

Identification et analyse de dômes de chaleur sur base des anomalies de géopotentiel et de température

Projet personnel en physique

CLÉMENCE GEORGES^{1,*}

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

* clemence.georges@student.uclouvain.be

Compiled May 17, 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 sur la base des anomalies de géopotentiel à 500 hPa et de température à 2 mètres dans les données issues de ERA5. Après la validation sur des cas documentés, 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.

1. INTRODUCTION

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

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 qui a commencé à étudier les mécanismes thermodynamiques et atmosphériques responsables de ce phénomène. Le terme "dôme de chaleur" n'existe pas en tant que tel dans les manuels de météorologie. 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. L'air piégé dans cette zone subit une subsidence, un mouvement descendant qui le comprime et augmente sa température. Plusieurs autres éléments contribuent au phénomène, tels qu'une humidité anormalement basse du sol ou encore un réchauffement de l'air en amont (voir le panneau 1.1 pour plus de détails) [1, 2].

À l'heure actuelle, il n'y a pas de définition générique du phénomène de dôme de chaleur qui soit admise par la communauté scientifique. Cela pose problème pour les étudier et les comparer, ou lors de la communication avec les acteurs locaux et le grand public. Par conséquent, ce projet vise à développer une méthode numérique simple et reproductible capable de détecter les phénomènes de dômes de chaleur à partir des données ERA5 de géopotentiel à 500hPa [3] et de température à 2m d'altitude [4]. Le géopotentiel désigne l'énergie potentielle gravitationnelle d'une masse de 1 kg par rapport au niveau moyen de la mer [3]. Après validation sur des cas historiques, cette méthode sera appliquée à la ville de Bruxelles pour 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*). Une réanalyse est une combinaison d'observations et de modèles numériques qui génère des séries temporelles cohérentes de variables climatiques (dans notre cas, sur les 80 dernières années). Plus précisément, nous utilisons les ensembles de données « ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present » [3] et « ERA5 Land hourly data from 1950 to present » [4] qui contiennent respectivement les données de géopotentiel 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 variable étudiée. Le choix d'utiliser un percentile plutôt qu'un écart-type repose sur plusieurs considérations pratiques. D'abord, un seuil basé sur l'écart-type ne permet pas d'isoler efficacement les événements extrêmes : $\mu + \sigma$ est un seuil trop bas et $\mu + 2\sigma$ est un seuil trop haut. Le 95^e percentile semble être un bon compromis (57002,32 m²/s² à Bruxelles). Nous avons retenu le 95^e percentile afin de garder 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 [9] et [10]). Finalement, l'utilisation d'un percentile ne nécessite aucune hypothèse sous-jacente sur la distribution statistique des données. Ce seuil, constant sur toute la période et indépendant des saisons ou du réchauffement climatique, est calculé sur l'ensemble des données pour chaque lieu. Le deuxième critère est que les valeurs doivent dépasser le seuil d'anomalie pendant au moins cinq jours consécutifs [11]. Cela permet d'exclure les fluctuations rapides et de se concentrer

Panneau 1.1 : 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. En effet, les records de températures au Canada ont été dépassés trois jours de suite à plusieurs endroits, avec un maximum de 49,6°C enregistré à Lytton le 29 juin 2021 [5]. Cet événement a été défini comme un "dôme de chaleur", et plusieurs mécanismes ont été identifiés [1, 2]:

- Sinusoïté persistante des vents de la haute atmosphère formant un blocage oméga, piégeant un anticyclone entre deux dépressions [6].
- Subsidence* en raison de la 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, retenant moins bien la chaleur et la transmettant plus rapidement à l'air en surface.
- Réchauffement climatique anthropique augmentant la teneur en vapeur d'eau atmosphérique et l'intensité du phénomène.

Ce dôme a combiné plusieurs facteurs aggravants : un air déjà anormalement chaud, ayant gagné de la chaleur en traversant des zones très sèches et ensoleillées (réchauffement "adiabatique"), la présence de montagnes qui ont élevé l'air par advection, un îlot de chaleur urbain, et un ensoleillement maximal à l'approche du solstice d'été [2, 1].

*La subsidence est un mouvement de l'air vers le bas [7].

**Dans une transformation adiabatique, le système n'échange pas d'énergie sous forme de chaleur avec l'extérieur [8].

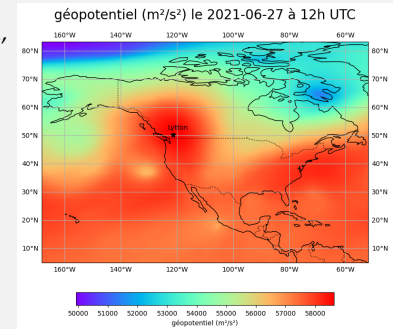


Fig. 1. Valeurs de géopotential au dessus de l'Amérique du Nord le 27 juin 2021 à 12h UTC. L'anticyclone est visible au dessus de la ville de Lytton.

sur les événements persistants. Ce critère est courant dans les études d'anomalies climatiques (voir par exemple [9], [10] et [12]). 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 ces 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.

Afin de tester la correspondance des résultats du programme avec la réalité, l'analyse est d'abord réalisée pour plusieurs villes de l'hémisphère nord ayant enregistré un événement de dôme de chaleur. Ensuite, il est appliqué à la ville de Bruxelles (Belgique). Nous y retiendrons les trois événements les plus remarquables et nous regarderons s'ils ont été identifiés dans la littérature scientifique ou les médias. Finalement, l'évolution des données depuis 1950 sera analysée à l'aide d'outils statistiques (calcul de la corrélation entre les anomalies et le temps 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 » a été introduit dans les études scientifiques et les médias à la suite de la vague de chaleur qui s'est abattue sur l'ouest de l'Amérique du Nord en juin 2021 (voir le panneau 1.1 pour l'explication des mécanismes qui ont conduit à cette canicule). Les exemples étudiés dans la suite sont donc postérieurs à 2021.

A.1. Lytton, juin 2021

Appliqué aux données de géopotential [3] et de température [4] pour Lytton (Canada), 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. Les intensités moyennes d'anomalie sont $\Delta\phi 500 = 1113,9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ et $\Delta T2m = 3,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (voir la table 1 dans l'annexe A pour les résultats détaillés). L'évolution du géopotential et de la température (voir figure 2) montre un pic particulièrement intense vers la fin du mois de juin ainsi qu'un décalage entre les deux courbes. Le maximum de géopotential a été atteint le 27 juin 2021 avec $58625,9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ [3] et le maximum de température le 29 juin 2021 avec $18,35 \text{ }^\circ\text{C}$ [4].

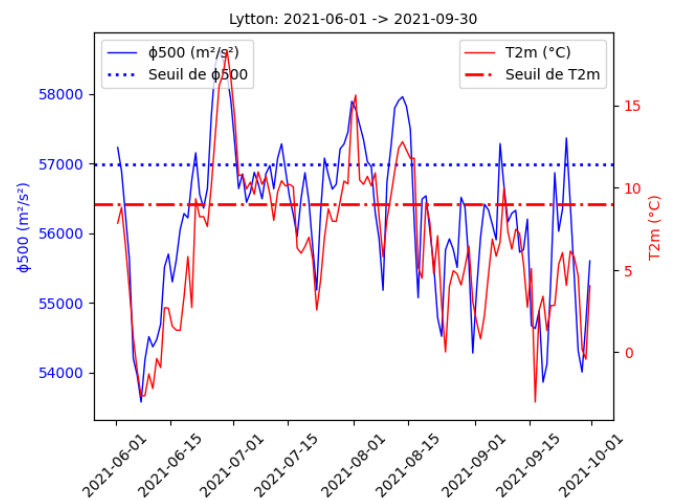


Fig. 2. Évolution du géopotential (bleu) et de la température (rouge) ainsi que les seuils associés, à Lytton pendant l'été 2021.

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 (États-Unis) en juillet 2023 [13], juin [14] et septembre 2024 [15], Chicago (États-Unis) en août 2023 [16], Villariès (France) en août 2023 [17] et Monclova (Mexique) en juin 2023 [18].

Dans les données de $\phi 500$, des périodes d'anomalie ont été détectées aux dates de ces dômes de chaleur, sauf pour les événements de juin et septembre 2024 à Phoenix. Des périodes d'anomalies de $T2m$ ont été détectées pour les dômes de chaleur de Villariès et de Monclova. Le programme n'a pas détecté d'anomalies de températures pour le mois d'août 2023 à Phoenix et à Chicago. Cependant, à Phoenix, des anomalies de géopotential ont été détectées en juillet et août 2024, et en juillet 2024 pour la température.

Les intensités moyennes d'anomalie $\Delta\phi 500$ sont comprises entre 100 et 600 m^2/s^2 et pour la température, $\Delta T2m$ est compris entre 0,2 et 5,6 $^{\circ}C$. Les durées des périodes détectées sont très variables et se situent entre 7 et 22 jours pour le géopotential et 5 et 20 jours pour la température. Les résultats détaillés pour ces dômes de chaleur sont disponibles dans l'annexe A.

En résumé, la plupart des dômes de chaleur ont été correctement détectés par l'algorithme, à part à Phoenix et à Chicago.

Le décalage temporel entre $\phi 500$ et $T2m$ a été évalué par corrélation, en décalant $T2m$ de 1 à 5 jours et en maintenant $\phi 500$ fixe. Le maximum de corrélation, indicateur du décalage optimal, se situe entre 0 et 2 jours, avec une moyenne de 9h36 pour les dômes de cette section (voir annexe C).

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 $T2m$. Les listes détaillées des événements détectés sont disponibles dans l'annexe B. On compare ensuite ces deux séries pour ne filtrer que celles qui ont au moins un jour en commun. On trouve que 44.28 % des périodes d'anomalie de géopotential tombent en même temps que des périodes d'anomalie de température et que 57.89 % des périodes d'anomalie de température coïncident avec des anomalies de géopotential. Ces événements sont répertoriés sur les figures 3a et 3b.

Pour $\phi 500$, les durées s'étendent de 5 à 13 jours (avec une moyenne de 7 jours) et les intensités moyennes $\Delta\phi 500$ sont comprises entre 195.4 et 1025.1 m^2/s^2 (avec une moyenne de 479.1 m^2/s^2). Pour ce qui est de $T2m$, les durées s'étendent de 5 à 17 jours (avec une moyenne de 7.48 jours) et les intensités moyennes $\Delta T2m$ sont comprises entre 1 et 8.1 $^{\circ}C$ (avec une moyenne de 3.5 $^{\circ}C$). La figure 3c montre les événements en fonction de leur intensité moyenne d'anomalie de géopotential et de température. Les coefficients de corrélation de Pearson montrent qu'il y a une corrélation élevée entre les durées des périodes d'anomalie de $\phi 500$ et celles de $T2m$ (coefficient = 0.62, p-value = 0), et une corrélation moyenne entre $\Delta\phi 500$ et $\Delta T2m$ (coefficient de 0.33 et p-value = 0.06).

Dans la suite, nous limitons l'analyse aux trois événements les plus remarquables en terme d'intensité : août 2003, juillet 2019 et septembre 2023. En août 2003, on a $\Delta\phi 500 = 815,92 m^2/s^2$ et $\Delta T2m = 5,28 ^{\circ}C$ pour une durée de 13 jours. En juillet 2019, on a $\Delta\phi 500 = 688,43 m^2/s^2$ et $\Delta T2m = 8,08 ^{\circ}C$ pour une durée de 5 jours. En septembre 2003, on a $\Delta\phi 500 = 1025,12 m^2/s^2$ et $\Delta T2m = 3,41 ^{\circ}C$ pour une durée de 8 jours. Pour ces trois événements, le maximum de température est atteint quelques jours après le maximum de géopotential. Les résultats détaillés sont disponibles dans la table 8 de l'annexe B. Le décalage moyen optimal entre $\phi 500$ et $T2m$ est de 1 jour (voir l'annexe C).

La figure 4 présente les courbes d'évolution du géopotential et de la température, ainsi que les cartes correspondantes. Pour les trois événements, on voit sur les courbes 4a, 4b, 4c des pics aux dates qui correspondent aux dômes de chaleur. On remarque que le dôme de chaleur de 2003 est le plus long et que celui de 2019 est le plus intense. On voit aussi sur les cartes une structure en oméga, composée d'une zone de haute pression au-dessus de Bruxelles encadrée par deux zones de basse pression.

La presse et la littérature scientifique ont documenté ces événements en tant que canicules intenses associées à des anticyclones, ce qui est un premier élément de validation de notre méthode. En effet, la vague de chaleur de l'été 2003 en Europe a été identifiée comme provoquée par un blocage oméga [19] et l'institut royal météorologique de Belgique indique des températures dépassant largement les normales saisonnières, avec 38.6 $^{\circ}C$ à Aubange, ce qui constitue la valeur la plus haute enregistrée pendant cette vague de chaleur [20]. Le dôme de chaleur de l'été 2019 en Europe a aussi été associé à un blocage oméga [21]. Concernant la canicule de l'été 2023, le *Copernicus Climate Change Service* identifie cet événement comme un dôme de chaleur [22].

C. Tendance temporelle des données

Nous constatons que le nombre de périodes d'anomalie de géopotential et de température détectées par décennie augmente avec le temps (voir l'annexe C pour plus de détails). Cela est également visible sur les figures 3a et 3b. Entre $\Delta T2m$ et le temps, on calcule une corrélation de 0,32 (et une p-value de 0,07), tandis qu'entre $\Delta\phi 500$ et le temps on calcule qu'il n'y a qu'une corrélation très faible de 0,1 (p-value de 0,58).

Ensuite, on divise les ensembles en deux périodes de durée égales (1950-1987 et 1988-2023) pour les comparer. La distribution de densité de probabilité des données de la période 1988 à 2024 tend d'avantage vers les hautes valeurs que celle de la période 1950-1987. Cela suggère une tendance à la hausse de ces valeurs avec le temps. Ces courbes sont visibles sur la figure 5. La moyenne des températures et du géopotential est plus grande pour la période 1988-2024, mais la variance des deux variables est plus petite. Pour évaluer si la différence entre les distributions des deux ensembles de données (1950-1987 et 1988-2024) est statistiquement significative, 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 < 0,05. Étant donné que notre seuil de confiance est de 0,95, nous pouvons conclure que les deux échantillons pour chaque variable ne suivent pas la même loi de distribution [23]. Cela indique un changement dans le comportement de la température et du géopotential au cours du temps. Néanmoins, ces observations ne sont pas exclusives aux dômes de chaleur.

4. DISCUSSION

A. Interprétation des résultats et concordance avec la littérature

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

Le programme a bien détecté le dôme de chaleur survenu à Lytton en juin 2021 et il indique un maximum de température le 29 juin 2021 avec 18,35 $^{\circ}C$ [4]. Cette valeur s'explique par le fait que les données correspondent à 12h00 UTC, c'est-à-dire à 5h00 du matin à Lytton. En réalité, la température la plus élevée de cette vague de chaleur a été enregistrée à 49.6 $^{\circ}C$ le 29 juin 2021 [1].

La plupart des événements de dômes de chaleur mentionnés précédemment et recensés dans la littérature ont été détectés

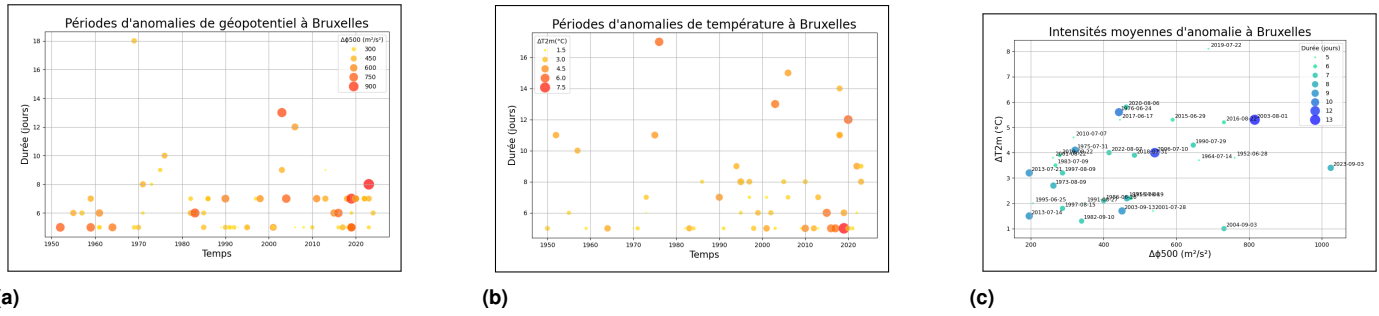


Fig. 3. Événements détectés à Bruxelles. 3a-3b : Durées des périodes d'anomalies de géopotential et de température détectées à Bruxelles en fonction du temps. La taille et la couleur des points représente l'intensité moyenne d'anomalie de la période. 3c : Périodes d'anomalies de géopotential et de température détectées à Bruxelles en fonction de leurs intensités. 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 périodes d'anomalie de géopotential et de température.

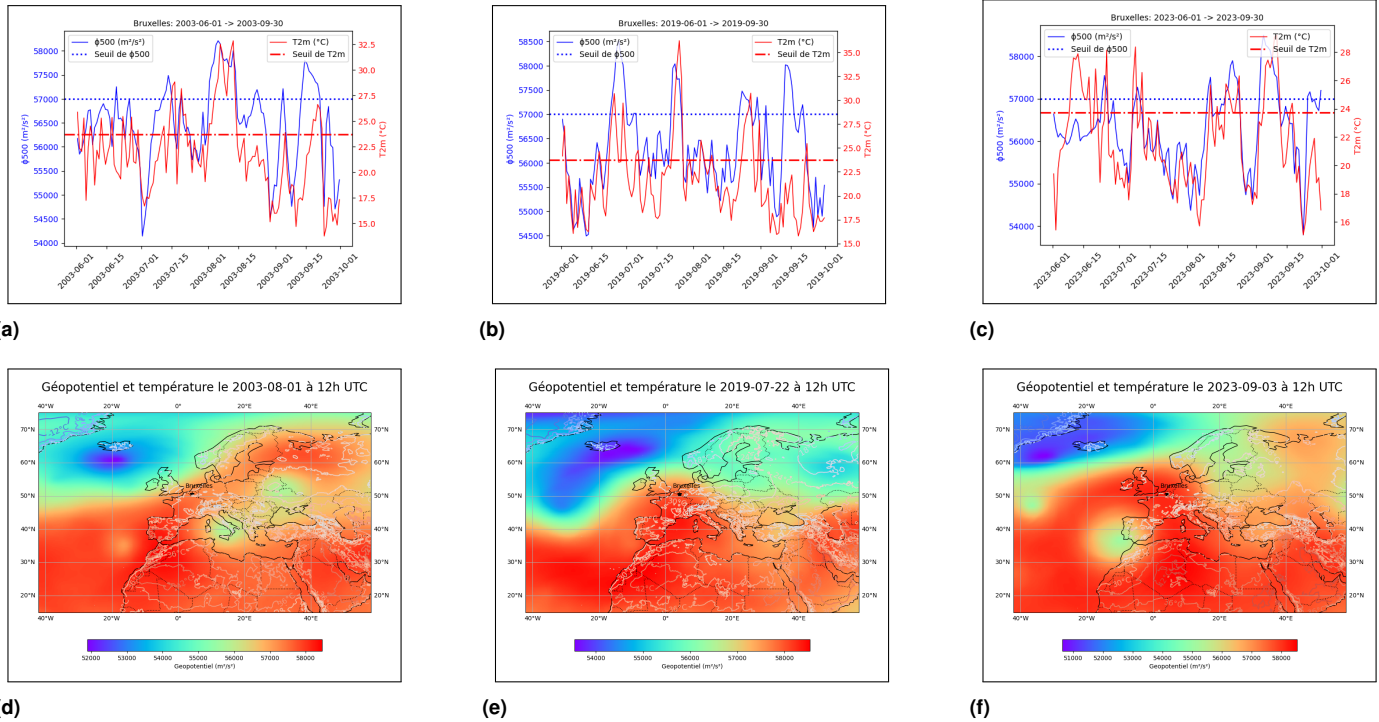


Fig. 4. 4a-4c : Évolution du géopotential à 500 hPa et de la température à 2m d'altitude à Bruxelles pendant l'été 2003, 2019 et 2023. 4d - 4f : Valeur du géopotential à 500 hPa avec les courbes de température au-dessus de l'Europe lors de trois dômes de chaleur.

correctement par le programme, sauf à Phoenix et à Chicago. Le pic de géopotential des dômes est généralement suivi par celui de température, à l'exception des cas de Phoenix où le maximum de température précède celui le géopotential. Les profils des courbes des deux variables sont similaires, ce qui est étayé par le calcul de corrélation et du décalage optimal. Les données, une fois visualisées sur une carte, montrent que ces dômes de chaleur sont associés à des blocages oméga (visibles dans l'annexe A).

A.2. Résultats pour Bruxelles

Les trois dômes de chaleur considérés comme exemples (août 2003, juillet 2019 et septembre 2023) étaient au moins en partie provoqués par un blocage atmosphérique et un bloc oméga [21] [19][22].

La vague de chaleur de l'été 2003 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 (jet stream), qui a formé un bloc oméga [19]. Cela a duré tout l'été et des fréquences de blocages ont été observées du 16 juillet au 31 août

[24]. 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 élevées [24]. Les températures exceptionnelles de la canicule de 2019 étaient liées à des oscillations persistantes dans la haute troposphère et à des anomalies de la hauteur géopotential. L'anticyclone associé a mené à un bloc oméga [21]. La cause dominante de la canicule de l'été 2023 aurait été un anticyclone qui aurait comprimé et réchauffé l'air. L'apport d'air chaud d'Afrique du Nord par advection aurait également joué un rôle, bien que ce facteur semble moins important [22]. Le dôme de chaleur de Villariès mentionné précédemment correspond à cette même vague de chaleur estivale [17]. On voit donc que ces trois périodes d'anomalie détectées dans les données ERA5 correspondent à des canicules marquantes historiquement. Celles-ci ont été provoquées par un blocage oméga, ce que nous pouvons associer à un dôme de chaleur, comme représenté sur les cartes des données dans les figures 4a, 4b et 4c où un anticyclone est piégé entre deux dépressions.

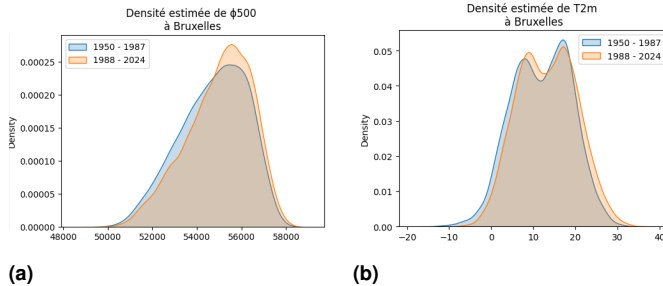


Fig. 5. Comparaison des deux courbes de densités de probabilité estimée entre les périodes 1950-1987 et 1988-2024, pour le géopotential $\phi 500$ (??) et la température $T2m$ (??).

Ensuite, environ la moitié des périodes d'anomalie prolongée de géopotential et de température concordent au niveau des dates. Les autres anomalies de géopotential peuvent aussi correspondre à des hausses de température, sans toutefois atteindre le seuil requis. On voit sur les courbes d'évolution du géopotential et de la température que les maximums de ces deux variables se succèdent dans le cas de dômes de chaleur. Les coefficients de corrélations entre $\phi 500$ et $T2m$ sont statistiquement significatifs. Cette relation 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 de $\phi 500$ et de $T2m$ détectées sont de plus en plus fréquentes au fil du temps. De plus, il y a une corrélation positive entre $\Delta T2m$ et $\Delta \phi 500$ et le temps. Cela rejoint les conclusions de plusieurs articles scientifiques. Par exemple, en ce qui concerne le dôme de chaleur de Lytton, White et al 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 [1]. Schumacher et al tirent les mêmes conclusions en indiquant que ce facteur aurait amplifié de 0.9°C la vague de chaleur de juin 2021 [2]. Zhang et al affirment que le dérèglement climatique augmente de 150 fois la probabilité d'occurrence de ce type de phénomène [25]. Selon Stott et al, le réchauffement anthropique a probablement contribué à la vague de chaleur européenne de 2003 en doublant sa probabilité d'occurrence [26].

De plus, les différences observées entre les distributions de 1950-1987 et de 1988-2024 sont statistiquement significatives, suggérant des changements non-négligeables dans la répartition des données et 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. Tout d'abord, 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. Ensuite, 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. Finalement, 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.

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 [27]. 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 d'événements d'anomalie au cours du temps puisque 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 [28]. 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. Il est plus courant dans la littérature d'utiliser un seuil saisonnier (voir par exemple [11] ou [29]). Les anomalies sont alors calculées par rapport à ce qui est attendu pour chaque date. Cela permet de détecter des événements extrêmes tout au long de l'année. Néanmoins, garder un seuil constant permet de mettre l'accent sur la détection d'événements extrêmes pendant la saison chaude [9]. Cela est particulièrement pertinent dans le cas de dômes de chaleur puisqu'un blocage anticyclonique en dehors de la période estivale est souvent associée avec une vague de froid plutôt que de chaleur.

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 scientifique 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. De plus, 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 dômes de chaleur et de leur rôle exact dans le phénomène.

A. DÔMES DE CHALEUR HISTORIQUES

A. Résultats des détections par le programme

A.1. 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	10-07-2021
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		

A.2. Phoenix, été 2023 et 2024

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

	$\phi 500$	$T2m$
I.M.A	334,5 m ² /s ²	2,3 °C
Debut	10-07-2023	11-07-2023
Fin	31-07-2023	30-07-2023
Durée	22 jours	20 jours
Maximum	58625,3 m ² /s ²	33,95 °C
Date	20-07-2023	21-07-2023

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

	$\phi 500$	$T2m$
I.M.A	176,9 m ² /s ²	0,8 °C
Debut	04-07-2024	09-07-2024
Fin	15-07-2024	13-07-2024
Durée	12 jours	5 jours
Maximum	58371,76 m ² /s ²	32,4 °C
Date	11-07-2024	09-07-2024

Le programme n’a pas détecté de période d’au moins 5 jours consécutifs dépassant le 95^e percentile des températures pendant le mois d’août 2024.

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

	$\phi 500$	$T2m$
I.M.A	282,8 m ² /s ²	-
Debut	01-08-2024	-
Fin	07-08-2024	-
Durée	7 jours	-
Maximum	58481,59 m ² /s ²	32,47 °C
Date	06-08-2024	05-08-2024

A.3. Chicago, août 2023

Le programme n'a pas détecté de périodes d'au moins 5 jours consécutifs dépassant le 95^e percentile des températures pour le mois d'août 2023.

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

	$\phi 500$	$T2m$
I.M.A	600,2 m ² /s ²	-
Debut	19-08-2023	-
Fin	25-08-2023	-
Durée	7 jours	-
Maximum	58745,1 m ² /s ²	26,12 °C
Date	21-08-2023	24-08-2023

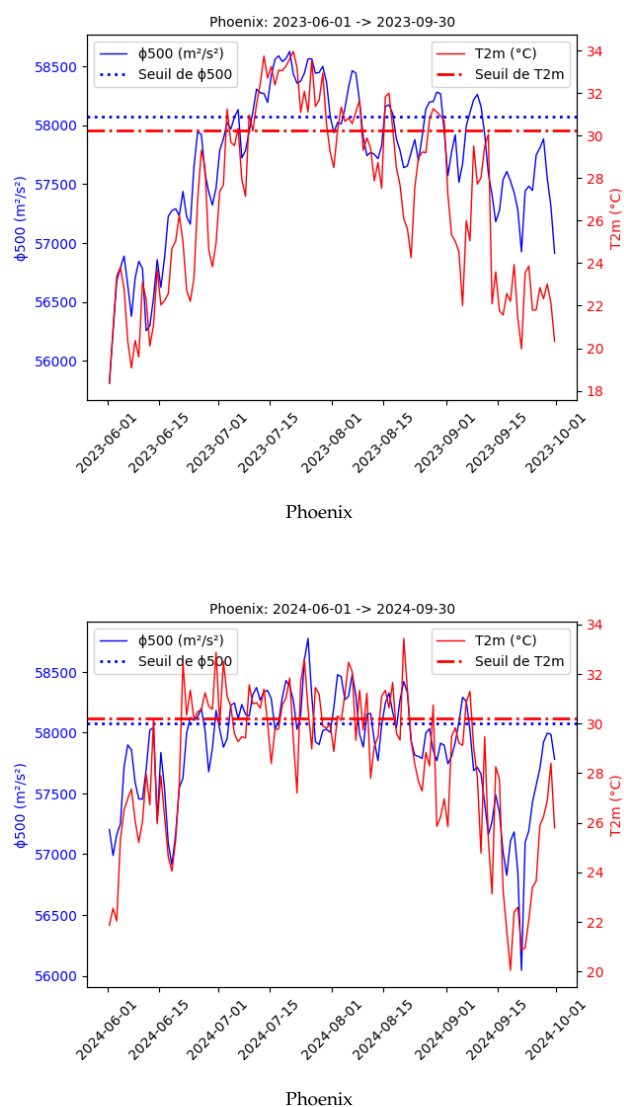
A.4. Villariès, août 2023**Table 6.** Caractéristiques du dôme de chaleur d'août 2023 à Villariès, détecté par le programme.

	$\phi 500$	$T2m$
I.M.A	683,6 m 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	58665,35 m ² /s ²	38,85 °C
Date	21-08-2023	24-08-2023

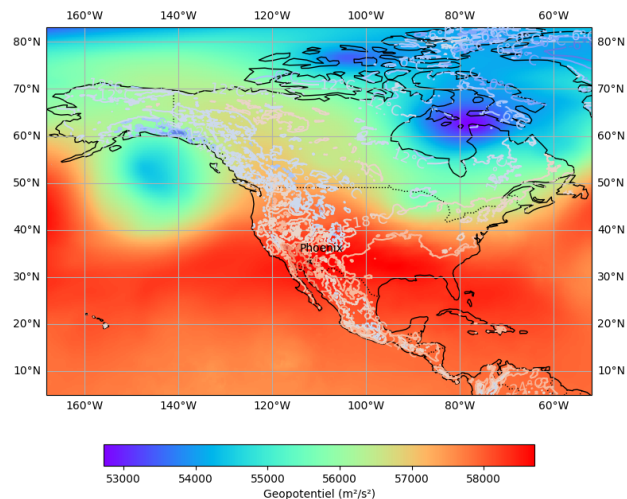
A.5. Monclova, juin 2023**Table 7.** Caractéristiques du dôme de chaleur de juin 2023 à Monclova, détecté par le programme.

	$\phi 500$	$T2m$
I.M.A	205,4 m 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	58302,07 m ² /s ²	28.10 °C
Date	20-06-2023	19-06-2023

B. Graphes et cartes

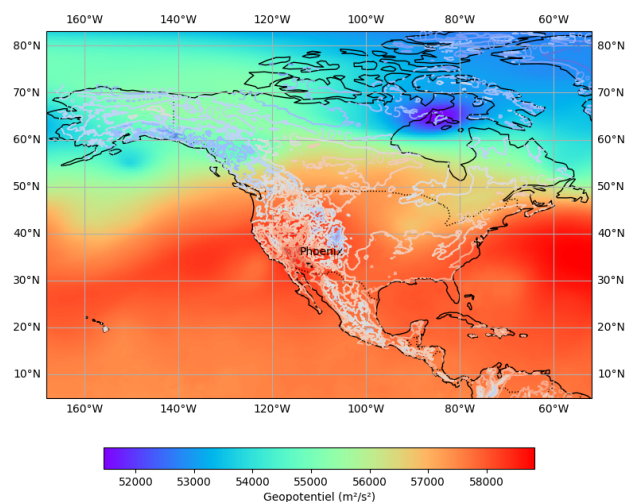


Géopotential et température le 2023-07-20 à 12h UTC



Amérique du Nord

Géopotential et température le 2024-07-11 à 12h UTC



Amérique du Nord

Fig. 6. Colonne de gauche : évolution temporelle du géopotential et de la température pour différents dômes de chaleur. Colonne de droite : valeurs géopotential à 500 hPa montrant des blocages oméga associés à ces événements, ainsi que les courbes de température à 2 mètres d'altitude.

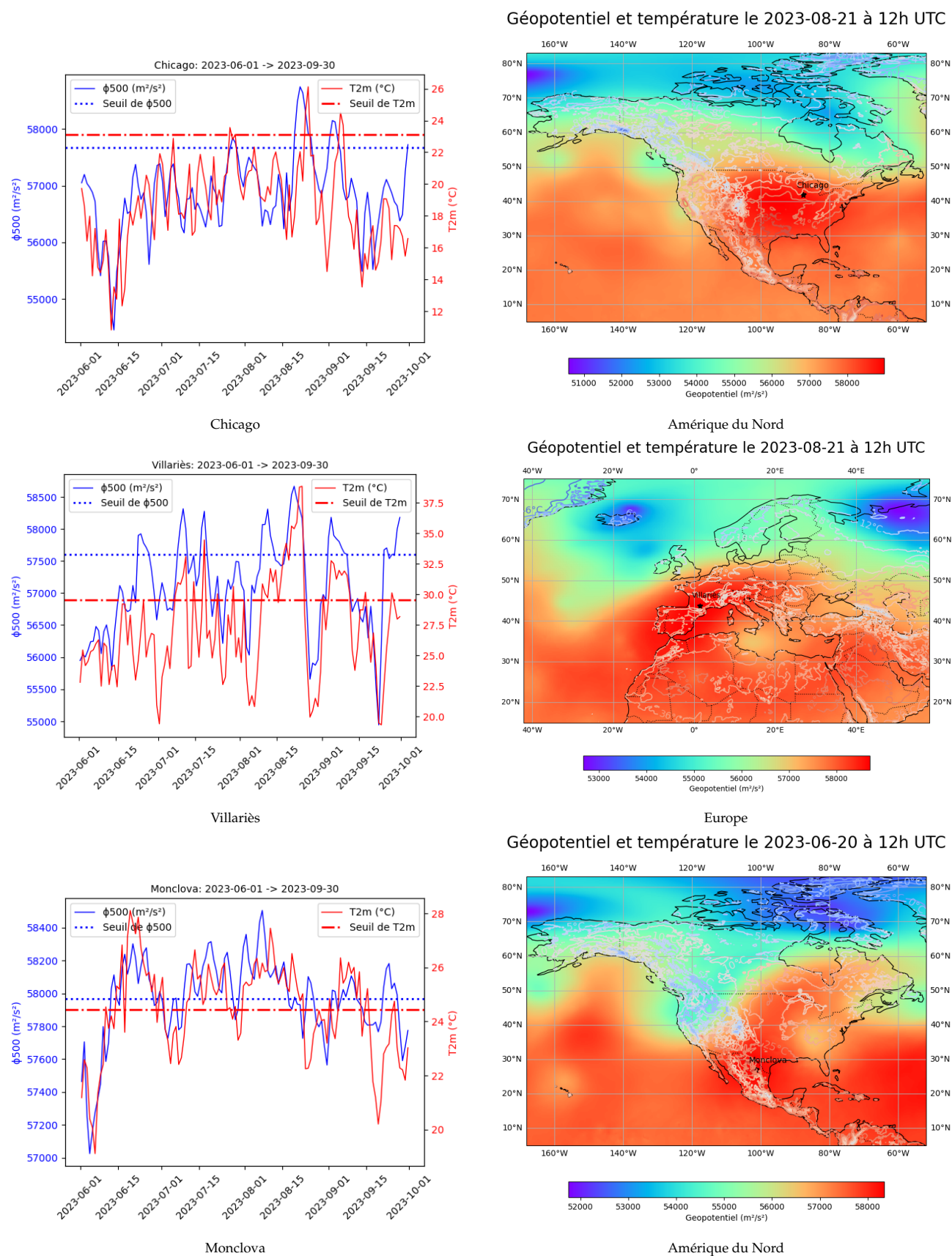


Fig. 7. Colonne de gauche : évolution temporelle du géopotential et de la température pour différents dômes de chaleur. Colonne de droite : valeurs géopotential à 500 hPa montrant des blocages oméga associés à ces événements, ainsi que les courbes de température à 2 mètres d'altitude.

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	Début	Fin	Durée (jours)	$\Delta\phi 500$ (m ² /s ²)
1	28-06-1952	02-07-1952	5	760.78
2	19-08-1955	24-08-1955	6	474.84
3	30-07-1957	04-08-1957	6	380.29
4	04-07-1959	10-07-1959	7	473.55
5	23-08-1959	27-08-1959	5	730.01
6	29-06-1961	03-07-1961	5	358.22
7	27-08-1961	01-09-1961	6	597.58
8	15-09-1961	19-09-1961	5	278.81
9	14-07-1964	18-07-1964	5	662.57
10	11-07-1969	28-07-1969	18	401.22
11	05-08-1969	09-08-1969	5	330.92
12	17-09-1970	21-09-1970	5	390.60
13	06-07-1971	13-07-1971	8	464.15
14	03-09-1971	08-09-1971	6	266.35
15	09-08-1973	16-08-1973	8	261.86
16	31-07-1975	08-08-1975	9	321.35
17	24-06-1976	03-07-1976	10	442.10
18	07-07-1982	12-07-1982	6	442.25
19	10-09-1982	16-09-1982	7	339.47
20	09-07-1983	14-07-1983	6	267.48
21	26-07-1983	31-07-1983	6	356.46
22	23-09-1983	28-09-1983	6	803.10
23	26-09-1985	30-09-1985	5	399.41
24	11-10-1985	16-10-1985	6	358.24
25	26-06-1986	02-07-1986	7	400.11
26	28-09-1986	04-10-1986	7	361.55
27	20-07-1989	24-07-1989	5	193.16
28	18-07-1990	22-07-1990	5	373.09
29	29-07-1990	04-08-1990	7	646.84
30	27-08-1991	31-08-1991	5	349.35
31	03-09-1991	07-09-1991	5	267.34
32	13-05-1992	17-05-1992	5	327.38
33	17-08-1993	21-08-1993	5	179.05
34	25-06-1995	29-06-1995	5	205.67
35	07-10-1995	11-10-1995	5	439.00
36	09-08-1997	15-08-1997	7	287.01
37	05-08-1998	11-08-1998	7	568.09
38	28-07-2001	01-08-2001	5	535.87
39	22-08-2001	26-08-2001	5	260.59
40	01-08-2003	13-08-2003	13	815.92
41	13-09-2003	21-09-2003	9	450.71
42	03-09-2004	09-09-2004	7	731.26
43	10-07-2005	14-07-2005	5	164.91
44	09-06-2006	13-06-2006	5	192.81
45	10-07-2006	21-07-2006	12	540.81
46	26-08-2008	30-08-2008	5	222.10
47	07-07-2010	11-07-2010	5	317.30
48	27-09-2011	03-10-2011	7	597.48
49	04-07-2013	10-07-2013	7	467.91
50	14-07-2013	22-07-2013	9	195.38
51	29-06-2015	04-07-2015	6	589.97
52	16-07-2016	20-07-2016	5	294.48
53	22-08-2016	27-08-2016	6	731.13
54	17-06-2017	21-06-2017	5	444.93
55	31-07-2018	06-08-2018	7	484.91
56	18-08-2018	22-08-2018	5	251.47
57	22-02-2019	26-02-2019	5	267.99
58	24-06-2019	30-06-2019	7	945.00
59	22-07-2019	26-07-2019	5	688.43
60	22-08-2019	27-08-2019	6	279.44

61	12-09-2019	16-09-2019	5	702.24
62	06-08-2020	12-08-2020	7	462.10
63	12-09-2020	18-09-2020	7	543.93
64	07-07-2022	13-07-2022	7	396.35
65	07-08-2022	13-08-2022	7	415.05
66	18-08-2023	24-08-2023	7	445.11
67	03-09-2023	10-09-2023	8	1025.12
68	06-10-2023	10-10-2023	5	296.71
69	27-08-2024	01-09-2024	6	185.60
70	30-10-2024	04-11-2024	6	369.85

Fig. 8. Périodes d'anomalies de géopotential détectées à Bruxelles sur la période 1950 -2024

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	Début	Fin	Durée (jours)	ΔT_{2m} (°C)
1	03-06-1950	07-06-1950	5	2.60
2	28-06-1952	08-07-1952	11	3.76
3	19-08-1955	24-08-1955	6	2.21
4	28-06-1957	07-07-1957	10	3.44
5	21-06-1959	25-06-1959	5	1.71
6	14-07-1964	18-07-1964	5	3.71
7	02-08-1970	06-08-1970	5	1.24
8	08-07-1971	12-07-1971	5	2.20
9	11-08-1973	17-08-1973	7	2.75
10	04-09-1973	09-09-1973	6	1.25
11	30-07-1975	09-08-1975	11	4.12
12	23-06-1976	09-07-1976	17	5.63
13	31-05-1982	07-06-1982	8	1.03
14	15-09-1982	19-09-1982	5	1.33
15	08-07-1983	12-07-1983	5	3.48
16	19-08-1984	23-08-1984	5	2.14
17	26-06-1986	03-07-1986	8	2.14
18	30-07-1990	05-08-1990	7	4.29
19	31-08-1991	04-09-1991	5	1.98
20	19-07-1994	27-07-1994	9	3.45
21	27-06-1995	02-07-1995	6	2.04
22	30-07-1995	06-08-1995	8	3.98
23	16-08-1995	23-08-1995	8	2.43
24	06-08-1997	13-08-1997	8	3.19
25	15-08-1997	21-08-1997	7	1.80
26	10-05-1998	14-05-1998	5	2.81
27	28-07-1999	02-08-1999	6	3.14
28	25-07-2001	31-07-2001	7	1.68
29	22-08-2001	26-08-2001	5	3.79
30	14-08-2002	19-08-2002	6	2.81
31	01-08-2003	13-08-2003	13	5.28
32	18-09-2003	22-09-2003	5	1.75
33	03-09-2004	07-09-2004	5	1.04
34	18-06-2005	25-06-2005	8	2.67
35	30-06-2006	06-07-2006	7	2.38
36	16-07-2006	30-07-2006	15	4.03
37	29-06-2009	03-07-2009	5	1.52
38	26-06-2010	03-07-2010	8	2.70
39	07-07-2010	11-07-2010	5	4.58
40	17-08-2012	21-08-2012	5	3.41
41	15-07-2013	19-07-2013	5	1.45
42	21-07-2013	27-07-2013	7	3.20
43	30-06-2015	05-07-2015	6	5.32
44	23-08-2016	27-08-2016	5	5.19
45	18-06-2017	22-06-2017	5	5.25
46	28-06-2018	08-07-2018	11	1.85
47	14-07-2018	27-07-2018	14	3.32
48	29-07-2018	08-08-2018	11	3.86
49	22-07-2019	26-07-2019	5	8.08
50	23-08-2019	28-08-2019	6	3.86
51	23-06-2020	27-06-2020	5	2.83
52	05-08-2020	16-08-2020	12	5.82
53	14-06-2021	18-06-2021	5	2.07
54	08-08-2022	16-08-2022	9	4.00
55	01-09-2022	06-09-2022	6	1.47
56	09-06-2023	17-06-2023	9	2.58
57	04-09-2023	11-09-2023	8	3.41

Fig. 9. Périodes d'anomalies de température détectées à Bruxelles sur la période 1950 -2024

C. Nombre d'événements par décennie

On remarque que le nombre d'événements détectés par décennie augmente avec le temps. Les années 2020 ont été incluses dans le graphique bien que les données ne s'étendent que jusqu'à 2024.

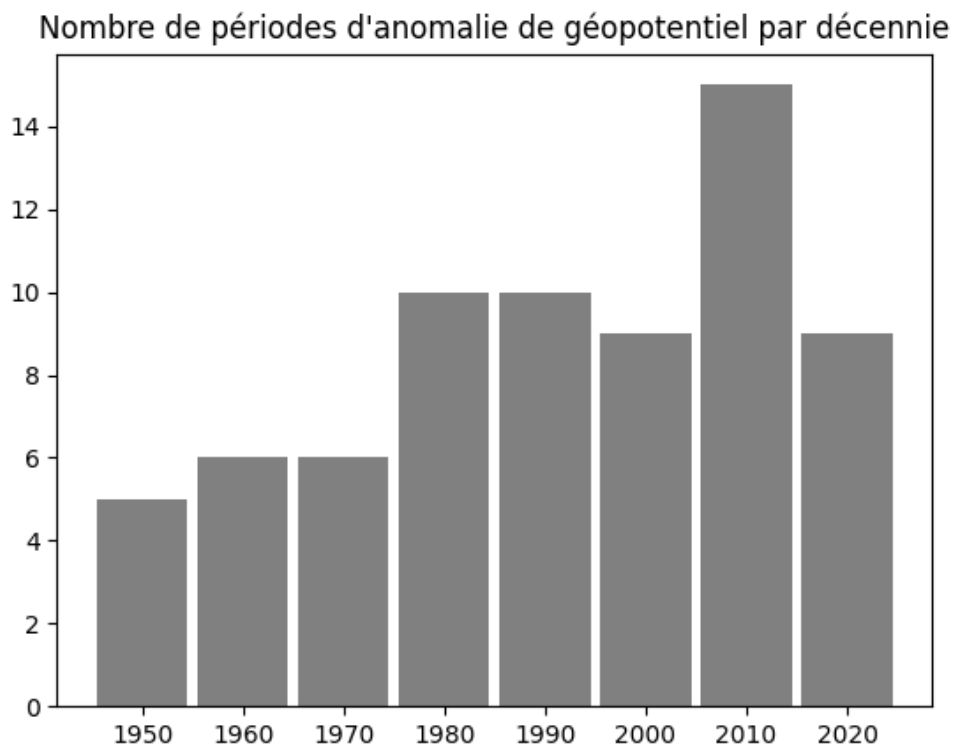


Fig. 10. Nombre de périodes d'anomalies de géopotential détectées par décennie à Bruxelles sur la période 1950 -2024

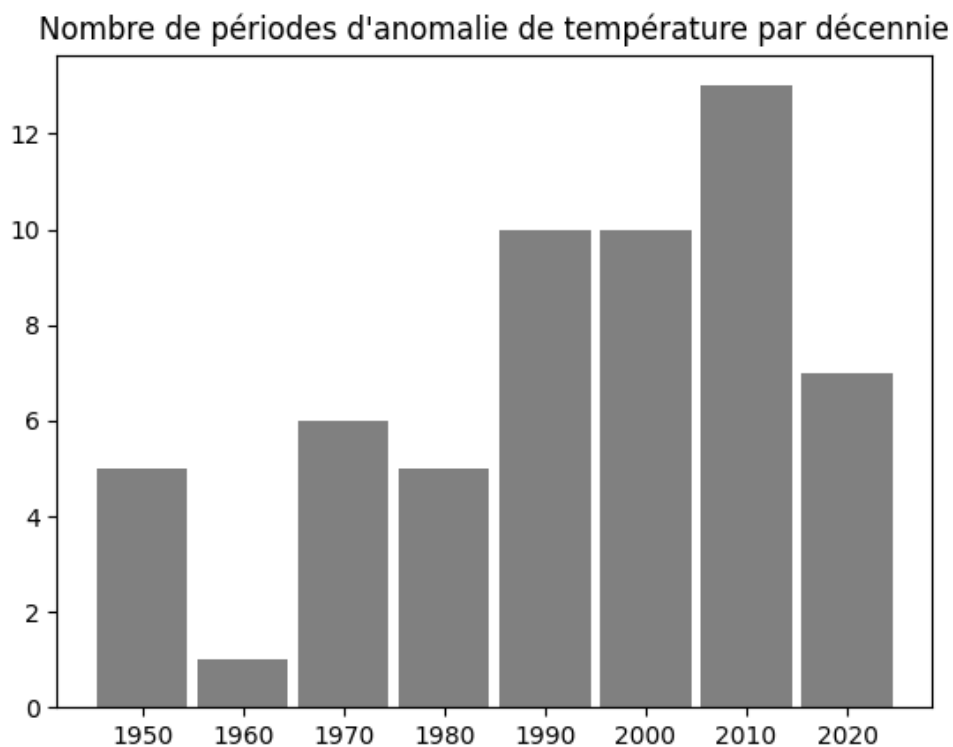


Fig. 11. Nombre de périodes d'anomalies de température détectées par décennie à Bruxelles sur la période 1950 -2024

D. Les trois événements les plus intenses détectés à Bruxelles

Table 8. Caractéristiques des périodes d'anomalie d'août 2003, juillet 2019 et septembre 2023 détectées par le programme.

	$\phi 500$	$T2m$
Août 2003		
I.M.A	815,92 m ² /s ²	5,28 °C
Debut	01-08-2003	01-08-2003
Fin	13-08-2003	13-08-2003
Durée	13 jours	13 jours
Maximum	58210,35 m ² /s ²	32,86 °C
Date	05-08-2003	12-08-2003
Juillet 2019		
I.M.A	688,43 m ² /s ²	8,08 °C
Debut	22-07-2019	22-07-2019
Fin	26-07-2019	26-07-2019
Durée	5 jours	5 jours
Maximum	58038,44 m ² /s ²	36,23 °C
Date	23-07-2019	25-07-2019
Septembre 2023		
I.M.A	1025,12 m ² /s ²	3,41 °C
Debut	03-09-2023	04-09-2023
Fin	10-09-2023	11-09-2023
Durée	8 jours	8 jours
Maximum	58493,05 m ² /s ²	29,18 °C
Date	04-09-2023	10-09-2023

C. DÉCALAGE OPTIMAL ENTRE LE GÉOPOTENTIEL ET LA TEMPÉRATURE

Table 9. Mesure du décalage optimal (en jours) sur base du calcul du coefficient de corrélation et de la p-value pour les différents dômes de chaleur mentionnés dans ce projet.

Localisation	Début	Fin	Décalage optimal	Coefficient de corrélation	p-value
Lytton	25-06-2021	10-07-2021	1 jour	0,91	< 0.05
Phoenix	10-07-2023	31-07-2023	0 jour	0.69	< 0,05
Phoenix	04-07-2024	15-07-2024	0 jour	0.37	0.15
Villariès	16-08-2023	24-08-2023	0 jour	0.93	< 0.05
Monclova	16-06-2023	28-06-2023	1 jour	0.56	< 0.05
Moyenne			9h36		
Bruxelles	01-08-2003	13-08-2003	0 jour	0.84	< 0.05
Bruxelles	22-07-2019	26-07-2019	1 jour	0.84	< 0.05
Bruxelles	03-09-2023	11-09-2023	2 jours	0.87	< 0.05
Moyenne			1 jour		

Remerciements. Je remercie Pr. François Massonnet et Pr. Benjamin Richaud pour leur aide dans ce projet tout au long de l'année.

Disponibilité des données. Les données utilisées dans cette étude sont disponibles dans Ref. [3] et Ref [4]. Le code pour reproduire les graphiques et autres résultats est disponible à <https://github.com/clemence-g/Heat-dome-analysis>.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] D. Schumacher, M. Hauser, and S. I. Seneviratne. Drivers and mechanisms of the 2021 pacific northwest heatwave. *Earth's Future*, 10, 2022.
- [3] 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.
- [4] J. Muñoz Sabater. Era5-land hourly data from 1950 to present, 2019. Accessed on 23-03-2025.
- [5] Environment and Climate Change Canada. Canada's top 10 weather stories of 2021. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/top-ten-weather-stories/2021.html>, 2022. Accessed: 2025-04-18.
- [6] 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.
- [7] H. Goosse, P. Y. Barriat, W. Lefebvre, M. F. Loutre, and V. Zunz. *Introduction to Climate Dynamics and Climate Modeling*. Cambridge University Press, 2010.
- [8] Jean-Noël Foussard, Emmanuel Julien, Stéphane Mathé, and Hubert Debellefontaine. *Les bases de la thermodynamique*. Dunod, Paris, 2021.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Alistair J. Hobday, Lisa V. Alexander, Sarah E. Perkins, Dan A. Smale, Sandra C. Straub, Eric C.J. Oliver, Jessica A. Benthuisen, 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.
- [12] 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.
- [13] Catherine Clifford. Phoenix suffers a record 31 straight days of 110-degree highs, and more heat is on the way, 2023.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Lindsey Doermann. Heat dome descends on central u.s., 2023.
- [17] Météo France. Août 2023 : une canicule tardive exceptionnelle sur une grande partie du pays, 2023.
- [18] Karine Durand. Météo : les États-Unis et le Mexique pris dans le piège d'un jet stream délirant, 2023.
- [19] 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.
- [20] Institut Royal Météorologique de Belgique. Climat de la belgique, 2025.
- [21] 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.
- [22] CMWF. The european heatwave of july 2023 in a longer-term context, 2023.
- [23] SciPy Contributors. `scipy.stats.ks_2samp`, 2025.
- [24] 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.

- 472 [25] Xing Zhang, Tianjun Zhou, Wenxia Zhang, Liwen Ren, Jie Jiang, Shuai Hu, Meng Zuo, Lixia Zhang, and Wenmin Man. Increased
473 impact of heat domes on 2021-like heat extremes in north america under global warming. *Nature Communications*, 14(1):1690, 2023.
- 474 [26] Peter A. Stott, D. A. Stone, and M. R. Allen. Human contribution to the european heatwave of 2003. *Nature*, 432(7017):610–614,
475 2004.
- 476 [27] Kathryn E. Smith, Alex Sen Gupta, Dillon Amaya, Jessica A. Benthuisen, Michael T. Burrows, Antonietta Capotondi, Karen Filbee-
477 Dexter, Thomas L. Frölicher, Alistair J. Hobday, Neil J. Holbrook, Neil Malan, Pippa J. Moore, Eric C.J. Oliver, Benjamin Richaud,
478 Julio Salcedo-Castro, Dan A. Smale, Mads Thomsen, and Thomas Wernberg. Baseline matters: Challenges and implications of
479 different marine heatwave baselines. *Progress in Oceanography*, 231:103404, 2025.
- 480 [28] Dillon J. Amaya, Michael G. Jacox, Melanie R. Fewings, Vincent S. Saba, Malte F. Stuecker, Ryan R. Rykaczewski, Andrew C.
481 Ross, Charles A. Stock, Antonietta Capotondi, Colleen M. Petrik, Steven J. Bograd, Michael A. Alexander, Wei Cheng, Albert J.
482 Hermann, Kelly A. Kearney, and Brian S. Powell. Marine heatwaves need clear definitions so coastal communities can adapt.
483 *Nature*, 616:32–35, April 2023.
- 484 [29] K. A. McKinnon and I. R. Simpson. How unexpected was the 2021 pacific northwest heatwave? *Geophysical Research Letters*,
485 49:e2022GL100380, 2022.