers le monde. Parmi elles, les dômes de chaleur sont des phénomènes qui provoquent des canicules extrêmes aux conséquences sanitaires et écologiques dramatiques.

Le terme « dôme de chaleur » est apparu en 2021 dans les médias suite à la vague de chaleur qui s'est abattue sur l'Ouest de l'Amérique en juin de la même année. Cet événement extrême a suscité l'intérêt de la communauté scientifique afin d'étudier les mécanismes thermodynamiques et atmosphériques responsables de ce phénomène. Un dôme de chaleur se produit lorsqu'un anticyclone, c'est-à-dire une zone de haute pression atmosphérique, persiste anormalement longtemps au-dessus d'une région et y piège une masse d'air chaud stable dans la troposphère (Neal, et al., 2022[19]). Plusieurs autres éléments contribuent à augmenter les températures, tels qu'une humidité anormalement basse du sol, des ondulations marquées du courant-jet, ou encore un réchauffement de l'air en amont (White, et al., 2023[25]).

Ce projet vise à développer une méthode numérique simple capable de détecter les phénomènes de dômes de chaleur à partir des données ERA5 de température à 2m d'altitude [17] et de géopotential à 500hPa [8]. Après validation sur des cas historiques, cette méthode sera appliquée à l'analyse de la ville de

Bruxelles sur la période 1950-2024. Nous analyserons également l'évolution des données sur plusieurs décennies afin d'évaluer l'impact du réchauffement climatique sur celle-ci.

2. MÉTHODES

A. Données utilisées

Les données utilisées dans ce projet proviennent du *Climate Data Store* du *Copernicus Climate Change Service* (C3S). Nous utilisons ERA5, la cinquième génération de ré-analyse du ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) qui fournit une reconstruction du climat global sur les 80 dernières années. Plus précisément, nous utilisons les ensembles de données « *ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present* » [8] et « *ERA5 Land hourly data from 1950 to present* » [17] qui contiennent respectivement les données de géopotential à 500 hPa (noté $\phi 500$) et de température à deux mètres d'altitude (noté $T2m$), tous deux mesurés à 12h00 UTC. Les données de $\phi 500$ ont une résolution horizontale de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ tandis que les données de $T2m$ ont une résolution horizontale de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Pour Bruxelles, la période analysée s'étend de 1950 à 2024 afin de pouvoir étudier l'évolution temporelle sur plusieurs décennies. Pour les autres villes de l'hémisphère nord mentionnées dans ce projet, les données s'étendent de 1994 à 2024 afin de réduire le volume de données à traiter et le temps de calcul.

B. Méthode de détection des anomalies

Deux critères sont utilisés pour identifier une période d'anomalie. Le premier est l'introduction d'un seuil d'anomalie, fixé comme le 95^e percentile de la distribution. Le choix d'utiliser un percentile plutôt qu'un écart-type repose sur plusieurs considérations pratiques. En effet, un seuil basé sur l'écart-type ne permet pas d'isoler efficacement les événements extrêmes. En effet, $\mu + \sigma$ est un seuil trop bas et $\mu + 2\sigma$ est un seuil trop haut, alors que le 95^e percentile semble être un bon compromis ($57002.32 \text{ m}^2/\text{s}^2$ à Bruxelles). Nous avons retenu le 95^e percentile afin de filtrer uniquement les anomalies les plus marquées, susceptibles de correspondre à un dôme de chaleur. De plus, cette approche est couramment utilisée en climatologie (voir par exemple Barriopedro et al., 2023 [2] et Domeisen et al., 2023 [6]). Ce seuil d'anomalie est constant pour toute la période de référence, il ne varie ni en fonction des saisons ni du réchauffement climatique et il est calculé sur l'entièreté des données pour un endroit donné. Comme expliqué par Barriopedro, et al., (2023 [2]), ne

pas retirer le cycle annuel dans le calcul d'anomalies permet de mettre l'accent sur la détection d'événements extrêmes pendant la saison chaude.

Le deuxième critère est que les valeurs doivent dépasser le seuil d'anomalie pendant plusieurs jours consécutifs. Cela permet d'exclure les fluctuations rapides et de se concentrer sur les événements persistants. Ce critère est courant dans les études d'anomalies climatiques (Barriopedro et al., 2023 [2], Domeisen et al., 2023 [6], Jain et al., 2024 [11]). Nous fixons ce critère à un minimum de cinq jours consécutifs d'anomalies.

Ces deux critères constituent la base du programme de détection d'anomalies. Ce dernier est appliqué à $\phi 500$ et $T2m$, puis les dates des périodes identifiées pour les deux variables sont comparées. Pour chaque période, un indice d'intensité moyenne d'anomalie (noté $\Delta\phi 500$ ou $\Delta T2m$) est calculé comme la moyenne, sur cette période, des écarts entre la valeur enregistrée (géopotential ou température) et le seuil. Afin de simplifier l'analyse, l'extension spatiale des anomalies n'est pas prise en compte comme critère.

L'analyse est d'abord réalisée pour la ville de Lytton et est étendue à d'autres villes de l'hémisphère nord ayant enregistré un événement de dôme de chaleur, afin de tester la correspondance des résultats du programme avec la réalité. Ensuite, ce dernier est appliqué à la ville de Bruxelles. Nous retiendrons les trois événements les plus remarquables et nous regarderons s'ils ont été identifiés dans la littérature scientifique. Finalement, l'évolution des données depuis 1950 sera analysée à l'aide d'outils statistiques (ajustement d'une loi normale asymétrique et test de Kolmogorov-Smirnov bilatéral) afin de caractériser l'impact du réchauffement anthropique.

3. RÉSULTATS

A. Étude de dômes de chaleur historiques

Le terme « dôme de chaleur » n'a été introduit dans les médias et dans les études scientifiques qu'en 2021, à la suite de la vague de chaleur qui s'est abattue sur l'ouest de l'Amérique du Nord en juin 2021 (voir l'encadré section A.1 pour l'explication des mécanismes qui ont conduit à cette canicule). Nous allons donc appliquer le programme de détection à la ville de Lytton.

A.1. Lytton, juin 2021

Appliqué aux données de géopotential [8] et de température [17] pour Lytton, le programme détecte une période d'anomalie de 7 jours pour $\phi 500$ et de 16 jours pour $T2m$ à la fin du mois de juin 2021 (voir la table 1 dans l'annexe A pour les résultats détaillés). Les intensités moyennes d'anomalie sont de $1113.9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ et 3.4°C pour $\phi 500$ et $T2m$ respectivement.

Les courbes de géopotential et de température (voir la figure 2) montrent un pic particulièrement intense vers la fin du mois de juin ainsi qu'un décalage entre celles-ci. Le maximum de géopotential a été atteint le 27 juin 2021 avec $58625.9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ [8] et le maximum de température le 29 juin 2021 avec $18,35^\circ\text{C}$ [17].

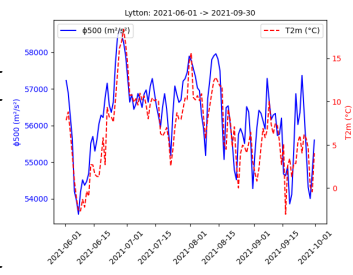


Fig. 2. Évolution du géopotential (bleu) et de la température (rouge) à Lytton pendant l'été 2021.

A.2. Dômes de chaleur à Phoenix, Chicago, Villariès et Monclova

Le programme a été appliqué à d'autres villes où des phénomènes de dôme de chaleur ont été recensés : Phoenix

(juillet 2023 [3], juin [5] et septembre 2024 [22]), Chicago (fin août 2023 [14]), Villariès (fin août 2023 [18]) et Monclova (fin juin 2023 [12]).

Ces canicules ont été correctement détectées par l'algorithme en tant que période d'anomalie de température et de géopotential. Les événements de juin et septembre 2024 à Phoenix n'ont pas été détectés. En effet, en 2024 des périodes d'anomalies ont été détectées pendant la presque totalité du mois de juillet ainsi que pendant le début du mois d'août. Les intensités moyennes d'anomalie $\Delta\phi 500$ sont de l'ordre de quelques centaines de m^2/s^2 (entre 100 et $600 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Les durées des périodes détectées sont très variables et se situent entre 7 et 22 jours. Les résultats détaillés concernant ces dômes de chaleur sont disponibles dans l'annexe A.

B. Anomalies détectées à Bruxelles

Le programme détecte plusieurs périodes d'anomalies d'au moins 5 jours consécutifs : 70 périodes pour le géopotential $\phi 500$, et 57 pour la température $T2m$. On compare ensuite ces périodes pour ne filtrer que celles qui ont au moins un jour en commun entre les séries d'anomalie de géopotential et de température. 44.28% des périodes d'anomalie de géopotential tombent en même temps que des périodes d'anomalie de température et 57.89% des périodes d'anomalie de température coïncident avec des anomalies de géopotential. Ces événements sont répertoriés sur les figures 3a et 3b.

Les durées des périodes d'anomalie s'étendent de 5 à 13 jours et les intensités moyennes de 195.4 à $1025.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Pour ce qui est des températures, les durées s'étendent de 5 à 17 jours et les intensités moyennes d'anomalies de 1 à 8.1°C . La figure 3c montre les événements en fonction de leur intensité moyenne d'anomalie de géopotential et de température.

Dans la suite, nous limitons l'analyse aux trois événements les plus remarquables en terme d'intensité : août 2003, juillet 2019 et septembre 2023. Les résultats sont disponibles sur la figure 4. En août 2003, le programme détecte une période d'anomalie de température de 13 jours avec une intensité moyenne d'anomalie de 5.3°C . La période d'anomalie de température détectée en juillet 2019 dure 5 jours, avec une intensité moyenne d'anomalie de 8.1°C . En ce qui concerne la vague de chaleur qui a pris place au début du mois de septembre 2023, la période d'anomalie de température détectée est de 8 jours avec une intensité moyenne d'anomalie = 3.4°C . Pour les trois événements, on voit sur les courbes 4a, 4b, 4c des pics exceptionnels aux dates qui correspondent aux dômes de chaleur.

C. Tendance temporelle des données

Nous constatons que notre programme détecte de plus en plus de périodes d'anomalies, tant de température ($T2m$) que de géopotential ($\phi 500$). Cela est bien visible sur les figures 3a et 3b, qui montrent que la fréquence et l'intensité de ces événements augmentent au cours du temps.

Ce changement est visible également dans la distribution des données. Premièrement, les distributions de données de géopotential et de température présentent une légère asymétrie. En effet, le coefficient d'asymétrie (*skewness*) est de -0.453 pour les données de géopotential et de -0.053 pour les données de température. Plus la magnitude de cette valeur est grande, plus les données sont asymétriques (Zwillinger & Kokoska, 2000 [28]). Une asymétrie négative indique que la queue de la distribution est plus longue à gauche. Ces valeurs nous confortent dans l'hypothèse que la distribution de probabilité la plus adaptée aux données de $\phi 500$ et $T2m$ est une normale asymétrique. Cela est indiqué par les résultats du test de log-vraisemblance et celui

Exemple : le dôme de chaleur de Lytton (juin 2021)

L'événement extrême survenu à Lytton (Canada) en juin 2021 a été largement étudié en raison de son intensité exceptionnelle. Plusieurs causes ont été identifiées :

- Méandres persistants du jet stream formant un blocage oméga, piégeant un anticyclone entre deux dépressions [13].
- Subsidence sous haute pression entraînant un réchauffement adiabatique de l'air (par compression).
- Absence de nuages favorisant un fort réchauffement diurne par rayonnement solaire.
- Mélange vertical entre l'air chaud et sec en altitude et l'air plus frais en surface.
- Sols exceptionnellement secs diminuant la capacité thermique et amplifiant la chaleur sensible par conduction.
- Réchauffement climatique anthropique augmentant la teneur en vapeur d'eau atmosphérique et l'intensité du phénomène.

(Schumacher, Hauser, & Seneviratne, 2022 [20], White R., et al, 2022 [25]).

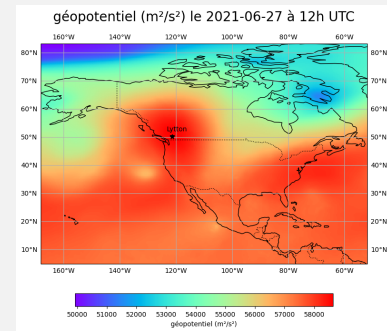
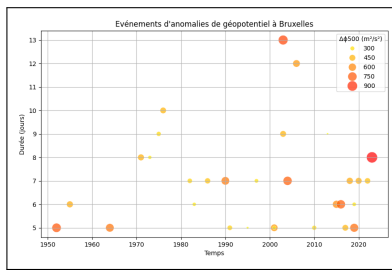
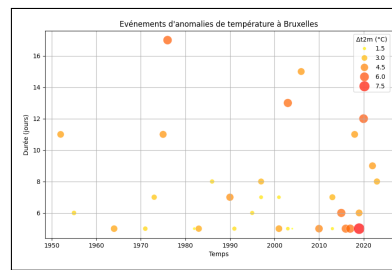


Fig. 1. Valeurs de géopotential au-dessus de l'Amérique du Nord le 28 juin 2021 à 12h UTC. L'anticyclone est visible au-dessus de la ville de Lytton.

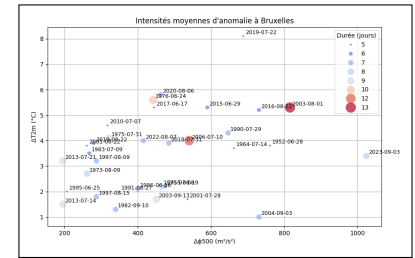
Ce dôme a combiné plusieurs facteurs aggravants : réchauffement diabatique de l'air en amont, présence de montagnes qui élèvent l'air par advection, îlot de chaleur urbain, et un maximum d'ensoleillement près du solstice d'été [20, 25].



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Événements détectés à Bruxelles. 3a-3b : Périodes d'anomalies de géopotential et de température détectées à Bruxelles. La taille et la couleur des points représente l'intensité moyenne d'anomalie de la période. 3c: La taille et la couleur des points représentent la durée en jours de la période d'anomalie de géopotential. La date affichée est la première date commune entre les deux périodes d'anomalie de géopotential et de température.

de Kolmogorov-Smirnov (p -value < 0.05). Ensuite, la distribution de densité de probabilité des données pour la période 1988 à 2024 penche d'avantage vers la droite que celle pour la période 1950-1987. Ces courbes sont visibles sur les figures 5a et 5b. Finalement, on constate une augmentation de la moyenne des températures et du géopotential entre les deux périodes. Cependant, la variance et l'écart-type diminuent pour les deux variables. Pour évaluer si les distributions des deux ensembles de données (1950-1987 et 1988-2024) sont différentes, nous leur appliquons un test de Kolmogorov-Smirnov bilatéral. Les résultats sont les suivants : une statistique de 0.074 et 0.061 pour les données de géopotential et de température respectivement, avec des p -values de 9.367×10^{-34} et 3.186×10^{-23} . Étant donné que notre seuil de confiance est de 95%, nous pouvons conclure que les deux échantillons pour chaque variable ne suivent pas la même loi de distribution (comme l'explique la documentation de scipy pour cette fonction [21]).

4. DISCUSSION

A. Interprétation des résultats et concordance avec la littérature

A.1. Dômes de chaleur dans l'hémisphère Nord

Le programme a globalement bien détecté le dôme de chaleur survenu à Lytton en juin 2021, mais il indique un maximum de température le 29 juin 2021 avec $18,35^\circ\text{C}$ [17]. Cette valeur relativement basse pour une vague de chaleur s'explique par le fait que les données correspondent à 12h00 UTC, c'est-à-dire 5h00 du matin à Lytton. En réalité, la température la plus élevée de cette vague de chaleur a été enregistrée à $49,6^\circ\text{C}$ le 29 juin 2021 (White, et al., 2023 [25]). La plupart des événements de dômes de chaleur mentionnés précédemment et recensés dans la littérature ont été détectés correctement par le programme. Cependant, à Phoenix, les événements de juin et septembre 2024 n'ont pas été détectés : les périodes indiquées par le programme se situent en juillet et août 2024. Les maxima de température des périodes d'anomalies arrivent parfois avant le maximum de géopotential, ce qui est curieux. Cependant, on observe une corrélation visuelle entre les courbes lors du dôme de chaleur pour chaque ville analysée. Ainsi, le pic de géopotential du dôme

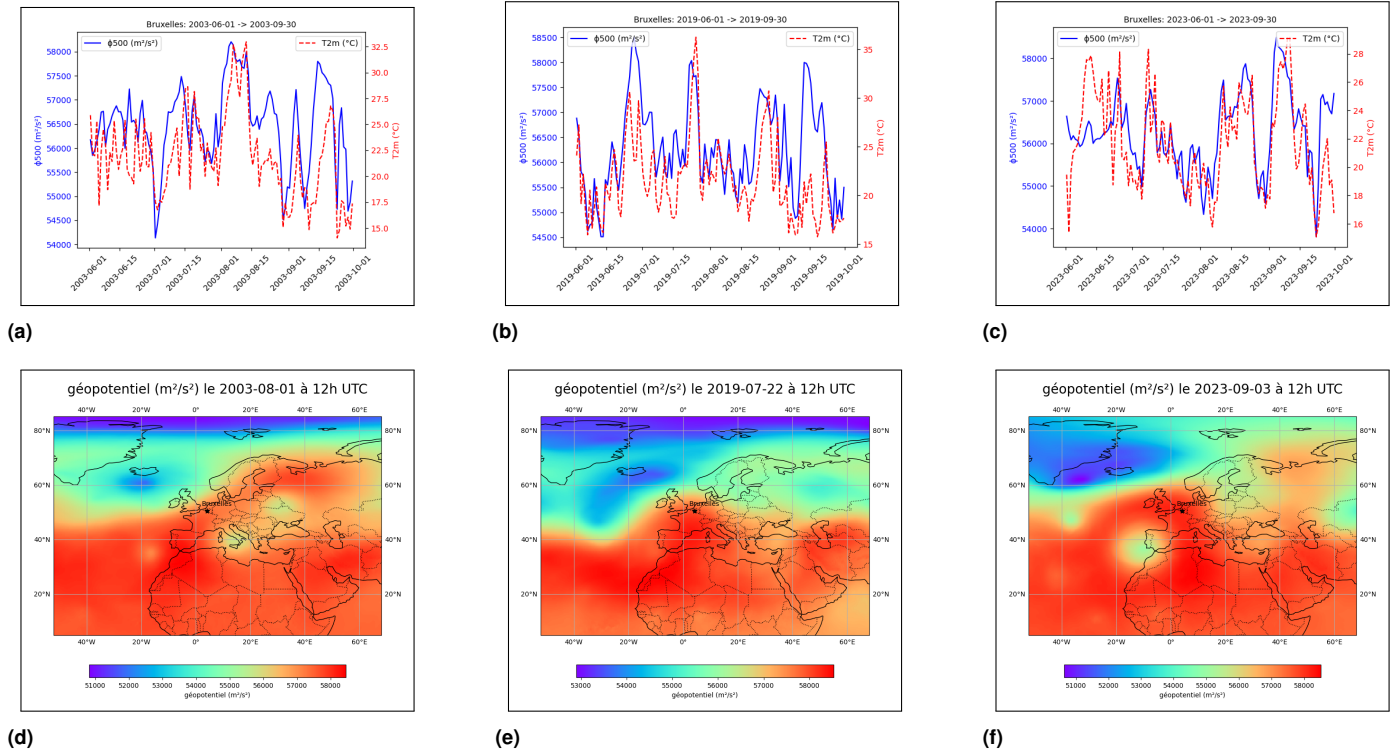


Fig. 4. 4a-4c : Évolution du géopotential à 500 hPa et de la température à 2m d'altitude à Bruxelles pendant l'été 2003, 2019 et 2023. **4d - 4f :** valeur du géopotential à 500 hPa au-dessus de l'Europe lors de trois dômes de chaleur.

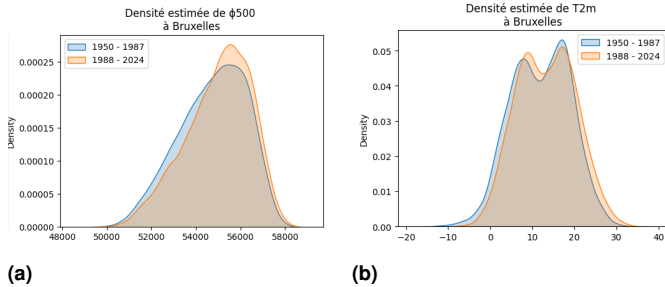


Fig. 5. Comparaison des deux courbes de densités de probabilité estimée entre les périodes 1950-1987 et 1988-2024, pour le géopotential ϕ_{500} (5a) et la température T_{2m} (5b).

de chaleur considéré semble être systématiquement suivi par une augmentation de la température. Les données ([8], [17]), une fois visualisées sur une carte, montrent que ces dômes de chaleur sont associés à des blocages omégas (visibles dans l'annexe A).

A.2. Résultats pour Bruxelles

Environ la moitié des périodes d'anomalie prolongée de géopotential et de températures concordent au niveau des dates. Cependant, cela ne veut pas dire que les autres périodes d'anomalie de géopotential ne sont pas associées à des augmentations de température, mais simplement que ces températures ne sont pas dans le 95^e percentile pendant au moins 5 jours consécutifs. Les trois dômes de chaleur considérés (août 2003, juillet 2019 et septembre 2023) détectés par le programme ont déjà été étudiés et répertoriés dans la littérature comme étant au moins en partie provoqués par un blocage atmosphérique et un bloc oméga.

La vague de chaleur de l'été 2003 en Europe est bien documentée, notamment par Mitchell, et al., 2019 [16]. Dans l'article,

il est expliqué que la vague de chaleur était alimentée par une onde de Rossby persistante à l'échelle planétaire, c'est-à-dire d'un méandre dans les vents de la haute troposphère. L'article explique que cela a formé un bloc oméga [16]. Dans l'article de García-Herrera, et al., 2010 [7], il est expliqué que la vague de chaleur s'est étendue pendant tout l'été et que des fréquences de blocages ont été observées du 16 juillet au 31 août. L'étude souligne que cette vague de chaleur exceptionnelle résultait de la combinaison de plusieurs facteurs, comme l'humidité anormalement faible du sol ou les températures marines de surface. L'institut royal météorologique de Belgique indique des températures dépassant largement les normales saisonnières, avec notamment 38.6 $^{\circ}C$ à Aubange, ce qui constitue la valeur la plus haute enregistrée pendant cette vague de chaleur[10].

La vague de l'été 2019 en Europe est également documentée dans la littérature. L'étude de Xu, et al., (2020 [26]) expliquent que ces températures exceptionnelles sont liées à des oscillations persistantes dans la haute troposphère et à des anomalies de la hauteur géopotential. L'article souligne que l'anticyclone associé a mené à un bloc oméga (Xu, et al., 2020 [26]).

Concernant, la canicule de l'été 2023, le *Copernicus Climate Change Service* identifie cet événement comme un dôme de chaleur [4]. En effet, la cause dominante serait un anticyclone qui comprime et réchauffe l'air. L'apport d'air chaud d'Afrique du Nord par advection a également joué un rôle, bien que ce facteur semble moins important [4]. Le dôme de chaleur à Villariès (Météo France, 2023[18]) mentionné précédemment correspond à cette même vague de chaleur estivale.

On voit donc que le programme détecte des périodes d'anomalies qui correspondent à des canicules marquantes historiquement. Celles-ci ont été identifiées à posteriori comme provoquées par un blocage oméga, ce que nous pouvons assimiler à un dôme de chaleur.

Ensuite, il y a un bon taux de concordance entre les périodes

d'anomalies de géopotential et de températures, ce qui montre qu'un lien existe entre ces deux variables. On voit sur les courbes de l'évolution du géopotential et de la température que les maximums de ces deux variables se succèdent dans le cas de dômes de chaleur. Cette relation de corrélation potentielle mériterait d'être explorée en détail, par exemple pour prévenir les populations d'une vague de chaleur imminente sur base de l'augmentation observée du géopotential.

Pour finir, les périodes d'anomalies détectées sont de plus en plus fréquentes, à la fois pour la température mais également pour le géopotential. Météo France explique que de tels épisodes pourraient s'avérer plus fréquents ou tardifs durant la saison estivale à cause du dérèglement climatique, qui « joue un rôle amplificateur et favorise une extension des vagues de chaleurs au-delà de la saison estivale » (Météo France, 2023 [18]). Cela rejoint les conclusions de plusieurs articles scientifiques. Par exemple, en ce qui concerne le dôme de chaleur de Lytton, White, et al., 2023 [25] expliquent qu'il est clair que le réchauffement de la planète a contribué à son intensité mais qu'il est difficile de quantifier l'impact du dérèglement climatique sur la fréquence de tels événements car des intensités si élevées sont très rares. Schumacher, et al., 2022 [20], tirent les mêmes conclusions en indiquant que ce facteur aurait amplifié de 0.9 °C cette vague de chaleur. Zhang, et al., 2023[27] affirment que le dérèglement climatique augmente de 150 fois la probabilité d'occurrence de ce type de phénomènes. Selon Stott et al. (2004) [24], le réchauffement anthropique a probablement contribué à la vague de chaleur européenne de 2003 en doublant sa probabilité d'occurrence.

De notre côté, grâce à l'analyse statistique des données et de leur distribution, on peut voir que une augmentation de l'asymétrie des données au fil du temps. En effet, dans l'étude de Domeisen. et al (2023), les auteurs observent que les températures suivent une normale asymétrique, ce qui indique que les données penchent vers les valeurs plus hautes, et que les événements extrêmes se produisent plus fréquemment que pour une distribution normale. Or, la distribution de 1988-2024 semble plus asymétrique que celle de 1950-2024, ce qui pourrait être une indication que les événements extrêmes deviennent de plus en plus fréquents. On a vu également que les différences observées entre les distributions de 1950-1987 et de 1988-2024 sont statistiquement significatives, suggérant des changements non-négligeables dans le comportement des anomalies au fil du temps. Ces résultats sont donc en accord avec les projections climatiques qui anticipent une intensification des événements extrêmes sous l'effet du réchauffement global.

B. Limites de l'approche et perspectives d'amélioration

Plusieurs points pourraient être améliorés dans notre méthode. Premièrement, notre programme ne prend pas en compte l'extension spatiale dans l'analyse des données. Il serait pertinent d'intégrer un critère de surface minimale lors du calcul des périodes d'anomalies. L'algorithme est actuellement conçu pour analyser les anomalies uniquement pour une ville donnée. Il serait utile de développer un programme capable de localiser automatiquement ces événements, sans nécessiter une ville précise en entrée.

Deuxièmement, dans notre version du programme, une période est prise en compte si elle dure au moins cinq jours consécutifs. Ce critère pourrait être assoupli : si les valeurs redescendent en dessous du seuil pendant deux jours ou moins, ces jours pourraient être inclus dans la période d'anomalie, permettant ainsi de fusionner des événements proches qui font probablement partie du même phénomène.

Enfin, utiliser des données à 12h00 UTC limite l'analyse, notam-

tamment la détection des phénomènes dans des zones à décalage comme en Amérique, où les données correspondent à des heures nocturnes. Cela fausse la représentation de l'impact des vagues de chaleur sur la population. Une bonne alternative pour l'analyse serait d'utiliser les données de la valeur maximale pour chaque jour à la place.

C. Choix de la définition du seuil

Le cœur même de notre analyse repose sur la définition d'un seuil à partir duquel les données sont considérées comme anormales. Dans le programme, le seuil est constant et calculé comme le 95^e percentile d'une période de référence (1950-2024 pour Bruxelles et 1994-2025 pour le reste de l'hémisphère nord). D'autres approches sont utilisées dans la littérature, comme l'expliquent Smith, et al., 2025 [23]. Dans leur article, plusieurs définitions de seuil sont considérées. Si on utilise un seuil qui intègre le réchauffement climatique, alors le programme ne détectera pas forcément plus fréquemment des événements d'anomalie la définition de donnée « anormale » change au fil du temps. Ils expliquent qu'avec un seuil constant, le programme arrive au bout d'un moment à « saturation »: les valeurs dépassent tellement souvent le seuil à cause du réchauffement global que la notion d'« anormal » perd tout son sens. Ainsi, le choix du seuil doit être fait en fonction des objectifs de l'étude. Un seuil constant permet de mesurer les écarts par rapport aux conditions historiques, ce qui est pertinent dans une perspective écologique ou sanitaire puisque les êtres vivants ne sont pas adaptés aux changements récents. Un seuil évolutif permet d'analyser la variabilité des vagues de chaleur indépendamment du réchauffement global. Cela est utile pour identifier des mécanismes climatiques temporaires ou distinguer les variations interannuelles des tendances de fond (Amaya, et al., 2023 [1])). Enfin, la manière dont les résultats sont perçus par le grand public dépend fortement du seuil choisi. Une définition trop technique ou changeante peut nuire à la compréhension et à l'appropriation des enjeux.

Au-delà du choix entre un seuil fixe ou évolutif, la saisonnalité est une autre dimension essentielle. Dans notre méthode, le seuil est constant toute l'année. Néanmoins, il est plus courant dans la littérature (voir par exemple Hobday, et al., 2016 [9] ou McKinnon, et al., 2022 [15]) d'utiliser un seuil saisonnier. Les anomalies sont alors calculées par rapport à ce qui est attendu pour chaque jour ou période de l'année.

5. CONCLUSION

Les résultats de ce projet montrent qu'il est possible d'identifier les événements de type « dôme de chaleur » à partir des données de géopotential à 500 hPa et de température en surface, en utilisant quelques critères simples tels qu'un seuil d'anomalie fixé et une durée minimale de cinq jours consécutifs. Tout d'abord, les dômes de chaleur récemment répertoriés dans la littérature ou les médias à travers l'hémisphère Nord ont bien été détectés par le programme, ce qui valide l'approche méthodologique et permet son application à la ville de Bruxelles. Ainsi, plusieurs événements d'anomalie y ont été identifiés, avec des intensités et des durées variables. Après vérification dans les médias et la littérature, on constate qu'ils correspondent à des canicules historiques et à des situations de blocage oméga. Finalement, les résultats indiquent une augmentation de la fréquence et de l'intensité de ces événements, ce qui est cohérent avec nos connaissances sur le réchauffement global de la planète. On peut donc conclure que notre méthode fonctionne, mais qu'elle peut être améliorée et que certaines incertitudes demeurent, notamment à propos des autres facteurs contribuant à la formation de ces canicules particulières et leur rôle exact dans le phénomène.

397

A. DÔMES DE CHALEUR HISTORIQUES

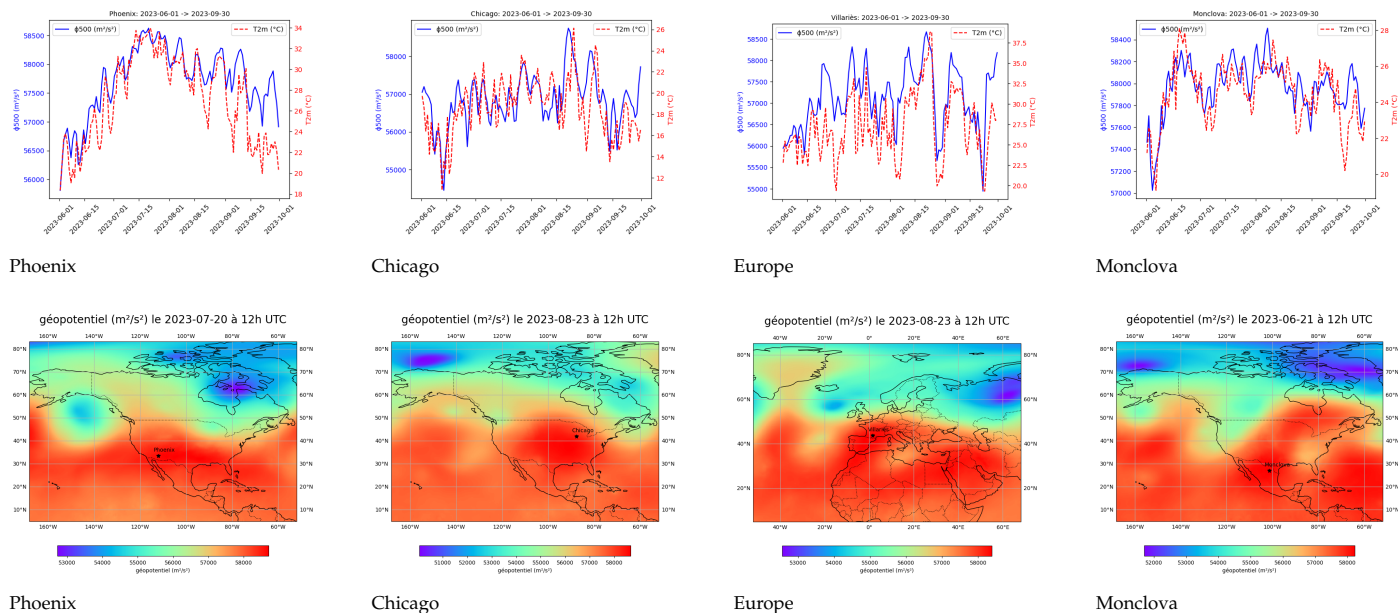


Fig. 6. En haut : évolution temporelle du géopotential et de la température pour différents dômes de chaleur de 2023. En bas : géopotential à 500 hPa montrant des blocages oméga associés à ces événements.

398

A. Lytton, juin 2021

Table 1. Caractéristiques de la période d'anomalie de juin 2021 à Lytton détecté par le programme.

	$\phi 500$	$T2m$
I.M.A*	1113.9 m ² /s ²	3.4°C
Debut	25-06-2021	25-06-2021
Fin	01-07-2021	10-08-2021
Durée	7 jours	16 jours
Maximum	58625.9 m ² /s ²	18.35°C
Date**	27-06-2021	29-06-2021

*Intensité moyenne d'anomalie

**Date à laquelle est atteint le maximum

399

B. Phoenix

Table 2. Caractéristiques du dôme de chaleur de juillet 2023 à Phoenix, détecté par le programme.

	Géopotential	Température
I.M.A	334.5 m ² /s ²	2.3°C
Debut	10-07-2023	2023-07-11
Fin	31-07-2023	2023-07-30
Durée	22 jours	20 jours
Maximum	58625.3 m ² /s ²	33.954°C
Date du maximum	20-07-2023	21-07-2023

Le programme ayant détecté deux périodes d'anomalies séparées uniquement par un jour (le 16 juillet 2024), nous choisissons de les fusionner.

401

Table 3. Caractéristiques du dôme de chaleur de juillet 2024 à Phoenix, détecté par le programme.

	Géopotentiel	Température
I.M.A	196.75 m ² /s ²	0.8°C
Debut	04-07-2024	09-07-2024
Fin	21-07-2024	13-07-2024
Durée	28 jours	5 jours
Maximum	58775.718m ² /s ²	32.6°C
Date du maximum	25-07-2024	24-07-2024

Table 4. Caractéristiques du dôme de chaleur d'août 2024 à Phoenix, détecté par le programme.

	Géopotentiel	Température
I.M.A	282.8 m ² /s ²	°C
Debut	01-08-2024	--
Fin	07-08-2024	--
Durée	7 jours	
Maximum	58481.59m ² /s ²	32.47°C
Date	06-08-2024	05-08-2024

402 C. Chicago, août 2023

Table 5. Caractéristiques du dôme de chaleur d'août 2023 à Chicago, détecté par le programme.

	Géopotentiel	Température
I.M.A	600.2 m ² /s ²	°C
Debut	19-08-2023	--
Fin	25-08-2023	--
Durée	7 jours	
Maximum	58745.1m ² /s ²	26.12°C
Date	21-08-2023	24-08-2023

403 D. Villariès, août 2023

Table 6. Caractéristiques du dôme de chaleur d'août 2023 à Villariès, détecté par le programme.

	Géopotentiel	Température
I.M.A	683.6m ² /s ²	5.6°C
Debut	18-08-2023	16-08-2023
Fin	24-08-2023	24-08-2023
Durée	7 jours	9 jours
Maximum	58665.35m ² /s ²	38.85°C
Date	21-08-2023	24-08-2023

E. Monclova, juin 2023**Table 7.** Caractéristiques du dôme de chaleur de juin 2023 à Monclova, détecté par le programme.

	Géopotential	Température
I.M.A	205.4m ² /s ²	2.2°C
Debut	16-06-2023	18-06-2023
Fin	27-06-2023	28-06-2023
Durée	12 jours	11 jours
Maximum	58302.07m ² /s ²	28.10°C
Date	20-06-2023	19-06-2023

B. RÉSULTATS DES DÉTECTIONS D'ANOMALIES À BRUXELLES

A. Géopotential

Géopotential à Bruxelles (Longitude = 4.21°, Latitude = 50.5°)

Période analysée : 1950-01-01 -> 2024-12-31

Sur 27394 jours, 1370 jours sont au-dessus du seuil (57002.32 m²/s²), soit 5.00%.

Il y a 70 périodes d'au moins 5 jours consécutifs.

Période 1 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 760.8 m²/s²) : ['1952-06-28', '1952-06-29', '1952-06-30', '1952-07-01', '1952-07-02']
Période 2 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 474.8 m²/s²) : ['1955-08-19', '1955-08-20', '1955-08-21', '1955-08-22', '1955-08-23', '1955-08-24']
Période 3 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 380.3 m²/s²) : ['1957-07-30', '1957-07-31', '1957-08-01', '1957-08-02', '1957-08-03', '1957-08-04']
Période 4 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 473.5 m²/s²) : ['1959-07-04', '1959-07-05', '1959-07-06', '1959-07-07', '1959-07-08', '1959-07-09', '1959-07-10']
Période 5 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 730.0 m²/s²) : ['1959-08-23', '1959-08-24', '1959-08-25', '1959-08-26', '1959-08-27']
Période 6 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 358.2 m²/s²) : ['1961-06-29', '1961-06-30', '1961-07-01', '1961-07-02', '1961-07-03']
Période 7 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 597.6 m²/s²) : ['1961-08-27', '1961-08-28', '1961-08-29', '1961-08-30', '1961-08-31', '1961-09-01']
Période 8 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 278.8 m²/s²) : ['1961-09-15', '1961-09-16', '1961-09-17', '1961-09-18', '1961-09-19']
Période 9 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 662.6 m²/s²) : ['1964-07-14', '1964-07-15', '1964-07-16', '1964-07-17', '1964-07-18']
Période 10 (18 jours, intensité moyenne d'anomalie = 401.2 m²/s²) : ['1969-07-11', '1969-07-12', '1969-07-13', '1969-07-14', '1969-07-15', '1969-07-16', '1969-07-17', '1969-07-18', '1969-07-19', '1969-07-20', '1969-07-21', '1969-07-22', '1969-07-23', '1969-07-24', '1969-07-25', '1969-07-26', '1969-07-27', '1969-07-28']
Période 11 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 330.9 m²/s²) : ['1969-08-05', '1969-08-06', '1969-08-07', '1969-08-08', '1969-08-09']
Période 12 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 390.6 m²/s²) : ['1970-09-17', '1970-09-18', '1970-09-19', '1970-09-20', '1970-09-21']
Période 13 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 464.1 m²/s²) : ['1971-07-06', '1971-07-07', '1971-07-08', '1971-07-09', '1971-07-10', '1971-07-11', '1971-07-12', '1971-07-13']
Période 14 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 266.3 m²/s²) : ['1971-09-03', '1971-09-04', '1971-09-05', '1971-09-06', '1971-09-07', '1971-09-08']
Période 15 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 261.9 m²/s²) : ['1973-08-09', '1973-08-10', '1973-08-11', '1973-08-12', '1973-08-13', '1973-08-14', '1973-08-15', '1973-08-16']
Période 16 (9 jours, intensité moyenne d'anomalie = 321.4 m²/s²) : ['1975-07-31', '1975-08-01', '1975-08-02', '1975-08-03', '1975-08-04', '1975-08-05', '1975-08-06', '1975-08-07', '1975-08-08']
Période 17 (10 jours, intensité moyenne d'anomalie = 442.1 m²/s²) : ['1976-06-24', '1976-06-25', '1976-06-26', '1976-06-27', '1976-06-28', '1976-06-29', '1976-06-30', '1976-07-01', '1976-07-02', '1976-07-03']
Période 18 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 442.3 m²/s²) : ['1982-07-07', '1982-07-08', '1982-07-09', '1982-07-10', '1982-07-11', '1982-07-12']
Période 19 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 339.5 m²/s²) : ['1982-09-10', '1982-09-11', '1982-09-12', '1982-09-13', '1982-09-14', '1982-09-15', '1982-09-16']
Période 20 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 267.5 m²/s²) : ['1983-07-09', '1983-07-10', '1983-07-11', '1983-07-12', '1983-07-13', '1983-07-14']
Période 21 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 356.5 m²/s²) : ['1983-07-26', '1983-07-27', '1983-07-28', '1983-07-29', '1983-07-30', '1983-07-31']
Période 22 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 803.1 m²/s²) : ['1983-09-23', '1983-09-24', '1983-09-25', '1983-09-26', '1983-09-27', '1983-09-28']
Période 23 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 399.4 m²/s²) : ['1985-09-26', '1985-09-27', '1985-09-28', '1985-09-29', '1985-09-30']
Période 24 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 358.2 m²/s²) : ['1985-10-11', '1985-10-12', '1985-10-13', '1985-10-14', '1985-10-15', '1985-10-16']
Période 25 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 400.1 m²/s²) : ['1986-06-26', '1986-06-27', '1986-06-28', '1986-06-29', '1986-06-30', '1986-07-01', '1986-07-02']
Période 26 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 361.5 m²/s²) : ['1986-09-28', '1986-09-29', '1986-09-30', '1986-10-01', '1986-10-02', '1986-10-03', '1986-10-04']
Période 27 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 193.2 m²/s²) : ['1989-07-20', '1989-07-21', '1989-07-22', '1989-07-23', '1989-07-24']
Période 28 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 373.1 m²/s²) : ['1990-07-18', '1990-07-19', '1990-07-20', '1990-07-21', '1990-07-22']
Période 29 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 646.8 m²/s²) : ['1990-07-29', '1990-07-30', '1990-07-31', '1990-08-01', '1990-08-02', '1990-08-03', '1990-08-04']
Période 30 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 349.3 m²/s²) : ['1991-08-27', '1991-08-28', '1991-08-29', '1991-08-30', '1991-08-31']
Période 31 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 267.3 m²/s²) : ['1991-09-03', '1991-09-04', '1991-09-05', '1991-09-06', '1991-09-07']
Période 32 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 327.4 m²/s²) : ['1992-05-13', '1992-05-14', '1992-05-15', '1992-05-16', '1992-05-17']
Période 33 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 179.1 m²/s²) : ['1993-08-17', '1993-08-18', '1993-08-19', '1993-08-20', '1993-08-21']
Période 34 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 205.7 m²/s²) : ['1995-06-25', '1995-06-26', '1995-06-27', '1995-06-28', '1995-06-29']
Période 35 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 439.0 m²/s²) : ['1995-10-07', '1995-10-08', '1995-10-09', '1995-10-10', '1995-10-11']
Période 36 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 287.0 m²/s²) : ['1997-08-09', '1997-08-10', '1997-08-11', '1997-08-12', '1997-08-13', '1997-08-14', '1997-08-15']
Période 37 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 568.1 m²/s²) : ['1998-08-05', '1998-08-06', '1998-08-07', '1998-08-08', '1998-08-09', '1998-08-10', '1998-08-11']
Période 38 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 535.9 m²/s²) : ['2001-07-28', '2001-07-29', '2001-07-30', '2001-07-31', '2001-08-01']
Période 39 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 260.6 m²/s²) : ['2001-08-22', '2001-08-23', '2001-08-24', '2001-08-25', '2001-08-26']
Période 40 (13 jours, intensité moyenne d'anomalie = 815.9 m²/s²) : ['2003-08-01', '2003-08-02', '2003-08-03', '2003-08-04', '2003-08-05', '2003-08-06', '2003-08-07', '2003-08-08', '2003-08-09', '2003-08-10', '2003-08-11', '2003-08-12', '2003-08-13']
Période 41 (9 jours, intensité moyenne d'anomalie = 450.7 m²/s²) : ['2003-09-13', '2003-09-14', '2003-09-15', '2003-09-16', '2003-09-17', '2003-09-18', '2003-09-19', '2003-09-20', '2003-09-21']
Période 42 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 731.3 m²/s²) : ['2004-09-03', '2004-09-04', '2004-09-05', '2004-09-06', '2004-09-07', '2004-09-08', '2004-09-09']
Période 43 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 164.9 m²/s²) : ['2005-07-10', '2005-07-11', '2005-07-12', '2005-07-13', '2005-07-14']
Période 44 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 192.8 m²/s²) : ['2006-06-09', '2006-06-10', '2006-06-11', '2006-06-12', '2006-06-13']
Période 45 (12 jours, intensité moyenne d'anomalie = 540.8 m²/s²) : ['2006-07-10', '2006-07-11', '2006-07-12', '2006-07-13', '2006-07-14', '2006-07-15', '2006-07-16', '2006-07-17', '2006-07-18', '2006-07-19', '2006-07-20', '2006-07-21']
Période 46 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 222.1 m²/s²) : ['2008-08-26', '2008-08-27', '2008-08-28', '2008-08-29', '2008-08-30']
Période 47 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 317.3 m²/s²) : ['2010-07-07', '2010-07-08', '2010-07-09', '2010-07-10', '2010-07-11']
Période 48 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 597.5 m²/s²) : ['2011-09-27', '2011-09-28', '2011-09-29', '2011-09-30', '2011-10-01', '2011-10-02', '2011-10-03']
Période 49 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 467.9 m²/s²) : ['2013-07-04', '2013-07-05', '2013-07-06', '2013-07-07', '2013-07-08', '2013-07-09', '2013-07-10']
Période 50 (9 jours, intensité moyenne d'anomalie = 195.4 m²/s²) : ['2013-07-14', '2013-07-15', '2013-07-16', '2013-07-17', '2013-07-18', '2013-07-19', '2013-07-20', '2013-07-21', '2013-07-22']
Période 51 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 590.0 m²/s²) : ['2015-06-29', '2015-06-30', '2015-07-01', '2015-07-02', '2015-07-03', '2015-07-04']
Période 52 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 294.5 m²/s²) : ['2016-07-16', '2016-07-17', '2016-07-18', '2016-07-19', '2016-07-20']
Période 53 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 731.1 m²/s²) : ['2016-08-22', '2016-08-23', '2016-08-24', '2016-08-25', '2016-08-26', '2016-08-27']
Période 54 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 444.9 m²/s²) : ['2017-06-17', '2017-06-18', '2017-06-19', '2017-06-20', '2017-06-21']
Période 55 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 484.9 m²/s²) : ['2018-07-31', '2018-08-01', '2018-08-02', '2018-08-03', '2018-08-04', '2018-08-05', '2018-08-06']
Période 56 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 251.5 m²/s²) : ['2018-08-19', '2018-08-20', '2018-08-21', '2018-08-22']
Période 57 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 268.0 m²/s²) : ['2019-02-22', '2019-02-23', '2019-02-24', '2019-02-25', '2019-02-26']
Période 58 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 945.0 m²/s²) : ['2019-06-24', '2019-06-25', '2019-06-26', '2019-06-27', '2019-06-28', '2019-06-29', '2019-06-30']
Période 59 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 688.4 m²/s²) : ['2019-07-22', '2019-07-23', '2019-07-24', '2019-07-25', '2019-07-26']
Période 60 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 279.4 m²/s²) : ['2019-08-22', '2019-08-23', '2019-08-24', '2019-08-25', '2019-08-26', '2019-08-27']
Période 61 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 702.2 m²/s²) : ['2019-09-12', '2019-09-13', '2019-09-14', '2019-09-15', '2019-09-16']
Période 62 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 462.1 m²/s²) : ['2020-08-06', '2020-08-07', '2020-08-08', '2020-08-09', '2020-08-10', '2020-08-11', '2020-08-12']
Période 63 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 543.9 m²/s²) : ['2020-09-12', '2020-09-13', '2020-09-14', '2020-09-15', '2020-09-16', '2020-09-17', '2020-09-18']
Période 64 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 396.3 m²/s²) : ['2022-07-07', '2022-07-08', '2022-07-09', '2022-07-10', '2022-07-11', '2022-07-12', '2022-07-13']
Période 65 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 415.0 m²/s²) : ['2022-08-07', '2022-08-08', '2022-08-09', '2022-08-10', '2022-08-11', '2022-08-12', '2022-08-13']
Période 66 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 445.1 m²/s²) : ['2023-08-18', '2023-08-19', '2023-08-20', '2023-08-21', '2023-08-22', '2023-08-23', '2023-08-24']
Période 67 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1025.1 m²/s²) : ['2023-09-03', '2023-09-04', '2023-09-05', '2023-09-06', '2023-09-07', '2023-09-08', '2023-09-09', '2023-09-10']
Période 68 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 296.7 m²/s²) : ['2023-10-06', '2023-10-07', '2023-10-08', '2023-10-09', '2023-10-10']
Période 69 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 185.6 m²/s²) : ['2024-08-27', '2024-08-28', '2024-08-29', '2024-08-30', '2024-08-31', '2024-09-01']
Période 70 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 369.8 m²/s²) : ['2024-10-30', '2024-10-31', '2024-11-01', '2024-11-02', '2024-11-03', '2024-11-04']

B. Température

Température à Bruxelles (Longitude = 4.21°, Latitude = 50.5°)

Période analysée : 1950-01-01 -> 2024-12-31

Sur 27394 jours, 1370 jours sont au-dessus du seuil (23.72 °C), soit 5.00%.

Il y a 57 périodes d'au moins 5 jours consécutifs.

Période 1 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.6 °C) : ['1950-06-03', '1950-06-04', '1950-06-05', '1950-06-06', '1950-06-07']
Période 2 (11 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.8 °C) : ['1952-06-28', '1952-06-29', '1952-06-30', '1952-07-01', '1952-07-02', '1952-07-03', '1952-07-04', '1952-07-05', '1952-07-06', '1952-07-07', '1952-07-08']
Période 3 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.2 °C) : ['1955-08-19', '1955-08-20', '1955-08-21', '1955-08-22', '1955-08-23', '1955-08-24']
Période 4 (10 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.4 °C) : ['1957-06-28', '1957-06-29', '1957-06-30', '1957-07-01', '1957-07-02', '1957-07-03', '1957-07-04', '1957-07-05', '1957-07-06', '1957-07-07']
Période 5 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.7 °C) : ['1959-06-21', '1959-06-22', '1959-06-23', '1959-06-24', '1959-06-25']
Période 6 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.7 °C) : ['1964-07-14', '1964-07-15', '1964-07-16', '1964-07-17', '1964-07-18']
Période 7 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.2 °C) : ['1970-08-02', '1970-08-03', '1970-08-04', '1970-08-05', '1970-08-06']

497 Période 8 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.2 °C) : ['1971-07-08', '1971-07-09', '1971-07-10', '1971-07-11', '1971-07-12']
498 Période 9 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.7 °C) : ['1973-08-11', '1973-08-12', '1973-08-13', '1973-08-14', '1973-08-15', '1973-08-16', '1973-08-17']
499 Période 10 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.2 °C) : ['1973-09-04', '1973-09-05', '1973-09-06', '1973-09-07', '1973-09-08', '1973-09-09']
500 Période 11 (11 jours, intensité moyenne d'anomalie = 4.1 °C) : ['1975-07-30', '1975-07-31', '1975-08-01', '1975-08-02', '1975-08-03', '1975-08-04', '1975-08-05', '1975-08-06', '1975-08-07', '1975-08-08',
501 '1975-08-09']
502 Période 12 (17 jours, intensité moyenne d'anomalie = 5.6 °C) : ['1976-06-23', '1976-06-24', '1976-06-25', '1976-06-26', '1976-06-27', '1976-06-28', '1976-06-29', '1976-06-30', '1976-07-01', '1976-07-02',
503 '1976-07-03', '1976-07-04', '1976-07-05', '1976-07-06', '1976-07-07', '1976-07-08', '1976-07-09']
504 Période 13 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.0 °C) : ['1982-05-31', '1982-06-01', '1982-06-02', '1982-06-03', '1982-06-04', '1982-06-05', '1982-06-06', '1982-06-07']
505 Période 14 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.3 °C) : ['1982-09-15', '1982-09-16', '1982-09-17', '1982-09-18', '1982-09-19']
506 Période 15 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.5 °C) : ['1983-07-08', '1983-07-09', '1983-07-10', '1983-07-11', '1983-07-12']
507 Période 16 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.1 °C) : ['1984-08-19', '1984-08-20', '1984-08-21', '1984-08-22', '1984-08-23']
508 Période 17 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.1 °C) : ['1986-06-26', '1986-06-27', '1986-06-28', '1986-06-29', '1986-06-30', '1986-07-01', '1986-07-02', '1986-07-03']
509 Période 18 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 4.3 °C) : ['1990-07-30', '1990-07-31', '1990-08-01', '1990-08-02', '1990-08-03', '1990-08-04', '1990-08-05']
510 Période 19 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.0 °C) : ['1991-08-31', '1991-09-01', '1991-09-02', '1991-09-03', '1991-09-04']
511 Période 20 (9 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.4 °C) : ['1994-07-19', '1994-07-20', '1994-07-21', '1994-07-22', '1994-07-23', '1994-07-24', '1994-07-25', '1994-07-26', '1994-07-27']
512 Période 21 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.0 °C) : ['1995-06-27', '1995-06-28', '1995-06-29', '1995-06-30', '1995-07-01', '1995-07-02']
513 Période 22 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 4.0 °C) : ['1995-07-30', '1995-07-31', '1995-08-01', '1995-08-02', '1995-08-03', '1995-08-04', '1995-08-05', '1995-08-06']
514 Période 23 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.4 °C) : ['1995-08-16', '1995-08-17', '1995-08-18', '1995-08-19', '1995-08-20', '1995-08-21', '1995-08-22', '1995-08-23']
515 Période 24 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.2 °C) : ['1997-08-06', '1997-08-07', '1997-08-08', '1997-08-09', '1997-08-10', '1997-08-11', '1997-08-12', '1997-08-13']
516 Période 25 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.8 °C) : ['1997-08-15', '1997-08-16', '1997-08-17', '1997-08-18', '1997-08-19', '1997-08-20', '1997-08-21']
517 Période 26 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.8 °C) : ['1998-05-10', '1998-05-11', '1998-05-12', '1998-05-13', '1998-05-14']
518 Période 27 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.1 °C) : ['1999-07-28', '1999-07-29', '1999-07-30', '1999-07-31', '1999-08-01', '1999-08-02']
519 Période 28 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.7 °C) : ['2001-07-25', '2001-07-26', '2001-07-27', '2001-07-28', '2001-07-29', '2001-07-30', '2001-07-31']
520 Période 29 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.8 °C) : ['2001-08-22', '2001-08-23', '2001-08-24', '2001-08-25', '2001-08-26']
521 Période 30 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.8 °C) : ['2002-08-14', '2002-08-15', '2002-08-16', '2002-08-17', '2002-08-18', '2002-08-19']
522 Période 31 (13 jours, intensité moyenne d'anomalie = 5.3 °C) : ['2003-08-01', '2003-08-02', '2003-08-03', '2003-08-04', '2003-08-05', '2003-08-06', '2003-08-07', '2003-08-08', '2003-08-09', '2003-08-10',
523 '2003-08-11', '2003-08-12', '2003-08-13']
524 Période 32 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.7 °C) : ['2003-09-18', '2003-09-19', '2003-09-20', '2003-09-21', '2003-09-22']
525 Période 33 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.0 °C) : ['2004-09-03', '2004-09-04', '2004-09-05', '2004-09-06', '2004-09-07']
526 Période 34 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.7 °C) : ['2005-06-18', '2005-06-19', '2005-06-20', '2005-06-21', '2005-06-22', '2005-06-23', '2005-06-24', '2005-06-25']
527 Période 35 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.4 °C) : ['2006-06-30', '2006-07-01', '2006-07-02', '2006-07-03', '2006-07-04', '2006-07-05', '2006-07-06']
528 Période 36 (15 jours, intensité moyenne d'anomalie = 4.0 °C) : ['2006-07-16', '2006-07-17', '2006-07-18', '2006-07-19', '2006-07-20', '2006-07-21', '2006-07-22', '2006-07-23', '2006-07-24', '2006-07-25',
529 '2006-07-26', '2006-07-27', '2006-07-28', '2006-07-29', '2006-07-30']
530 Période 37 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.5 °C) : ['2009-06-29', '2009-06-30', '2009-07-01', '2009-07-02', '2009-07-03']
531 Période 38 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.7 °C) : ['2010-06-26', '2010-06-27', '2010-06-28', '2010-06-29', '2010-06-30', '2010-07-01', '2010-07-02', '2010-07-03']
532 Période 39 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 4.6 °C) : ['2010-07-07', '2010-07-08', '2010-07-09', '2010-07-10', '2010-07-11']
533 Période 40 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.4 °C) : ['2012-08-17', '2012-08-18', '2012-08-19', '2012-08-20', '2012-08-21']
534 Période 41 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.5 °C) : ['2013-07-15', '2013-07-16', '2013-07-17', '2013-07-18', '2013-07-19']
535 Période 42 (7 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.2 °C) : ['2013-07-21', '2013-07-22', '2013-07-23', '2013-07-24', '2013-07-25', '2013-07-26', '2013-07-27']
536 Période 43 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 5.3 °C) : ['2015-06-30', '2015-07-01', '2015-07-02', '2015-07-03', '2015-07-04', '2015-07-05']
537 Période 44 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 5.2 °C) : ['2016-08-23', '2016-08-24', '2016-08-25', '2016-08-26', '2016-08-27']
538 Période 45 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 5.3 °C) : ['2017-06-18', '2017-06-19', '2017-06-20', '2017-06-21', '2017-06-22']
539 Période 46 (11 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.9 °C) : ['2018-06-28', '2018-06-29', '2018-06-30', '2018-07-01', '2018-07-02', '2018-07-03', '2018-07-04', '2018-07-05', '2018-07-06', '2018-07-07',
540 '2018-07-08']
541 Période 47 (14 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.3 °C) : ['2018-07-14', '2018-07-15', '2018-07-16', '2018-07-17', '2018-07-18', '2018-07-19', '2018-07-20', '2018-07-21', '2018-07-22', '2018-07-23',
542 '2018-07-24', '2018-07-25', '2018-07-26', '2018-07-27']
543 Période 48 (11 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.9 °C) : ['2018-07-29', '2018-07-30', '2018-07-31', '2018-08-01', '2018-08-02', '2018-08-03', '2018-08-04', '2018-08-05', '2018-08-06', '2018-08-07',
544 '2018-08-08']
545 Période 49 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 8.1 °C) : ['2019-07-22', '2019-07-23', '2019-07-24', '2019-07-25', '2019-07-26']
546 Période 50 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.9 °C) : ['2019-08-23', '2019-08-24', '2019-08-25', '2019-08-26', '2019-08-27', '2019-08-28']
547 Période 51 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.8 °C) : ['2020-06-23', '2020-06-24', '2020-06-25', '2020-06-26', '2020-06-27']
548 Période 52 (12 jours, intensité moyenne d'anomalie = 5.8 °C) : ['2020-08-05', '2020-08-06', '2020-08-07', '2020-08-08', '2020-08-09', '2020-08-10', '2020-08-11', '2020-08-12', '2020-08-13', '2020-08-14',
549 '2020-08-15', '2020-08-16']
550 Période 53 (5 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.1 °C) : ['2021-06-14', '2021-06-15', '2021-06-16', '2021-06-17', '2021-06-18']
551 Période 54 (9 jours, intensité moyenne d'anomalie = 4.0 °C) : ['2022-08-08', '2022-08-09', '2022-08-10', '2022-08-11', '2022-08-12', '2022-08-13', '2022-08-14', '2022-08-15', '2022-08-16']
552 Période 55 (6 jours, intensité moyenne d'anomalie = 1.5 °C) : ['2022-09-01', '2022-09-02', '2022-09-03', '2022-09-04', '2022-09-05', '2022-09-06']
553 Période 56 (9 jours, intensité moyenne d'anomalie = 2.6 °C) : ['2023-06-09', '2023-06-10', '2023-06-11', '2023-06-12', '2023-06-13', '2023-06-14', '2023-06-15', '2023-06-16', '2023-06-17']
554 Période 57 (8 jours, intensité moyenne d'anomalie = 3.4 °C) : ['2023-09-04', '2023-09-05', '2023-09-06', '2023-09-07', '2023-09-08', '2023-09-09', '2023-09-10', '2023-09-11']

Disclosures. Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt.

Data availability. Les données utilisées dans cette étude sont disponibles dans Ref. [8] et Ref [17]. Le code pour reproduire les graphiques et autres résultats est disponible à <https://github.com/clemence-g/Heat-dome-analysis>.

REFERENCES

1. Dillon J. Amaya, Michael G. Jacox, Melanie R. Fewings, Vincent S. Saba, Malte F. Stuecker, Ryan R. Rykaczewski, Andrew C. Ross, Charles A. Stock, Antonietta Capotondi, Colleen M. Petrik, Steven J. Bograd, Michael A. Alexander, Wei Cheng, Albert J. Hermann, Kelly A. Kearney, and Brian S. Powell. Marine heatwaves need clear definitions so coastal communities can adapt. *Nature*, 616:32–35, April 2023.
2. D. Barriopedro, R. García-Herrera, C. Ordóñez, D. G. Miralles, and S. Salcedo-Sanz. Heat waves: Physical understanding and scientific challenges. *Reviews of Geophysics*, 61:e2022RG000780, 2023.
3. Catherine Clifford. Phoenix suffers a record 31 straight days of 110-degree highs, and more heat is on the way, 2023.
4. CMWF. The european heatwave of july 2023 in a longer-term context, 2023.
5. Dalia Faheid and Robert Shackelford. Heat dome set to bring more sizzling temperatures to the west a day after death valley hit 122 degrees, 2024.
6. D. I. V. Domeisen, E. A. B. Eltahir, E. M. Fischer, and et al. Prediction and projection of heatwaves. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4:36–50, 2023.
7. R. García-Herrera, J. Díaz, R. M. Trigo, J. Luterbacher, and E. M. Fischer and. A review of the european summer heat wave of 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(4):267–306, 2010.
8. H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, G. Biavati, A. Horányi, J. Muñoz Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, I. Rozum, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, D. Dee, and J.-N. Thépaut. Era5 hourly data on pressure levels from 1940 to present, 2023. Accessed on 23-03-2025.
9. Alistair J. Hobday, Lisa V. Alexander, Sarah E. Perkins, Dan A. Smale, Sandra C. Straub, Eric C.J. Oliver, Jessica A. Benthuyssen, Michael T. Burrows, Markus G. Donat, Ming Feng, Neil J. Holbrook, Pippa J. Moore, Hillary A. Scannell, Alex Sen Gupta, and Thomas Wernberg. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141:227–238, 2016.
10. Institut Royal Météorologique de Belgique. Climat de la Belgique, 2025.
11. P. Jain, A. R. Sharma, D. C. Acuna, J. T. Abatzoglou, and M. Flannigan. Record-breaking fire weather in north america in 2021 was initiated by the pacific northwest heat dome. *Communications Earth & Environment*, 5, 2024.
12. Karine Durand. Météo : les États-unis et le mexique pris dans le piège d'un jet stream délirant, 2023.
13. L.-A. Kautz, O. Martius, S. Pfahl, J. G. Pinto, A. M. Ramos, P. M. Sousa, and T. Woollings. Atmospheric blocking and weather extremes over the euro-atlantic sector – a review. *Weather and Climate Dynamics*, 3(1):305–336, 2022.
14. Lindsey Doermann. Heat dome descends on central u.s., 2023.
15. K. A. McKinnon and I. R. Simpson. How unexpected was the 2021 pacific northwest heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49:e2022GL100380, 2022.
16. Dann Mitchell, Kai Kornhuber, Chris Huntingford, and Peter Uhe. The day the 2003 european heatwave record was broken. *The Lancet Planetary Health*, 3(7):e290–e292, 2019.
17. J. Muñoz Sabater. Era5-land hourly data from 1950 to present, 2019. Accessed on 23-03-2025.
18. Météo France. Août 2023 : une canicule tardive exceptionnelle sur une grande partie du pays, 2023.
19. E. Neal, C. C. Huang, and N. Nakamura. The 2021 pacific northwest heat wave and associated blocking: meteorology and the role of an upstream cyclone as a diabatic source of wave activity. *Geophysical Research Letters*, 49, 2022.
20. D. Schumacher, M. Hauser, and S. I. Seneviratne. Drivers and mechanisms of the 2021 pacific northwest heatwave. *Earth's Future*, 10, 2022.
21. SciPy Contributors. *scipy.stats.ks_2samp*, 2025.
22. Shuang-Ye Wu. What the jet stream and climate change had to do with the hottest summer on record remember all those heat domes?, 2024.
23. Kathryn E. Smith, Alex Sen Gupta, Dillon Amaya, Jessica A. Benthuyssen, Michael T. Burrows, Antonietta Capotondi, Karen Filbee-Dexter, Thomas L. Frölicher, Alistair J. Hobday, Neil J. Holbrook, Neil Malan, Pippa J. Moore, Eric C.J. Oliver, Benjamin Richaud, Julio Salcedo-Castro, Dan A. Smale, Mads Thomsen, and Thomas Wernberg. Baseline matters: Challenges and implications of different marine heatwave baselines. *Progress in Oceanography*, 231:103404, 2025.
24. Peter A. Stott, D. A. Stone, and M. R. Allen. Human contribution to the european heatwave of 2003. *Nature*, 432(7017):610–614, 2004.
25. R. H. White, S. Anderson, J. F. Booth, G. Braich, C. Draeger, C. Fei, and G. West. The unprecedented pacific northwest heatwave of june 2021. *Nature Communications*, 14:727, 2023.
26. Peiqiang Xu, Lin Wang, Yuyun Liu, Wen Chen, and Ping Huang. The record-breaking heat wave of june 2019 in central europe. *Atmospheric Science Letters*, 21(4):e964, 2020.
27. Xing Zhang, Tianjun Zhou, Wenxia Zhang, Liwen Ren, Jie Jiang, Shuai Hu, Meng Zuo, Lixia Zhang, and Wenmin Man. Increased impact of heat domes on 2021-like heat extremes in north america under global warming. *Nature Communications*, 14(1):1690, 2023.
28. D. Zwillinger and S. Kokoska. *CRC Standard Probability and Statistics Tables and Formulae*. Chapman Hall: New York, 2000.