



HAL
open science

Classification de l'îlot de chaleur urbain et des journées chaudes en été grâce aux Types de Temps Sensibles (TTS) à l'échelle de l'aire grenobloise (2019-2022)

Yingting Wang

► **To cite this version:**

Yingting Wang. Classification de l'îlot de chaleur urbain et des journées chaudes en été grâce aux Types de Temps Sensibles (TTS) à l'échelle de l'aire grenobloise (2019-2022). Géographie. 2023. dumas-04146477

HAL Id: dumas-04146477

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04146477>

Submitted on 30 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MASTER Domaine : **SHS**

Mention : **GAED** (Géographie, Aménagement, Environnement, Développement)

Parcours **GÉOÏDES** (Géographie, Information, Interface, Durabilité, Environnements)

**Classification de l'îlot de chaleur urbain et des journées chaudes
en été grâce aux Types de Temps Sensibles (TTS)
à l'échelle de l'aire grenobloise (2019-2022)**

Réalisé à l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE)

Mémoire soutenu le 28 Juin 2023

Par : **Yingting WANG**

Devant un jury constitué de :

Madame **Sandra ROME** (Maître de Conférences, UGA-IGE)

Monsieur **Sylvain BIGOT** (Professeur des Universités, UGA-IGE)

Encadrement :

Maître de stage principal : **Sylvain BIGOT** (PU, UGA-IGE)

Co-encadrant : Monsieur **Xavier FOISSARD** (Chercheur contractuel, IGE)

Enseignante référente : Madame **Sandra ROME** (Mcf, UGA-IGE)

Année 2022-2023

Résumé

La méthode de classification des types de temps sensible (TTS) permet d'identifier des situations météorologiques locales par la classification de cinq variables météorologiques : l'amplitude thermique journalière, les précipitations, l'humidité spécifique, la direction et la vitesse du vent. L'objectif de cette étude est l'identification des TTS pertinents pour caractériser les îlots de chaleur urbains (ICU) et les journées chaudes à l'échelle grenobloise. Les données utilisées concernent les données de réanalyse ERA5 pour la période 2002-2022. Pour atteindre l'objectif ciblé et prendre en compte les biais des données, les variables d'entrée de la méthode originale ont été adaptées en convertissant les précipitations en une variable catégorielle fondée sur des seuils et en supprimant la variable de la direction du vent. En combinant les résultats de la classification avec les données de l'été 2019-2022 et en attribuant les résultats de TTS au passé, il ressort qu'une classe de TTS locale identifie les ICU et les journées chaudes caractérisées par de fortes amplitudes thermiques diurnes, l'absence de précipitations, une humidité spécifique élevée et de faibles vitesses de vent, et que le nombre de ce TTS a augmenté entre le passé (1960-2001) et le présent.

Mots-clés : Types de Temps Sensible, îlot de chaleur urbain, journée chaude, donnée de réanalyse ERA5, échelle grenobloise

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce stage et à la rédaction de ce mémoire. Leurs conseils, leur expertise et leur soutien ont été déterminants dans la réussite de cette expérience professionnelle.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers Monsieur **Sylvain Bigot** pour m'avoir donné l'occasion d'effectuer un stage sur ce projet de recherche. Cette expérience a été extrêmement enrichissante pour moi, tant sur le plan professionnel que personnel. Je lui suis profondément reconnaissante pour la confiance qu'il a eu en mes capacités, car cela m'a permis de gagner en confiance en moi-même et a toujours agi comme un moteur de motivation.

Je souhaite également remercier chaleureusement mon deuxième encadrant de stage, Monsieur **Xavier Foissard**, pour son suivi attentif et ses conseils éclairés tout au long de ce stage. Sa présence bienveillante a été d'une grande aide pour moi, et je le remercie également pour la patience dont il a fait preuve en répondant à mes questions et en m'encourageant.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers mon enseignante référente, Madame **Sandra Rome**. Je suis extrêmement reconnaissante d'avoir pu bénéficier de son accompagnement attentif et bienveillant pendant mon stage. Elle a manifesté une attention particulière à mes besoins, ce qui m'a permis de me sentir soutenue et encouragée.

Je remercie tout particulièrement Madame **Julia Hidalgo** pour soutien inestimable en matière de méthodologie, de code, et bien plus encore. Je suis profondément reconnaissante envers elle pour sa générosité, son expertise et sa disponibilité à discuter régulièrement avec moi.

Je souhaite également remercier l'Institut des Géosciences de l'Environnement de Grenoble pour son accueil chaleureux qui m'a permis de m'adapter rapidement à mon stage.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers **ma famille** et **mes amies** qui m'ont soutenue tout au long de ce stage. Leur soutien moral, leurs encouragements et leur compréhension ont été inestimables.

Sommaire

Résumé	i
Remerciements.....	ii
Sommaire.....	iii
Sigles et acronymes	iv
Contexte et objectif du stage	1
Introduction	2
1. Zone d'étude, données et méthodes.....	3
2. Résultats.....	14
3. Discussion	19
Conclusion	23
Perspective et synthèse du stage	23
Références bibliographiques	25
Table des figures	28
Table des tableaux.....	29
Table des annexes	29
Annexes.....	32

Sigles et acronymes

CASSANDRE = CAnicules, SANté et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois

CDS = Climate Data Store

DD = Direction du vent en quatre quadrants : 1-90°; 91-180°; 181-270°; 271-360°

dT = Amplitudes thermiques journalières de température

ECMWF = European Centre for Medium-Range Weather Forecast

ERA5 = ECMWF Reanalysis version 5

FF = Vitesse du vent moyenne journalière

ICU = îlot de Chaleur Urbain

MApUCE = Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie

q = Humidité spécifique moyenne journalière

RR = Précipitations journalière

RR_seuil = Précipitations journalières divisées en trois groupes : 0-1 mm; 1-15 mm; ≥ 15 mm

RMSE = Root Mean Square Error

Tm = Temperature moyenne

Tn = Température minimale

Tn-r = Tn journalière en milieu rural

Tn-u = Tn journalière en ville urbaine

ΔTn = Ecart entre les Tn dans les zones urbaines et rurales : Tn-u - Tn-r

TTS = Types de Temps Sensibles

Tx = Température maximale

Contexte et objectif du stage

Le stage s'est déroulé du 1 mars au 30 juin 2023 à l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) au sein de l'équipe Processus Hydrologique et Ressources en Eau Vulnérable (PHyREV).

Ce stage s'effectue dans le cadre du projet CASSANDRE (CANicules, SANTé et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois), soutenu financièrement par l'ADEME (programmation 2021-2025). Le projet a pour objectif de répondre aux besoins d'adaptation des Collectivités locales de Grenoble et d'Echirolles par une collaboration directe pour décrire les extrêmes thermiques tels que les îlots de chaleur urbains et les jours de forte chaleur, et leurs impacts sanitaires associés, en particulier sur les populations vulnérables et sensibles ([Rome et al., 2022](#)).

L'étude se concentre sur l'impact des extrêmes thermiques sur les populations sensibles. Bien que la commune d'Echirolles et de Grenoble soient géographiquement proches et connaissent une certaine synchronisation dans la présence des îlots de chaleur urbains (ICU), Echirolles rencontre davantage de problèmes liés aux extrêmes thermiques en raison de sa situation périurbaine et de sa population plus importante de personnes vulnérables. Par conséquent, Grenoble et Echirolles sont analysés de manière distincte dans les sections suivantes.

Le travail du stage s'appuie sur la méthode de classification des Types de Temps Sensibles (TTS) réalisée par [Hidalgo et al. \(2014\)](#) et [Hidalgo et Jouglà \(2018\)](#). Cette méthode permet d'identifier des situations météorologiques locales par la classification de cinq variables météorologiques dans le cadre du projet ANR MApUCE (2014-2019), qui a été appliquée à une cinquantaine de villes françaises, dont Grenoble. L'objectif du projet MApUCE est de développer une approche commune à toutes villes françaises et permettant de décrire généralement toutes les conditions météorologiques. Notre étude vise à mieux adapter cette méthode à l'échelle grenobloise et à identifier les TTS pertinents pour caractériser les journées chaudes et les ICU. Pour ce faire, des discussions et des décisions ont été prises en collaboration avec [Hidalgo et al. \(2014\)](#) pour apporter quelques modifications à la méthode originale

Le format du mémoire suit celui d'un article scientifique. Il comprend une introduction, une section sur la zone d'étude et les données, une section décrivant les méthodes utilisées, une section présentant les résultats et la discussion, et une brève conclusion de l'étude. Au début et à la fin du mémoire de stage, il y a également une introduction et un résumé global du stage. L'[annexe 1](#) contient la même fiche de synthèse pour la classification par TTS pour Grenoble que celle proposée dans le projet MApUCE, mais utilisant les données de l'étude et la méthode adaptée.

Introduction

Le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) montre qu'à l'échelle mondiale, l'exposition aux vagues de chaleur continuera d'augmenter à mesure que le climat se réchauffe, la fréquence des vagues de chaleur entraînant une hausse de la mortalité et de la morbidité (IPCC, 2022). Des événements de chaleur extrême se produisent fréquemment dans le monde, tels que la vague de chaleur de 1995 à Chicago et la canicule de 2003 en Europe (Luber & McGeehin, 2008). De plus, le scénario simulé pour l'été de la fin du 21ème siècle est très similaire à la condition de chaleur extrême rencontrée en Europe durant l'été 2003 (Beniston, 2004). La température moyenne en France a augmenté de 1°C depuis le début du 20ème siècle, contre une moyenne mondiale de 0,6 °C (Poumadère *et al.*, 2005).

Avec la croissance démographique rapide, plus de la moitié de la population mondiale habite dans des villes, une proportion qui devrait atteindre 60 % en 2030 et 70 % en 2050 (WHO, 2018). Les villes sont plus susceptibles de connaître certains phénomènes météorologiques extrêmes. L'apparition d'îlots de chaleur urbains (ICU) est le phénomène climatique le plus spécifique de la présence des villes urbaines, produisant des anomalies positives de température concentrées au-dessus des villes. Le concept d'ICU fait référence aux températures plus élevées observées en milieu urbain par rapport aux zones rurales (Oke, 1973), surtout liées au lent refroidissement nocturne des villes. Les vagues de chaleur sont généralement générées par des systèmes de haute pression stagnants à grande échelle qui génèrent des anomalies de température dans la ville. En conséquence, ils augmentent les températures de l'air, ainsi que les températures de surfaces dans les zones urbaines et rurales (Li et Bou-Zeid, 2013). Certaines études indiquent la synergie entre l'effet d'îlot de chaleur et les vagues de chaleur, aggravant les différences de température entre les zones urbaines et rurales. Les populations urbaines vivent déjà dans des conditions plus chaudes que les zones rurales en raison de l'ICU, et l'effet synergique des vagues de chaleur et de l'ICU renforce les phénomènes météorologiques violents et produisant des événements plus extrêmes dans les villes (Gabriel et Endlicher, 2011).

Les populations urbaines sont confrontées à des problèmes plus graves de vague de chaleur, d'ICU, d'inconfort thermique, d'urbanisation rapide et de réchauffement climatique (Gabriel et Endlicher, 2011). Les populations urbaines vulnérables sont davantage exposées aux problèmes liés à la chaleur, qui peuvent entraîner un certain nombre de maladies (Luber et McGeehin, 2008 ; Hajat et Kosatky, 2010).

Il est essentiel d'analyser les conditions météorologiques associées à ces phénomènes urbains extrêmes. La **notion de type de temps** a été introduite pour une description explicative à travers des variables d'états atmosphériques (température, précipitations, vent, etc.) (Durand-Dastès, 2004). Deux méthodes principales de classification des types de temps sont actuellement appliquées pour le territoire français. Une méthode de classification était proposée par Cantat et Savouret (2014), composée de quatre variables météorologiques : nébulosité, température, précipitations et vent avec un nombre de classes fixe (jusqu'à 64 combinaisons possibles); cependant, cette méthode de classification de type de temps est limitée par les classes déjà prédéterminées. L'autre méthode des types de temps sensible

(TTS), proposée par [Hidalgo et Jouglu \(2018\)](#), classe automatiquement les données sur la base des amplitudes thermiques journalières ($T_x - T_n$), des précipitations journalières et des moyennes journalières de l'humidité spécifique, de la vitesse et de la direction du vent. Ainsi, la classification des types de temps est objective et non prédéfinie.

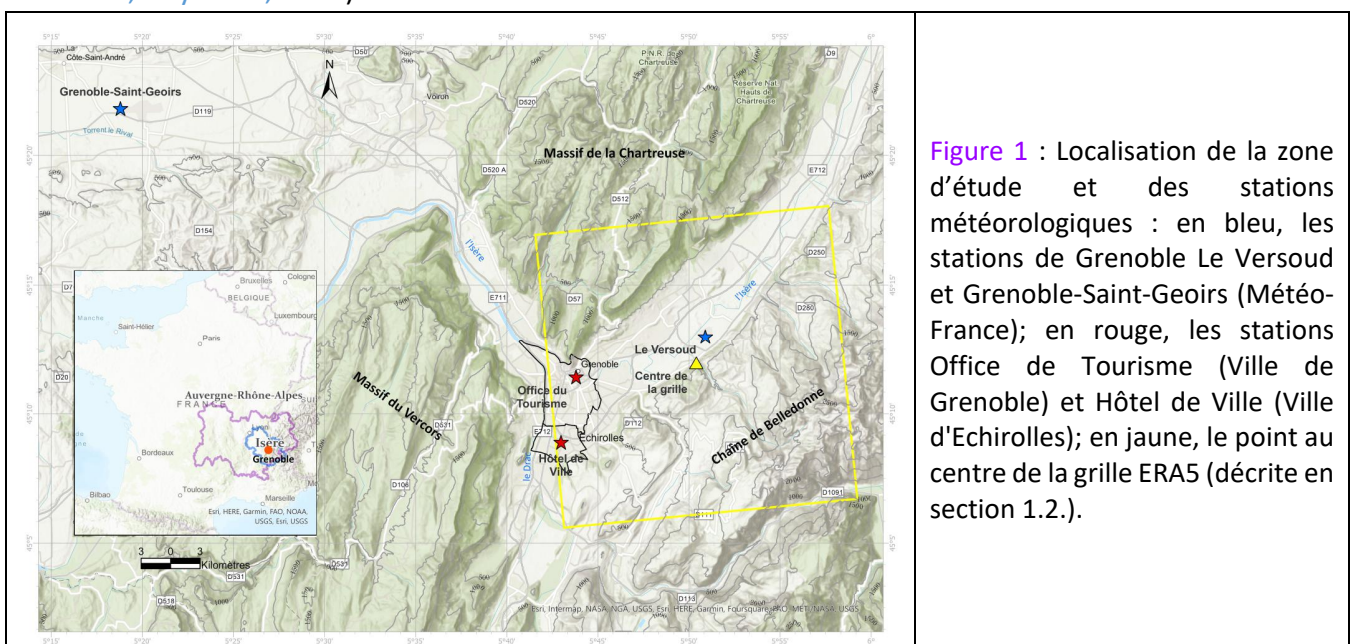
L'objectif de ce stage est d'utiliser une méthode pour identifier et décrire la présence des ICU et des journées chaudes sur le territoire grenoblois. La méthode de la classification de TTS permet de caractériser le climat local par des variables météorologiques. Aussi, cette étude vise à appliquer la méthode développée par [Hidalgo et Jouglu \(2018\)](#), et finalement à modifier les variables d'entrée afin que le TTS obtenu soit plus ciblé sur les phénomènes extrêmes tels que les îlots de chaleur urbains et les vagues de chaleur.

1. Zone d'étude, données et méthodes

1.1. Zone d'étude

Grenoble ($45^{\circ}10'N$ et $5^{\circ}43'E$) se trouve au sud-est de la France, dans le département de l'Isère en région Auvergne-Rhône-Alpes. Située en fond de vallée entre 200 m pour l'essentiel de la ville et 600 m d'altitude pour les contreforts Suds du massif de la Chartreuse, la ville se trouve à la jonction de trois vallées, entourée par les massifs préalpins de la Chartreuse au nord, du Vercors à l'ouest et massif alpin de Belledonne au sud-est. Elle est également située au confluent de deux rivières majeures, l'Isère et le Drac. Echirolles ($45^{\circ}08'N$ et $5^{\circ}43'E$) est une commune voisine au sud de celle-ci ([Figure 1](#)).

Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat de Grenoble et de ses alentours est « tempéré-chaud, sans saison sèche avec été chaud ». Ce climat de type Cfa se caractérise par des écarts de température souvent importants et des précipitations irrégulières, avec des étés chauds et humides, voire très chauds et secs, avec des maxima supérieurs à $30^{\circ}C$ ([Beck et al., 2018](#); [Joly et al., 2010](#)).



1.2. Investigation des données météorologiques disponibles à Grenoble

1.2.1. Données nécessaires à l'application de la méthode

La classification de types de temps sensibles (TTS) développée par [Hidalgo et al. \(2014\)](#) et [Hidalgo et Jouglà \(2018\)](#) a été utilisée pour cette étude, car elle répond aux besoins spécifiques des études urbaines locales. Cette méthode utilise un algorithme de clustering « Partitioning Around Medoids » (PAM) ([Kaufman & Rousseeuw, 2009](#)), combiné à la distance de Gower validée dans l'étude de [Hidalgo et Jouglà \(2018\)](#), comme mesure de dissimilarité pour un ensemble de cinq variables quotidiennes. Ces variables comprennent les amplitudes thermiques journalières de température (dT en °C) obtenues en fonction des températures minimales et maximales ($dT = T_x - T_n$), l'humidité spécifique (q en kg.kg^{-1}), les précipitations (RR en mm), la vitesse du vent (FF en m.s^{-1}) et la direction du vent (DD en quatre quadrants : 1-90°; 91-180°; 181-270°; 271-360°). La variable de direction du vent est une variable catégorielle et les quatre autres variables sont des variables continues. Les séries temporelles journalières d'au moins 10 ans de ces cinq variables constituent les données nécessaires à l'application de la méthode. Selon la méthode initiale des TTS, les variables météorologiques utilisées ont été obtenues à partir de la réanalyse AROME à une résolution de 2,5 km pour un point de grille rural de référence situé à proximité de la ville afin de représenter le climat local et d'éviter les influences urbaines ([Jouglà et al., 2019](#)).

1.2.2. Données atmosphériques disponibles

Pour obtenir les données atmosphériques disponibles à l'application de la méthode de la classification des TTS, il est nécessaire de connaître les stations météorologiques situées à proximité de Grenoble ([Figure 1](#)). Dans le réseau de Météo France, Grenoble dispose de deux stations (Grenoble-Saint-Geoirs et Le Versoud) avec au moins 20 ans de données à analyser. La station de Grenoble-Saint-Geoirs existe depuis 1940, mais se trouve à 48 km de Grenoble ([Rome et al., 2020](#)). En raison de la situation montagneuse de Grenoble et de l'influence relativement complexe du relief sur les situations météorologiques, la station météorologique n'est pas représentative du climat grenoblois car elle est trop éloignée. La station de Grenoble-Saint-Geoirs n'a donc pas été prise en compte. Dans l'article de [Jouglà et al. \(2019\)](#), ils indiquent que les données d'entrée pour la classification des TTS sont mieux sélectionnées à partir de stations situées dans des zones rurales hors les effets de l'urbanisation sur le microclimat local. La station météorologique Le Versoud, située dans une zone rurale près de Grenoble, est la plus appropriée pour cette classification, mais elle ne dispose plus de données sur l'humidité, une variable nécessaire pour la classification, à partir d'octobre 2021. Les données des deux stations météorologiques en rouge sont également disponibles pour Grenoble et Echirolles à partir de 2019 ([Figure 1](#)). Ces stations ont été mises en place parallèlement au projet CASSANDRE, commandées par les villes de Grenoble et d'Echirolles.

1.2.3. Données de réanalyse utilisées

En raison de l'absence de données d'observation adaptées, il convient d'appliquer des données de réanalyse, qui assurent des données homogènes, sans valeurs manquantes ni données aberrantes pour de longues séries temporelles et des résolutions verticales et horizontales fines ([Räisänen, 2021; Zou et al., 2022](#)).

ERA5 représente des données de réanalyse climatique collectées par l'European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF), pouvant être téléchargées dans le Climate Data Store (CDS) sur des grilles régulières de latitude et longitude à une résolution de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (~ 30 km) et à une résolution temporelle horaire. Les données d'ERA5 sont caractérisées par plusieurs améliorations par rapport à la génération précédente de réanalyses et sont largement utilisées en Europe et même dans le monde entier (Hersbach *et al.*, 2020). Il s'agit notamment de l'amélioration des algorithmes d'assimilation de données, mais aussi de résolutions spatiales et temporelles plus élevées qui se traduisent globalement par une meilleure reproduction des observations atmosphériques dans ERA5 par rapport aux réanalyses de la génération précédente (Nogueira *et al.*, 2020). Bien qu'ERA5-Land ait une résolution plus fine de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (~ 9 km) qu'ERA5, ses performances sont légèrement inférieures à celles d'ERA5 en ce qui concerne l'identification des événements de températures extrêmes (Sheridan *et al.*, 2020 ; Zou *et al.*, 2022). Les corrélations des variables ont été testées entre les données d'ERA5, d'ERA5-land et les données atmosphériques de Versoud. Les résultats pour ERA5 étaient meilleurs que ceux pour ERA5-land (Annexe 2). En outre, ERA5-land a une limite de téléchargement élevée de 12 000 données par demande, alors que sur ERA5, il est possible de télécharger 120 000 données à la fois. Il a été ainsi décidé d'utiliser les données d'ERA5 pour cette étude.

Le **tableau 1** montre les données horaires téléchargées avec la température de l'air, la température du point de rosée, la composition du vent, les précipitations et la pression atmosphérique. L'humidité spécifique est calculée en utilisant la température, la température du point de rosée et la pression atmosphérique, tandis que la vitesse et la direction du vent sont calculées à partir des composantes zonale et méridionale du vent (U et V). Lors de l'extraction des données, il est nécessaire de spécifier la période et la zone géographique à extraire. La méthode des TTS nécessite un minimum de 10 ans de données, la grille choisie (**Figure 1**) couvre donc la station du Versoud de 2002 à 2022 (soit 21 ans). Ce type d'extraction permet d'obtenir des données au format GRIB (centre de la grille $45^\circ 12'N$ et $5^\circ 50'E$).

Tableau 1 : Données météorologiques horaires d'ERA5.

Variables	Unités	Résolution temporelle	Durée
Température à 2m	K		
Température du point de rosée à 2 m	K		
10m U-composant du vent	m/s	Horaire	1 janvier 2002 - 31 décembre 2022
10m V-composant du vent	m/s		
Précipitations totales	m		
Pression de surface	Pa		

1.2.4. Evaluation de la qualité des données d'ERA5 à partir des données de la station du Versoud

Afin d'évaluer les performances des produits sur différentes échelles de temps, des valeurs journalières ont également été calculées. L'amplitude thermique et les précipitations sont des valeurs quotidiennes, tandis que la vitesse du vent et l'humidité spécifique correspondent à la moyenne de toutes les valeurs horaires de la journée.

La période d'étude s'étend de mai à septembre pour les années 2019 à 2022. Les données de la station météorologique du Versoud pour cette période ont été comparées aux données

d'ERA5. En outre, des coefficients de détermination et RMSE (Root Mean Square Error) ont également été calculés pour chaque variable, en visant à évaluer la capacité d'ERA5 à produire ces variables. En effet, les biais de température existent dans les données d'ERA5, avec des températures maximales et minimales journalières généralement inférieures à celles observées par la station du Versoud (Annexe 3). La variable d'entrée liée à la température est l'amplitude thermique, qui réduit l'effet de ce biais. ERA5 peut aussi sous-estimer les vitesses du vent et présente une faible corrélation avec les stations météorologiques dans les zones au relief complexe, telles que les zones montagneuses (Jourdié, 2020).

Les diagrammes de dispersion des quatre variables, montrant les données d'ERA5 et celles de la station de Versoud, sont accompagnés de leurs coefficients de détermination et RMSE. Le coefficient de détermination entre l'amplitude thermique et l'humidité spécifique est élevé ($R^2 > 0,85$), tandis que celui des précipitations est moyen ($R^2 \approx 0,5$), et que celui de la vitesse du vent est faible ($R^2 \approx 0,39$) (Figure 2). Les biais dans les données de réanalyse étant connus, ces quatre variables peuvent être utilisées comme variables d'entrée pour la méthode.

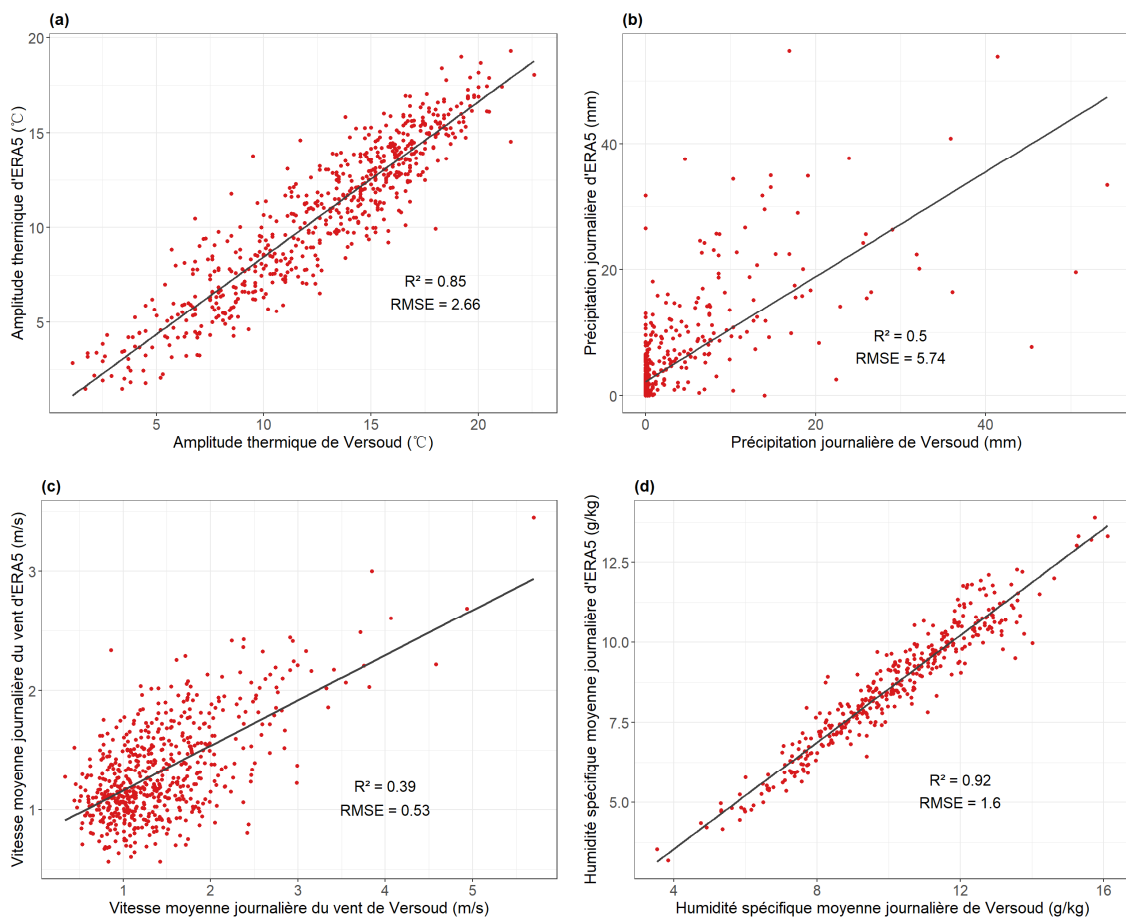


Figure 2 : Diagrammes de dispersion (a) de l'amplitude thermique, (b) des précipitations, (c) de la vitesse du vent (N=612) et (d) de l'humidité spécifique (N=381) pour la station météorologique du Versoud par rapport aux variables correspondantes de la grille ERA5. Chaque point représente un jour. La ligne indique la régression linéaire entre les variables observées à la station météorologique du Versoud et les variables correspondantes dans les données d'ERA5. Les mesures de l'humidité spécifique sont arrêtées à partir d'octobre 2021.

1.3. Méthodes

La méthodologie générale utilisée dans ce mémoire est présentée sur la [figure 3](#). Elle est divisée en cinq parties principales faisant état du sujet, des données utilisées, de la méthode appliquée, et pour finir, des résultats et des discussions.

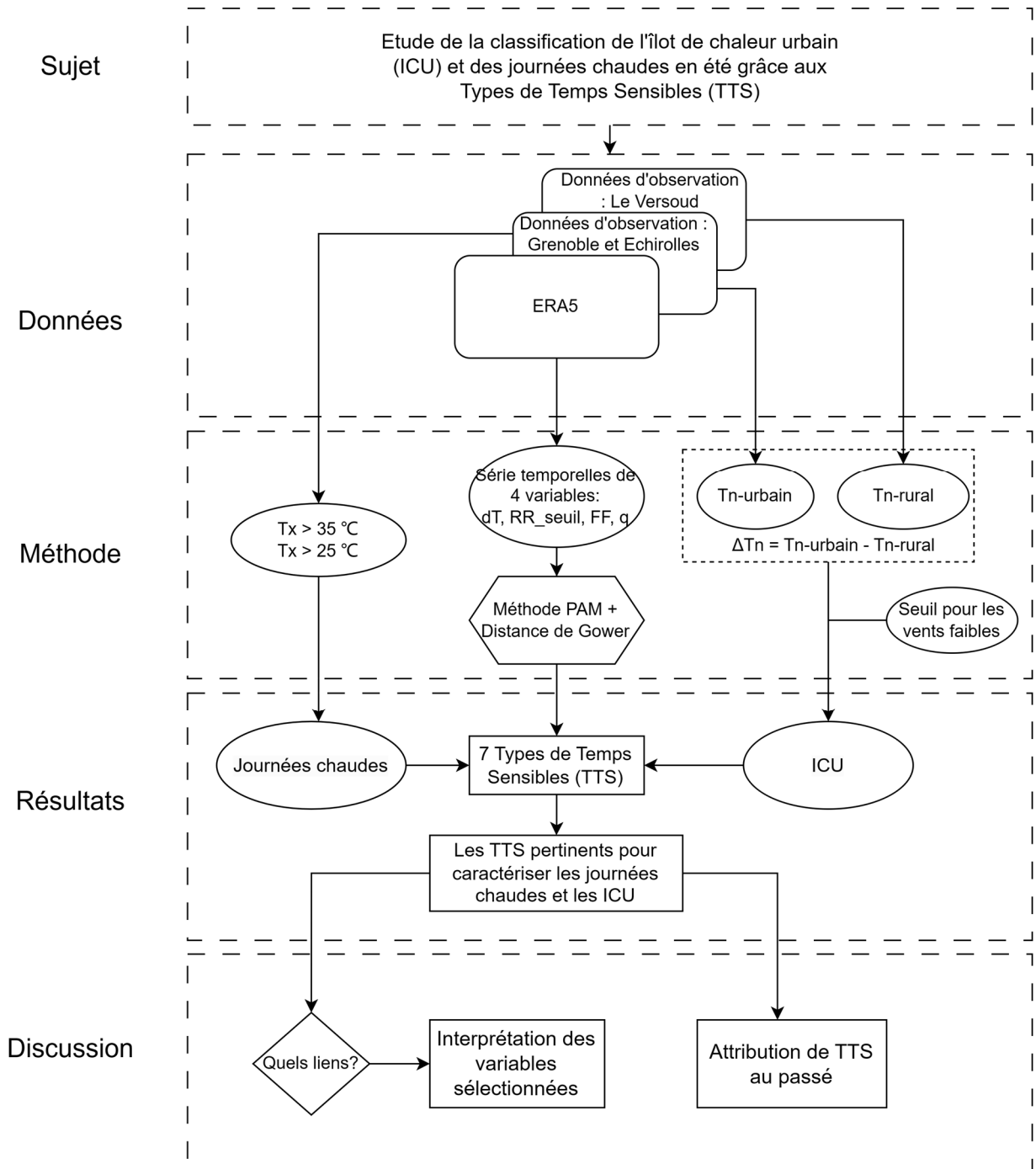


Figure 3 : Schéma synthétisant la méthodologie générale de l'étude.

1.3.1. Méthode adaptée de la classification de Types de Temps Sensibles (TTS)

Les données de réanalyse d'ERA5 ont été sélectionnées comme données d'entrée. La direction du vent des données d'ERA5 est mal représentée dans les zones de montagne en raison de la topographie (Jiang *et al.*, 2021). Les conditions particulières de la localisation géographique de Grenoble, entourée de montagnes sur trois côtés, ajoutent à la difficulté de mesurer la direction du vent. Comme le montre la [figure 4](#), ERA5 est comparée à la direction horaire du vent de la station de référence Versoud et présente de grandes différences. De plus, ces directions du vent sont également différentes de celles de la station de Grenoble-Saint-Geoirs ([Annexe 4](#)). Les directions du vent exprimées dans les données d'ERA5 sont principalement de nord-nord-ouest et de sud-est, alors que les principales sources de direction du vent mesurées à la station du Versoud sont de nord-nord-est et de nord-est. Elles ont été identifiées comme des quadrants différents selon les quatre quadrants de la direction du vent dans la méthode originale. Par conséquent, ce paramètre a été exclu de l'étude.

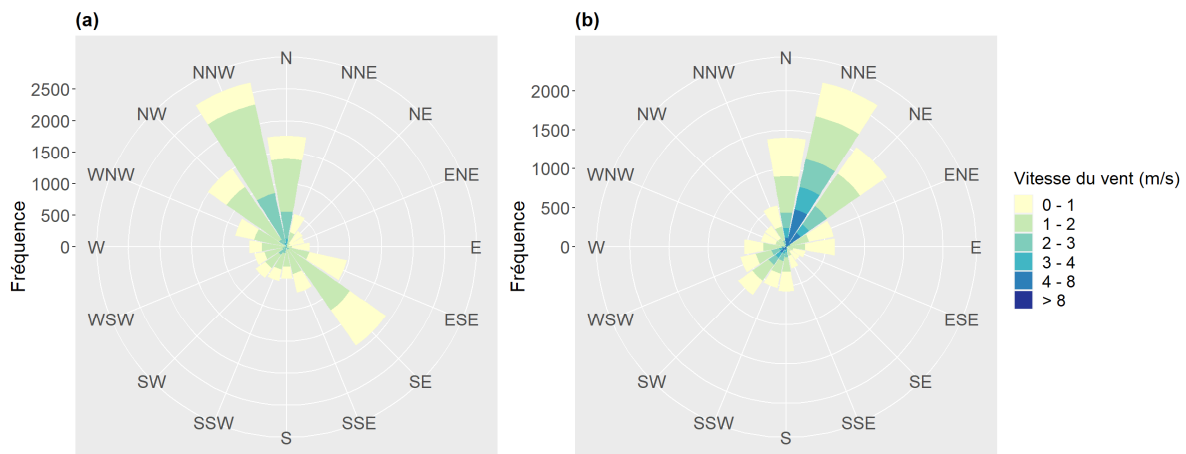


Figure 4 : Rose des vents horaires pendant la période MJJAS 2019-2022 (N=14688) à partir des données (a) ERA5 et (b) Le Versoud.

Les précipitations peuvent avoir un effet sur l'ICU en fonction de leur intensité et de leur durée (He, 2018). Si les précipitations sont faibles et que les conditions météorologiques ne changent pas de manière significative, l'ICU sera légèrement atténué. En revanche, si les précipitations sont intenses, une couverture nuageuse et une humidité relativement élevée ont un impact plus important sur l'absorption de la chaleur stockée à la surface, ce qui peut conduire à une réduction importante de l'ICU (Yang *et al.*, 2019). Cette étude se concentre sur l'ICU, de sorte que la présence ou l'absence de précipitations, ou la présence de précipitations exceptionnelles, est plus importante que la quantité de précipitations. Ainsi, les variables aux précipitations ont été divisées en trois groupes. Puisque le 90^e centile des précipitations quotidiennes pour la période de mai à septembre de 2002 à 2022 est de 13,45 mm, les valeurs de 15 mm ou plus sont définies comme le groupe de précipitations exceptionnelles, moins de 1 mm pour le groupe sans pluie, et les valeurs entre les deux pour le groupe avec pluie.

Au cours de ce processus, une série de tests a été réalisée en utilisant différentes variables d'entrée, telles que la suppression ou le maintien de la direction du vent, la modification des

précipitations (Annexe 5). Finalement, les cinq variables originales de la méthode des TTS ont été modifiées et sélectionnées pour quatre variables : la direction du vent a été supprimée. Les précipitations ont été transformées de données numériques en données catégorielles et divisées en trois catégories : moins de 1 mm, supérieur ou égal à 1 mm et inférieur à 15 mm, et supérieur ou égal à 15 mm.

Les quatre variables finales modifiées, à savoir l'amplitude thermique journalière (dT en °C) et les moyennes journalières d'humidité spécifique (q en kg.kg⁻¹), de précipitations en seuil (RR_seuil en trois groupes : 0-1 mm; 1-15 mm; ≥ 15 mm), de force du vent (FF en m.s⁻¹) ont été utilisées comme paramètres d'entrée.

Les résultats de la méthode adaptée de TTS sont obtenus en modifiant les paramètres d'entrée sur la base du script calculatoire de Hidalgo et Jougla (2018). Il est d'abord nécessaire de choisir le nombre optimal de TTS. Selon la méthode originale, le nombre optimal de TTS choisi correspond à un minimum local entre 4 et 25 clusters. Le nombre de TTS pour définir le climat local de la ville, 4 et 15 itérations de clusters, est suffisant pour optimiser la classification et économiser beaucoup de temps. Le RMSE (Root Mean Square Error) est calculé à partir de la série reconstruite et de la série originale observée sur des données horaires pour la sélection de nombre de TTS (Hidalgo et Jougla, 2018; Jougla et al., 2019).

Comme le montre la figure 5, le nombre de TTS est de 12 avec le RMSE le plus faible, mais il existe peu de différence dans le RMSE, soit un cinquième de décimale, pour différents nombres de TTS.

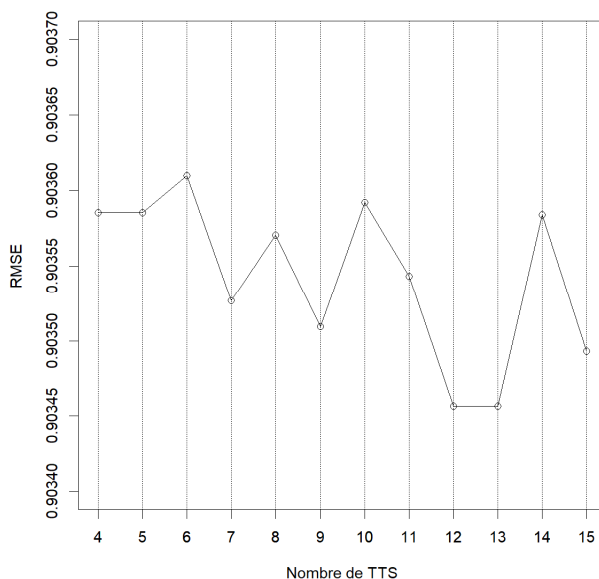


Figure 5 : Distance entre la série originale et la série reconstruite pour chaque nombre de TTS testé.

De plus, étant donné que l'étude porte sur l'effet d'îlot de chaleur et cible la saison estivale plutôt que toute l'année, le nombre de TTS a été réduit au minimum pour maximiser la facilité d'interprétation des résultats. Par ailleurs, la méthode originale comprend cinq paramètres d'entrée et 9 TTS choisis pour Grenoble dans l'étude des cinquante villes françaises (Jougla et al., 2019), alors que la méthode adaptée supprime la direction du vent et ne garde que quatre variables. La réduction des paramètres permet de regrouper certaines situations météorologiques, de sorte que 7 TTS sont finalement sélectionnés.

1.3.2. Définition de l'intensité de l'ICU

L'îlot de chaleur urbain (ICU) correspond aux écarts de températures minimales lorsque le ciel est clair et dégagé avec un vent faible ou absent. Il s'agit d'un phénomène complexe qui se développe de manière plus marquée pendant la nuit, lorsque les situations météorologiques sont calmes et claires, à savoir un état de ciel clair et un vent faible (Arnfield, 2003 ; Cantat, 2004).

L'effet d'ICU est un phénomène météorologique résultant de la différence de température entre la campagne et la ville pendant la nuit, qui se mesure généralement par l'écart de température minimale entre les deux lieux (Oke, 1973). La différence de température entre les sites urbains et ruraux varie tout au long de la nuit. En général, cette différence diminue rapidement après la période la plus fraîche de la nuit. Par conséquent, il existe plusieurs façons de mesurer l'intensité de l'ICU. Il peut s'agir de l'écart des températures minimales, de l'écart maximal instantané ou de la moyenne nocturne (Foissard, 2015).

Dans cette étude, l'intensité de l'ICU a été estimée à partir de la différence entre les températures minimales (T_n) dans les zones urbaines et rurales ([Équation 1]). La T_n est mesurée entre 18h00 UTC la veille et 18h00 UTC le jour. La T_n en milieu rural (T_{n-r}) est renseignée par la station météorologique du Versoud, tandis que la T_n en ville urbaine (T_{n-u}) est fournie respectivement par l'Office de Tourisme situé dans le centre-ville de Grenoble et la station météorologique de la mairie d'Echirolles (Figure 1).

$$\Delta T_n = T_{n-u} - T_{n-r} \quad [\text{Équation 1}]$$

Bien que la T_n ne soit pas nécessairement enregistrée au même moment dans les deux stations, elle est généralement atteinte peu avant l'aube et peut être considérée comme le moment le plus frais de la nuit, ce qui correspond à la régulation thermique du corps humain après une journée chaude (Montávez *et al.*, 2000; Stéphane *et al.*, 2005; Gabriel and Endlicher 2011).

Afin de déterminer les seuils de l'ICU, une analyse a été menée en utilisant une grande quantité de données. Pour l'effet d'ICU, juillet-août est très favorable en raison de l'anticyclone subtropical, mais cette période commence parfois au printemps et se prolonge parfois jusqu'au début de l'automne (Cantat, 2004). De ce fait, une période d'été étendue, allant de mai à septembre, a été sélectionnée. Les données météorologiques ont été relevées sur une période de 2020 à 2022, pour Grenoble, avec une absence partielle de données pour les mois de mai et juin 2020. Un total de 377 jours ont été pris en compte. Pour Echirolles, les données ont été collectées sur une période de 2019 à 2022, aucune donnée n'étant disponible pour une partie des mois de juin 2021 et de mai et septembre 2022. Au total, 462 jours ont été inclus.

La figure 6 illustre la relation entre la vitesse du vent enregistrée au moment de la mesure de la T_n et la différence de température nocturne entre la ville et la campagne (ΔT_n).

Sur les 377 jours de données de la saison estivale étendue de Grenoble, 52,5 % des jours présentent ΔT_n supérieur ou égal à 3°C, soit un peu plus d'un jour sur deux et 10,6 % des jours ΔT_n a été supérieur ou égal à 5°C. En plus, selon la figure 6a, lorsque la vitesse du vent est

supérieure à 2 m/s, ΔT_n est inférieure à 5°C pour tous les jours de données. Dans ce cas de vitesses de vent supérieures à 2 m/s, si ΔT_n est supérieurs ou égal à 3°C, il y a seulement 16 jours (4,24 %) sur l'ensemble de la période d'étude.

Sur les 462 jours de données de la saison estivale étendue d'Echirolles, 55,2 % des jours présentent ΔT_n supérieur ou égal à 2°C, soit un peu plus d'un jour sur deux et 7,8 % des jours ΔT_n a été supérieur ou égal à 4°C. En plus, selon la [figure 6b](#), lorsque la vitesse du vent est supérieure à 1 m/s, ΔT_n est inférieure à 4°C pour presque tous les jours de données à l'exception de deux jours. Dans ce cas de vitesses de vent supérieures à 1 m/s, si ΔT_n est supérieurs ou égal à 2°C, il y a seulement 16 jours (3,46 %) sur l'ensemble de la période d'étude.

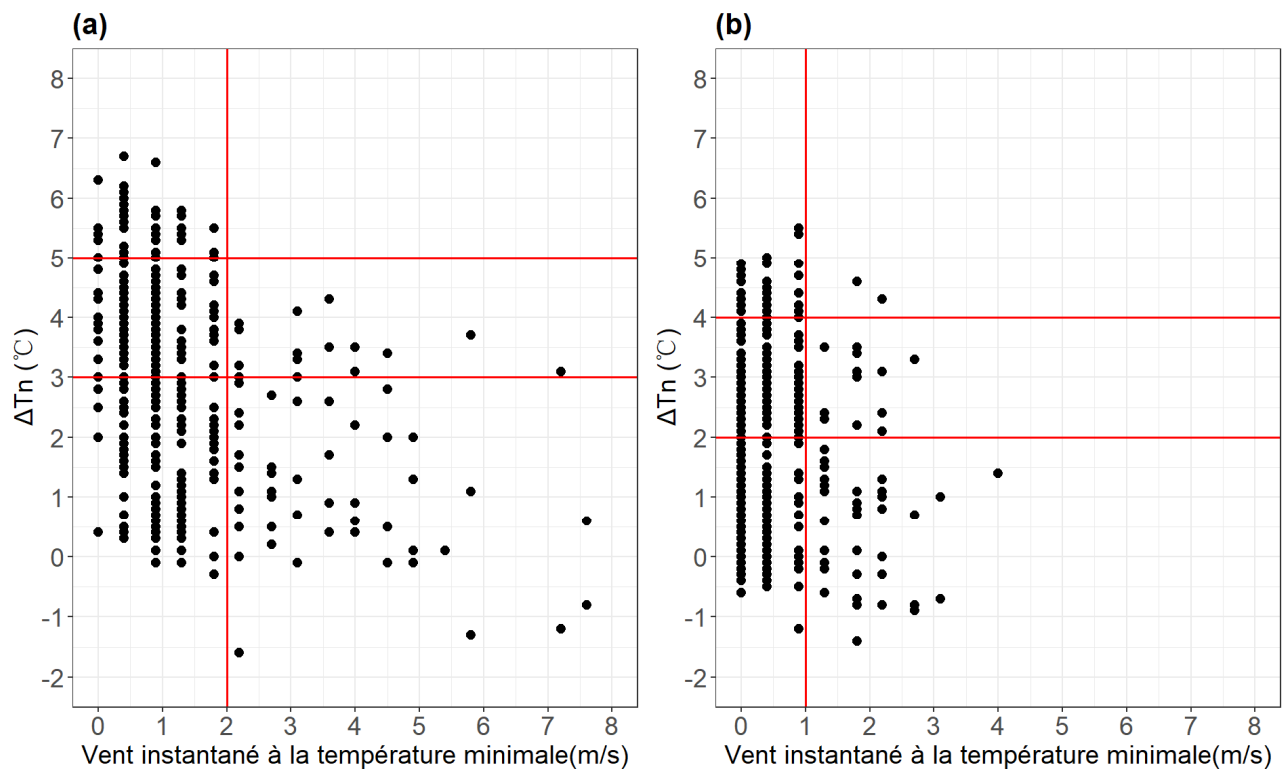


Figure 6 : Relation entre le vent instantané à la température minimale et ΔT_n à (a) Grenoble (N=377) et (b) Echirolles (N=462).

Il est souvent difficile de quantifier directement l'état du ciel pendant la nuit. Toutefois, une approche indirecte consiste à mesurer les amplitudes thermiques, c'est-à-dire les écarts de température entre la température maximale et minimale enregistrées pendant la journée ([Foissard et al., 2022](#)).

Pour Grenoble et Echirolles, la [figure 7](#) montre ΔT_n entre la ville et la campagne en fonction des amplitudes thermiques et des vitesses de vent. Pour Grenoble, il a été constaté que pour des amplitudes thermiques supérieures à 10°C et des vitesses de vent inférieures à 2 m/s , ΔT_n supérieures ou égales à 3°C ont été enregistrées lors de 77 % des nuits. Pour Echirolles, pour des amplitudes thermiques supérieures à 12°C et des vitesses de vent inférieures à 1 m/s , des différences ΔT_n supérieures ou égales à 2°C ont été enregistrées lors de 81 % des nuits. Selon les données utilisées, dans environ 80 % des cas, c'est l'amplitude thermique qui est forte et la vitesse du vent faible, tandis que ΔT_n est également fort, mais comme l'amplitude thermique ne peut qu'indiquer indirectement l'état du ciel nocturne, elle peut être utilisée pour interpréter l'ICU, mais pas pour le définir.

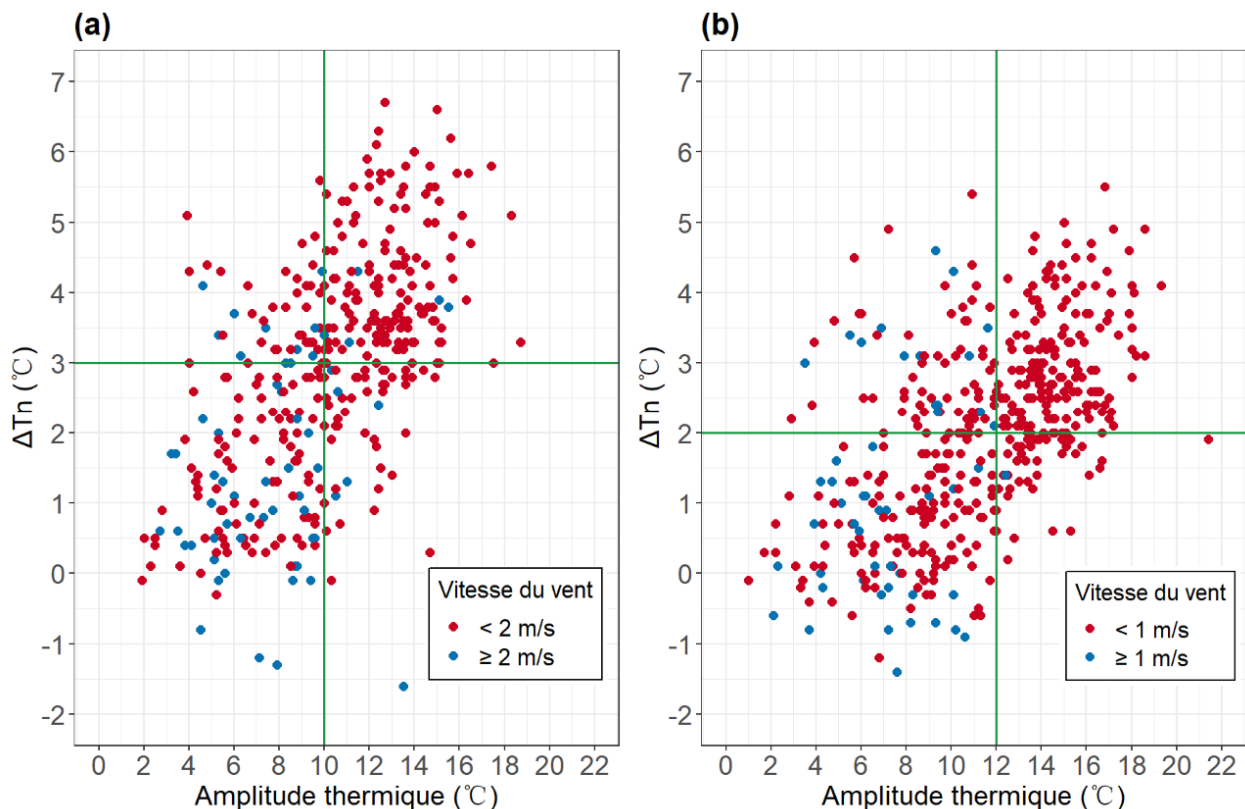


Figure 7 : Relation entre ΔT_n et l'amplitude thermique, combiné avec le vent à (a) Grenoble (N=377) et (b) Echirolles (N=462).

L'ICU est défini comme présent avec un seuil $\Delta T_n \geq 3^\circ\text{C}$ et un vent $< 2\text{ m/s}$ à Grenoble. Une distinction plus fine de l'intensité de l'ICU peut être faite en considérant les écarts de température nocturnes ΔT_n . En sélectionnant le décile supérieur approximatif des données, les écarts ΔT_n supérieurs ou égaux à 5°C sont considérés comme des ICU forts, tandis que les écarts ΔT_n compris entre 3°C et 5°C sont considérés comme des ICU modérés. Ainsi, comme le montre le [tableau 2a](#), il y a 182 nuits d'observation au total pour Grenoble. Parmi eux, il y a eu 40 jours avec un ICU fort ($\Delta T_n \geq 5^\circ\text{C}$), soit 10,6 % des données totales et 142 jours avec un ICU modéré ($3^\circ\text{C} \leq \Delta T_n < 5^\circ\text{C}$), soit 37,7 %. Pour Echirolles, l'ICU est défini comme présent avec un seuil $\Delta T_n \geq 2^\circ\text{C}$ et un vent $< 1\text{ m/s}$, soit un total de 239 nuits d'observation pour l'ICU. En

sélectionnant aussi le décile supérieur approximatif des données, les ΔT_n supérieurs ou égaux à 4°C sont considérés comme des ICU forts, tandis que les écarts ΔT_n compris entre 2°C et 4°C sont considérés comme des ICU modérés. Donc, selon le [tableau 2b](#), il y a 239 nuits d'observation au total, soit 51,7 % de l'ensemble de données (462 jours). Parmi eux, il y a eu 36 jours avec un ICU fort ($\Delta T_n \geq 4^\circ\text{C}$) et 203 jours avec un ICU modéré ($2^\circ\text{C} \leq \Delta T_n < 4^\circ\text{C}$).

Tableau 2 : Nombre de jours sous la combinaison du seuil ΔT_n et du seuil de vitesse du vent et pourcentage de jours avec l'intensité d'ICU obtenue pour a) Grenoble et b) Echirolles.

a)

	Vitesse du vent < 2 m/s	Vitesse du vent \geq 2 m/s		Nb de jour	Pourcentage (%)	
$\Delta T_n < 3^\circ\text{C}$	133	46	→	Pas d'ICU	195	51,7
$3^\circ\text{C} \leq \Delta T_n < 5^\circ\text{C}$	142	16	→	ICU modéré	142	37,7
$\Delta T_n \geq 5^\circ\text{C}$	40	0	→	ICU fort	40	10,6
Total	315	62		Total	377	100

b)

	Vitesse du vent < 1 m/s	Vitesse du vent \geq 1 m/s		Nb de jour	Pourcentage (%)	
$\Delta T_n < 2^\circ\text{C}$	162	38	→	Pas d'ICU	223	48,3
$2^\circ\text{C} \leq \Delta T_n < 4^\circ\text{C}$	203	14	→	ICU modéré	203	43,9
$\Delta T_n \geq 4^\circ\text{C}$	36	2	→	ICU fort	36	7,8
Total	408	54		Total	462	100

2. Résultats

2.1. Résultats de la classification des TTS

La distribution de chaque TTS peut être obtenue à partir de l'attribution quotidienne des TTS. Il existe une répartition hétérogène des données en fonction des TTS. Le TTS 1 est légèrement plus représenté que les autres, avec un peu moins de 22,5 %, tandis que le TTS 4 est le moins représenté, atteignant un peu plus de 8 %. La [figure 8](#) met en évidence les TTS typiques de l'été, qui sont associés à plus de 50 % des jours de cette saison. Ces TTS sont principalement les TTS 6 et 7. Ils représentent les conditions météorologiques estivales les plus fréquentes. En revanche, les TTS les plus représentatifs de l'hiver sont les TTS 1 et 2. Ces TTS sont généralement observés pendant la période hivernale et sont associés à des conditions météorologiques froides. Il est également intéressant de constater que certains TTS ne sont pas, ou très peu, représentés pendant certaines saisons. Par exemple, les TTS 1 et 2 ont peu ou pas de jours en été, ce qui montre qu'ils sont moins courants pendant cette saison. De même, les TTS 6 et 7 sont absents en hiver, indiquant qu'ils sont peu fréquents pendant les mois les plus froids de l'année.

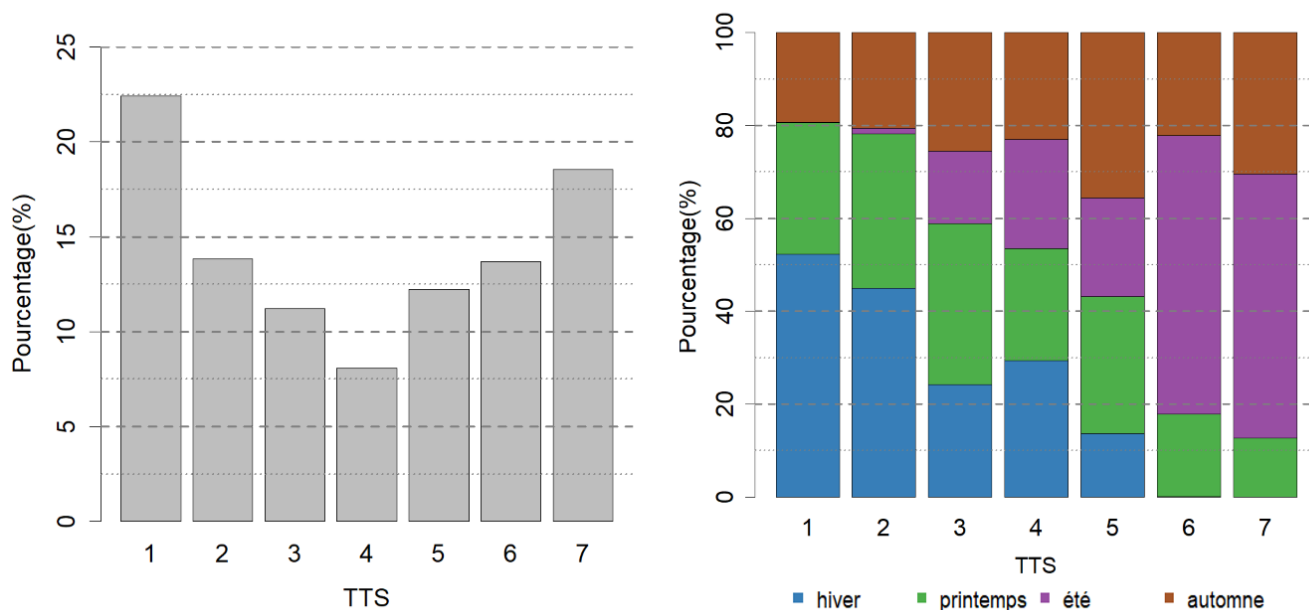
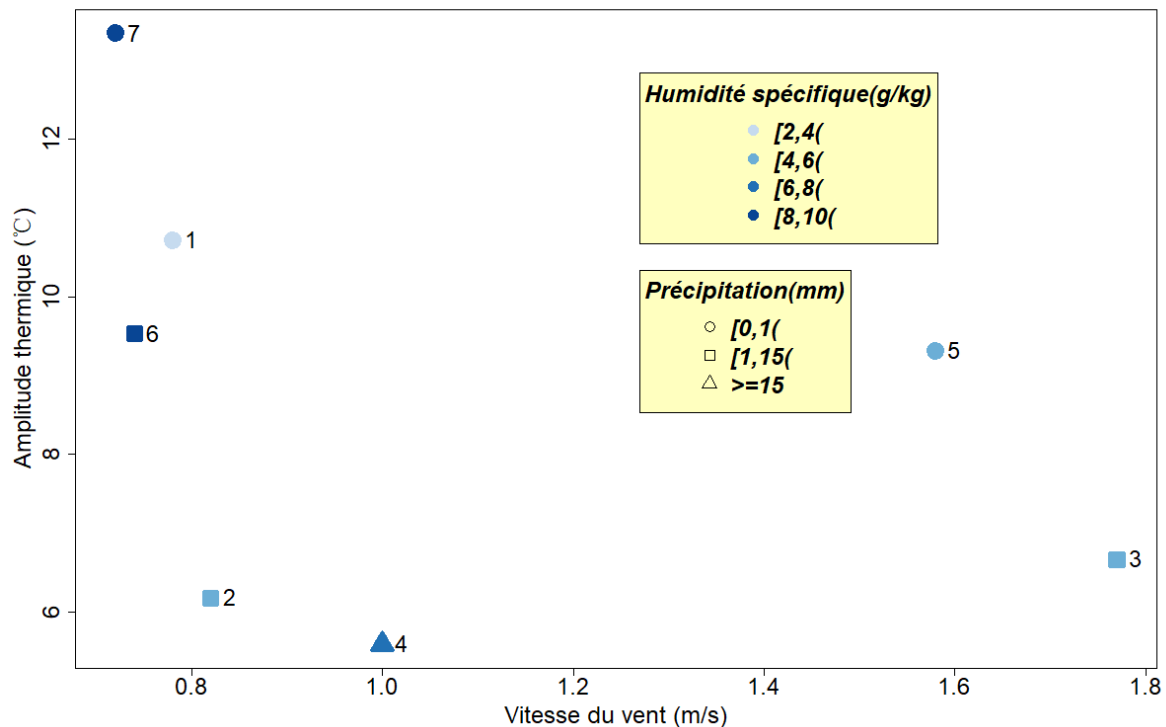


Figure 8 : Répartition des 7 TTS à Grenoble et Echirolles; à gauche, répartition fréquentielle; à droite, déclinaison par saison.

La [figure 9](#) présente la distribution des TTS selon deux axes déterminés par la moyenne de l'amplitude thermique quotidienne et de la force du vent. Une troisième dimension est ajoutée en considérant la moyenne des précipitations quotidiennes, et une quatrième dimension en considérant la moyenne de l'humidité spécifique. De toutes les TTS, TTS 3 a la vitesse moyenne du vent la plus élevée (près de 1.8 m/s). TTS 7 a une grande amplitude thermique avec une moyenne de 13,34°C. Seule TTS 4 correspond à la catégorie des fortes précipitations avec des précipitations moyennes journalières de 23,28 mm ([Tableau 3](#)).



[Figure 9](#) : Distribution des TTS en fonction de leurs caractéristiques moyennes.

[Tableau 3](#) : Valeurs moyennes des variables de la classification.

TTS	dT (°C)	RR (mm)	q (g/kg)	FF (m/s)	freq (%)
1	10,71	0,12	3,33	0,78	22,43
2	6,17	5,84	4,32	0,82	13,85
3	6,66	5,68	5,41	1,77	11,23
4	5,59	23,28	6,47	1	8,07
5	9,31	0,25	5,72	1,58	12,22
6	9,53	5,5	9,36	0,74	13,68
7	13,34	0,18	8,6	0,72	18,54

Le **tableau 4** résume les différentes caractéristiques des TTS, divisé en différents groupes en fonction de l'amplitude thermique, de la vitesse du vent et de l'intensité des précipitations, afin de distinguer chaque TTS et de mieux comprendre leurs définitions.

Tableau 4 : Définition des TTS en fonction de leurs caractéristiques.

	Sans pluie		Avec pluie	Pluie forte
Forte amplitude thermique avec un vent de faible intensité	TTS 1 Basses températures principalement en hiver.	TTS 7 Les journées sont chaudes et sèches.	TTS 6 Principalement en été. Les journées sont chaudes.	
Faible amplitude thermique avec un vent faible			TTS 2 Principalement en hiver.	TTS 4 Pluie forte possible toute la journée.
Vent fort et faible amplitude thermique	TTS 5 Les journées sont douces, avec des températures estivales pouvant atteindre 25°C.		TTS 3 Les journées sont fraîches.	

2.2. Détails des TTS estivaux typiques

Pour une analyse plus détaillée des situations météorologiques d'un été typique TTS 6 et TTS 7, des tracés du cycle moyen journalier ont été réalisés. L'humidité spécifique est remplacée par l'humidité relative, car cette dernière n'est pas couramment utilisée pour décrire les situations météorologiques. Par rapport aux données utilisées, seuls 80 % des jours du TTS et de la saison concernée la plus proche du centroïde ont été utilisés pour l'interprétation. L'objectif est d'éliminer les extrêmes afin d'éviter l'homogénéisation des tracés du cycle pour chaque TTS. Pour le cycle journalier, la ligne claire est la moyenne de cet échantillon de 80 %, le panache étant délimité par les valeurs les plus basses et les plus élevées de cet échantillon. La ligne noire en pointillés représente le cycle journalier du centroïde.

La **figure 10a** représente les cycles journaliers sur TTS 6. Il est associé à presque 14 % des jours de la classification. Ce TTS est réparti à un peu moins de 20 % au printemps, 60 % en été et moins de 20 % en automne. Aucune journée d'hiver n'est associée à ce TTS. L'amplitude thermique journalière moyenne est de 10°C. En termes de température, les journées associées à ce TTS sont douces ($T_x \approx 20^\circ\text{C}$) voire chaudes ($T_x \approx 25^\circ\text{C}$). Les maximales sont de 30°C en été. Les précipitations sont positives en moyenne. Les cycles moyens saisonniers d'humidité relative ont une amplitude d'environ 20 ou 30 % et sont centrés autour de 70 %. Les vents sont faibles à ce TTS et sont généralement plus forts dans l'après-midi.

La **figure 10b** montre les cycles journaliers sur TTS 7. Presque 18 % des jours utilisés pour construire la classification sont attribués au TTS 7. Les journées associées à ce TTS se répartissent à presque 15 % au printemps, 50 % en été et un peu plus de 25 % en automne. Les journées d'hiver sont très rares et donc ne sont pas suffisamment nombreuses pour être représentatives. C'est le TTS le plus estival pour Grenoble. L'amplitude thermique journalière

moyenne est de presque 13,5°C ; c'est la plus forte pour les TTS définis à Grenoble. Le cycle moyen estival dépasse les 20°C dans l'après-midi. Les maximales en absolu atteignent 30°C en été, 25°C au printemps et 25°C en automne. Compte tenu des températures généralement basses d'ERA5 et de l'existence d'un biais, ils devraient en fait être supérieurs d'au moins 5°C. Les précipitations sont nulles. Les cycles moyens d'humidité relative sont très secs. La vitesse du vent est faible et régulière. Le cycle moyen de force du vent se situe autour de 1 m/s.

Le TTS 6 et le TTS 7 sont des types de temps estivaux courants, mais il existe de différences évidentes entre les deux. Le TTS 6 se caractérise par des précipitations et une humidité relative élevée. Le TTS 7 se distingue par la sécheresse avec des températures élevées et de grandes différences de température tout au long de la journée.

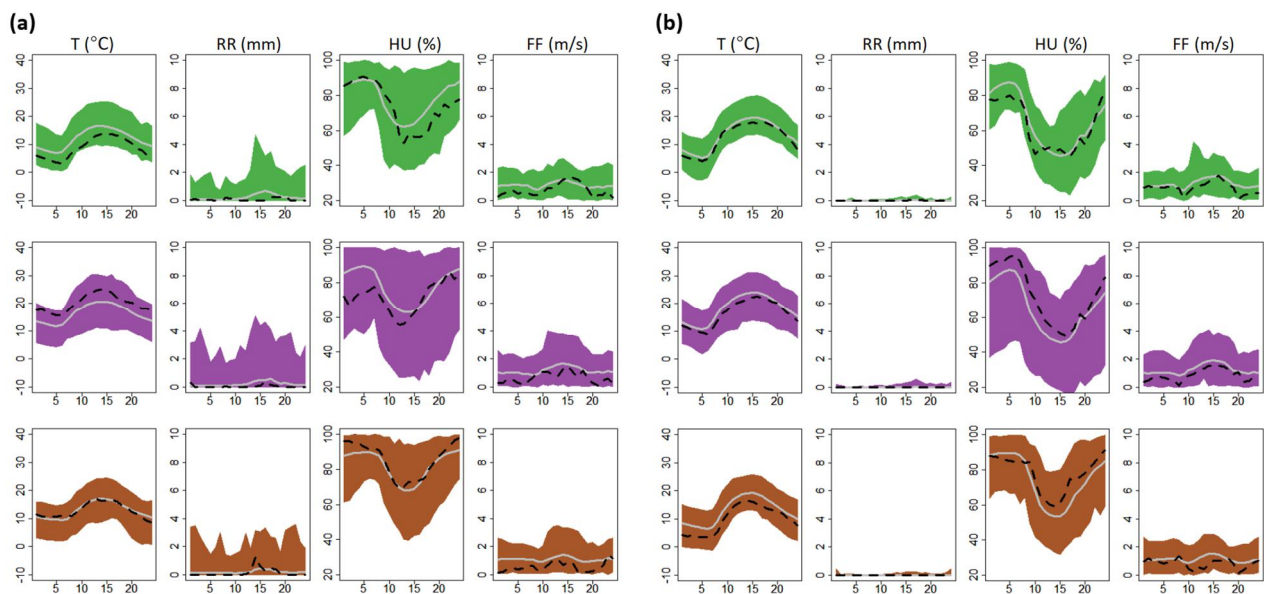


Figure 10 : Cycle journalier des paramètres du TTS 6 (a) et du TTS 7 (b). Le tracé en clair correspond à la moyenne et le panache est délimité par le minimum et le maximum d'un échantillon réduit aux 80 % les plus proches de la moyenne. La ligne noire en pointillés représente le cycle journalier du centroïde. Le printemps est en vert, l'été en violet et l'automne en marron; l'hiver n'est pas représenté car trop peu de journées lui sont associées.

2.3. Relation entre les TTS et la présence des ICU et des journées chaudes

En raison de certains biais présents dans les données d'ERA5, les résultats de TTS sont également attribués aux données d'observation de Versoud provenant de la même série temporelle de 2002 à 2022. La comparaison entre le [tableau 5a](#) et le [tableau 5b](#) montre qu'ERA5 a des biais dans les Tx et les Tn, généralement inférieurs aux données d'observations du Versoud. Ceci compense l'interprétation de l'aspect température du TTS. En fait, le TTS 7 atteint une température maximale moyenne supérieure à 30°C en été. De plus, le [tableau 5c](#) indique que le TTS 7 affiche la température maximale moyenne la plus élevée pour les trois saisons, à l'exception de l'hiver, où TTS 7 est manquant. En calculant le nombre de jours de forte chaleur et de jours d'été, le TTS 7 représente le mieux les conditions météorologiques

chaudes, notamment pendant l'été. Le TTS 6 caractérise aussi la saison estivale et représente davantage les nuits tropicales.

Tableau 5 : Moyenne des températures maximales et minimales saisonnières pour chaque TTS de 2002 à 2022 (a) pour les données d'ERA5 et (b) les données du Versoud et (c) nombre de jours avec des Tx supérieures à 35°C, 30°C et 25°C, des Tn supérieures à 20°C et des Tx supérieures ou égales à 34°C et Tn supérieures ou égales à 19°C pour chaque type de TTS à partir des données du Versoud (sachant que les seuils biométéorologiques pour l'Isère sont $T_n \geq 19^\circ\text{C}$ et $T_x \geq 34^\circ\text{C}$).

a)

Saison	Hiver		Printemps		Eté		Automne	
	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn
TTS 1	3.28	-6.47	11.13	-1.51	17.18	5.61	8.98	-1.50
TTS 2	2.08	-3.55	7.96	1.04	12.54	7.35	6.29	0.08
TTS 3	3.09	-3.37	9.39	2.16	15.13	8.94	9.75	3.36
TTS 4	3.31	-1.29	8.41	2.87	17.28	10.55	10.06	4.34
TTS 5	3.73	-3.64	12.69	2.43	18.35	9.12	13.11	3.81
TTS 6	11.10	1.00	17.01	6.89	21.10	11.40	17.36	8.76
TTS 7	---	---	19.73	5.36	24.04	10.57	19.27	6.61

b)

Saison	Hiver		Printemps		Eté		Automne	
	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn
TTS 1	7.58	-2.47	18.45	2.27	24.6	8.05	13	1.95
TTS 2	7.01	0.82	14.85	5.87	19.05	11.59	11.48	5.06
TTS 3	8.98	0.9	16.7	7.36	22.31	13.95	15.69	7.94
TTS 4	8.29	2.74	14.39	7.95	23.2	15.75	14.93	9.35
TTS 5	9.19	-0.47	20.22	6.51	25.6	12.87	18.63	7.02
TTS 6	14.9	7.1	24.19	11.97	28	16.08	23.07	13.14
TTS 7	---	---	27.22	9.79	30.79	14.64	24.89	10.3

c)

TTS	Tx > 35	Tx > 30	Tx > 25	Tn > 20	$T_n \geq 19$ & $T_x \geq 34$
1	0	0	23	0	0
2	0	0	1	0	0
3	0	0	48	1	0
4	0	11	61	2	0
5	0	10	191	3	0
6	19	221	628	19	11
7	75	538	1119	5	20

La méthode d'identification des vagues de chaleur mentionnée dans l'étude de [Soubeyrou et al. \(2016\)](#) implique trois dimensions : la durée, l'intensité et la sévérité. Le calcul en termes de jours consécutifs est plus complexe et c'est pourquoi le terme de vague de chaleur n'est pas utilisé directement. Certains seuils et indicateurs liés indirectement à la vague de chaleur sont utilisés pour montrer l'occurrence de la situation thermique. Il existe deux indicateurs couramment utilisés pour décrire des situations estivales en fonction des températures maximales : les jours de chaleur ou jours estivaux ($T_x > 25^\circ\text{C}$) et les jours très chauds ($T_x > 35^\circ\text{C}$) ([DRIAS, 2020](#); [Karl et al., 1999](#)). Ces seuils sont utilisés pour classer les jours en fonction de leur température maximale.

La combinaison des résultats de classification TTS avec les données de la station météorologique révèle que la classification TTS est capable de différencier les conditions météorologiques favorisant les ICU et les journées chaudes. Parmi les différentes catégories de TTS, le TTS 7 est celui qui identifie le mieux les situations d'ICU et de journées estivales. La [figure 11a](#) montre que les situations d'ICU fort et d'ICU modéré sont principalement observées dans les TTS 7. Jusqu'à 80 % des jours d'ICU fort sont identifiés comme TTS 7, tandis que 60 %

des cas d'ICU modéré ont également été associés à cette catégorie. D'après la [figure 11c](#), lorsque les conditions météorologiques sont classées comme TTS 7, la Tx dépasse 30°C dans plus de 50 % des cas. TTS 7 est également représentatif des nuits tropicales (Tn dépasse 20°C) et des jours dépassants des seuils biométéorologiques, soit $T_n \geq 19^\circ\text{C}$ et $T_x \geq 34^\circ\text{C}$ ([figure 11e](#)).

3. Discussion

3.1. Interprétation des liens entre l'occurrence des ICU et des journées chaudes et les variables sélectionnées

Pour mieux comparer la méthode adaptée et la méthode originale, le même nombre de TTS, soit 7, a été choisi. Comme le montre la [figure 11](#), la méthode adaptée est plus représentative des ICU et des journées chaudes que la méthode originale en région grenobloise. La plupart des cas d'ICU et de journées estivales selon la méthode modifiée se concentrent dans le TTS 7, alors que les résultats de la méthode originale sont plus dispersés et ne sont pas concentrés dans un TTS particulier.

Cela peut s'expliquer par des modifications apportées aux paramètres d'entrée. Tout d'abord, la variable des précipitations est importante en tant que variable catégorielle, car elle distingue la présence ou l'absence de précipitations ainsi que les fortes précipitations. Cette variable permet donc de regrouper dans une large mesure les situations météorologiques favorisant l'apparition des ICU et des jours estivaux. De plus, la direction du vent journalier a peu d'effet sur l'ICU qui est plus marqué pendant la nuit. L'approche originale consiste à distinguer les différentes TTS en fonction de la direction du vent, ce qui permet d'identifier certaines situations similaires propices à l'ICU et à la chaleur extrême comme des TTS différents en raison des variations de direction du vent.

Les situations météorologiques de TTS 7 dans la méthode adaptée sont les plus cohérentes avec le type de climat à ICU et les journées chaudes. TTS 7 se caractérise comme les jours avec une amplitude thermique forte, un vent faible, l'absence de précipitation et une humidité spécifique forte, c'est-à-dire des jours de forte chaleur sèche.

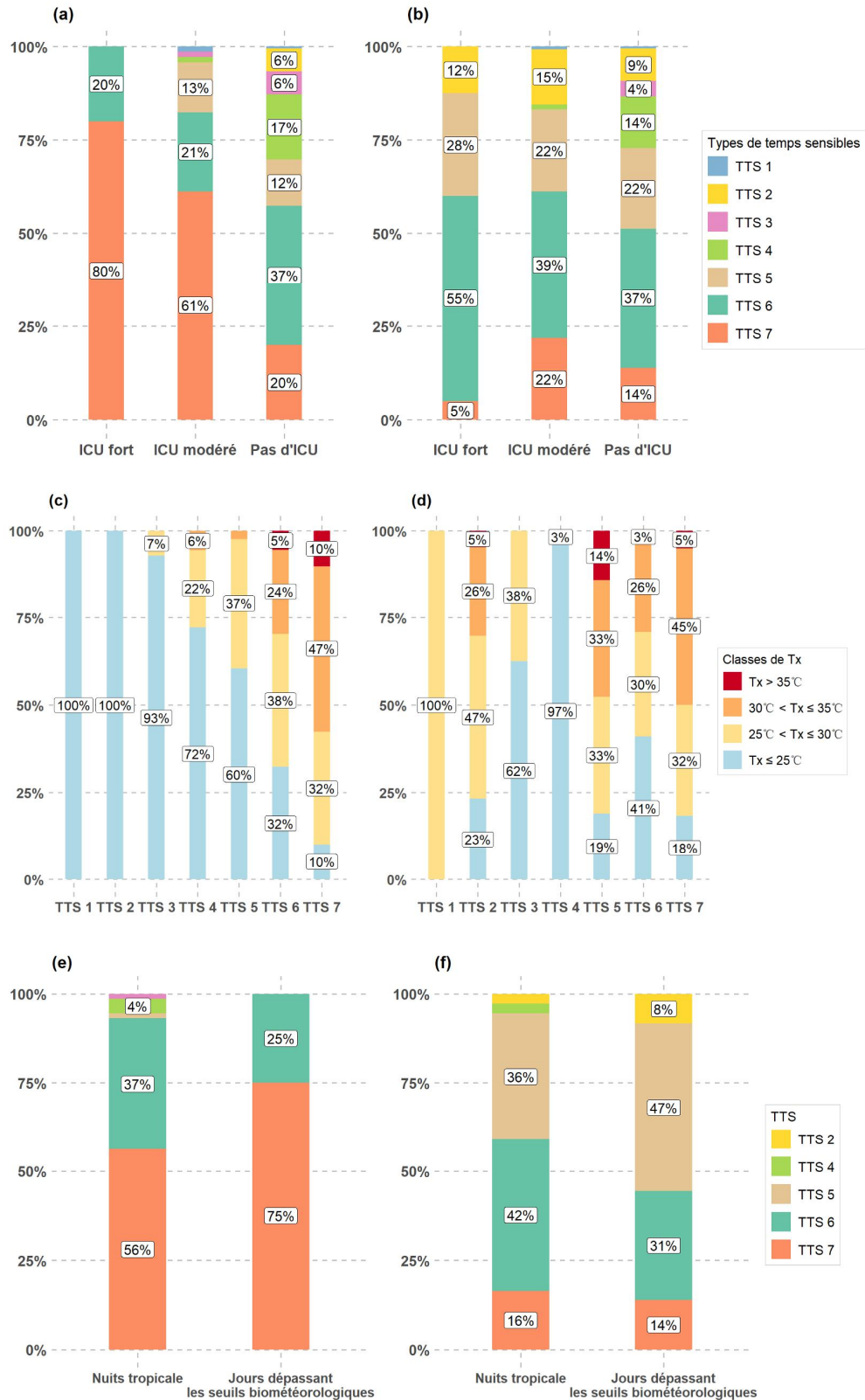


Figure 11 : Comparaison de distribution des jours (a, b) par TTS à différentes intensités d'ICU, (c, d) avec différentes classes de Tx à chaque TTS, (e, f) à la nuit tropicale ($T_n > 20^\circ\text{C}$) et au-dessus des seuils biométéorologiques ($T_n \geq 19^\circ\text{C}$ et $T_x \geq 34^\circ\text{C}$) par TTS à Grenoble entre (a, c, e) la méthode adaptée (paramètres dT, RR_seuil, q, FF) et (b, d, f) méthode originale (paramètres dT, RR, q, FF, DD) avec les données d'ERA5 (moins de 3 % sans étiquette). (Echirolles en annexe 6).

3.2. TTS dans les attributions passées

La fréquence d'apparition des chaque TTS peut changer dans des conditions météorologiques passées ou futures, mais leurs caractéristiques dynamiques restent les mêmes. Il est donc possible d'attribuer des TTS représentés pour chaque jour en dehors de la période de référence sur la base des résultats de la classification de TTS obtenus au cours de la période de référence, tels que les observations passées ou les projections futures (Hidalgo et Jouglà, 2018).

Les données de la réanalyse d'ERA5 utilisées dans l'étude remontent à 1950 et peuvent donc être appliquées pour observer le TTS dans le passé. La période de référence utilisée pour la classification s'étend de 2002 à 2022, couvrant ainsi 21 ans de données. De ce fait, les observations passées sont également divisées au même intervalle de temps, par exemple de 1960 à 1980 et de 1981 à 2001. Les centroïdes de chaque TTS des résultats de la classification précédente permettent d'attribuer le TTS à chaque jour des deux périodes passées en fonction de la matrice de la distance de Gower. Seules les données de la période estivale étendue de mai à septembre sont sélectionnées pour l'analyse.

Comme le montre la figure 12, à l'exception du TTS 7, le reste des TTS a peu varié au cours des trois périodes, autour de 2 %. Par contre, la proportion de TTS 7 a régulièrement augmenté, passant de 31 % à 38 % du total. Au cours de la période de référence, le nombre de jours TTS 7 a augmenté de plus de 200 jours par rapport à la période 1960-1980, soit une moyenne de 10 jours TTS 7 de plus par année entre mai et septembre.

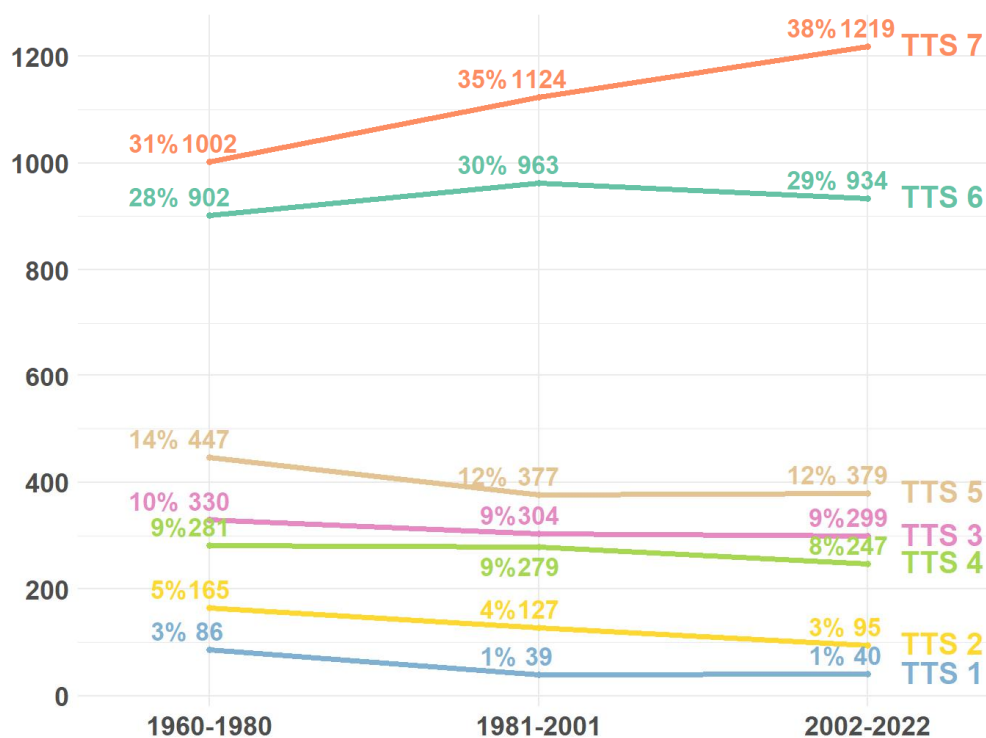


Figure 12 : Résultats de l'attribution des nombres de jours pour TTS de mai à septembre sur deux périodes passées (1960-1980, 1981-2001) et comparaison des tendances avec la période de référence (2002-2022).

L'analyse précédente montre que le TTS 7 est caractérisée par l'absence de précipitations, une forte amplitude thermique, une faible vitesse du vent et une forte humidité spécifique. Le [tableau 6](#) sur les valeurs moyennes et médianes des variables d'entrée pour les trois périodes montre qu'une croissance du nombre de jours TTS 7 est associée à une diminution des précipitations, une augmentation de l'amplitude thermique et de l'humidité spécifique. D'autre part, l'évolution des variables de température telles que les Tx, Tn et Tm indique aussi une augmentation continue de la température au cours des trois périodes, ce qui est cohérent avec la tendance à la hausse du nombre de jours TTS7.

Tableau 6 : Comparaison des valeurs moyennes et médianes des variables d'entrée et de température pour la période de mai à septembre par rapport aux deux dernières périodes (1960-1980, 1981-2001) et à la période de référence (2002-2022).

	RR (mm)		q (g/kg)		FF (m/s)		dT (°C)		Tm (°C)		Tn (°C)		Tx (°C)	
	moy	méd	moy	méd	moy	méd	moy	méd	moy	méd	moy	méd	moy	méd
1960-1980	4,54	1,2	8,08	8,06	1,32	1,23	10,00	9,94	12,65	12,88	7,42	7,64	17,42	17,63
1981-2001	4,62	1,19	8,52	8,58	1,31	1,22	10,01	10,11	13,64	13,88	8,43	8,81	18,44	18,74
2002-2022	4,2	0,93	8,61	8,66	1,33	1,23	10,46	10,62	14,43	14,59	8,93	9,3	19,4	19,61

3.3. Limites et utilisation

L'approche proposée dans cette étude comprend certaines techniques qui nécessitent une base de code, mais elle n'impose aucune restriction quant aux zones d'étude dans lesquelles elle peut être utilisée. De plus, elle est fondée sur des données atmosphériques provenant de la surface proche. Bien qu'une expertise atmosphérique soit nécessaire pour interpréter les situations météorologiques qui en résultent, il n'est pas nécessaire d'avoir une connaissance de la dynamique du système climatique à échelle planétaire.

Les données de réanalyse peuvent fournir des données complètes et continues sur une longue période pour la méthode de la classification des TTS. Cependant, il est important d'avoir des données d'observation en tant que données de validation, ainsi que des interprétations supplémentaires dans la partie d'analyse, afin d'identifier de manière plus précise les TTS pertinents pour caractériser des situations particulières.

La méthode adaptée [Hidalgo et Joula \(2018\)](#) proposée dans cette étude présente certaines limitations. Elle est fondée sur des moyennes journalières de paramètres et ne prend pas en compte des facteurs tels que la vitesse du vent ou les variations horaires spécifiques à la nuit. Par conséquent, bien que cette méthode soit pratique, facile à appliquer et permette d'obtenir des résultats remarquables, elle n'est pas entièrement représentative de la situation nocturne dans laquelle se produisent les îlots de chaleur urbains.

Les travaux futurs pourraient consister à attribuer les TTS aux données futures, ce qui permettrait de prédire si, et dans quelle mesure, le nombre de jours de TTS 7 devrait augmenter. Cette prédiction anticipée faciliterait l'adaptation des autorités locales aux événements de chaleur extrême. De plus, il serait intéressant d'explorer l'utilisation de données de réanalyse plus précises ou de données d'observation plus complètes pour améliorer la méthode dans le futur.

Conclusion

Cette étude applique la méthode adaptée de classification de types de temps sensibles (TTS) avec quelques modifications des variables d'entrée, fondée sur quatre variables : l'amplitude thermique, les précipitations, l'humidité spécifique et la vitesse du vent, afin d'identifier les TTS pertinents pour caractériser les journées chaudes et les ICU à l'échelle grenobloise. En l'absence de données d'observation, l'utilisation de données de réanalyse d'ERA5 complètes et fiables à l'échelle mondiale permet d'appliquer cette méthode dans différentes régions, en particulier celles qui ne disposent pas de données d'observation.

Dans cette étude, les données d'observation de la station Versoud, située en milieu quasi rural, ont été utilisées comme données de référence pour valider les données d'ERA5. Le résultat est une grande qualité des variables d'amplitude thermique et d'humidité spécifique appliquées à la méthode de classification TTS. La classification par seuil a été effectuée pour réduire l'effet de biais dans les variables de précipitations. La variable de direction du vent n'a pas été considérée dans la méthode adaptée en raison de la qualité des données insatisfaisante dans la zone d'étude.

Les données d'observation de deux stations météorologiques urbaines (Grenoble et Echirolles) et d'une station rurale (Le Versoud) ont été utilisées pour calculer l'écart des températures minimales afin de déterminer des seuils de l'intensité de l'ICU au cours de l'été 2019-2022. L'intensité de l'ICU est légèrement plus faible à Echirolles qu'à Grenoble. Les seuils d'intensité de l'ICU fondés sur ΔT_n sont donc différents. À Grenoble, un ΔT_n supérieur ou égal à 5°C est défini comme un ICU fort, alors qu'à Echirolles, il est supérieur ou égal à 4°C.

Cette méthode adaptée dans l'étude permet d'obtenir des TTS représentant différentes situations météorologiques et de les décrire à l'aide de variables. Pour la zone d'étude, la modification des variables d'entrée contribue à obtenir une classe de TTS 7 plus représentative de la présence des ICU et des journées chaudes que les autres TTS. Ce TTS 7 est caractérisé par des températures élevées, une forte amplitude thermique, l'absence de précipitations et des vents faibles. De plus, chaque TTS peut être attribué aux données passées ou futures grâce aux résultats de la période de référence. Dans cette étude, les données d'ERA5 ont été utilisées pour observer le passé. Les résultats montrent une augmentation du nombre de jours de TTS 7, reflétant ainsi une augmentation de l'occurrence de journées chaudes et d'ICU depuis 1960.

L'approche adaptée de classification des TTS présentée dans cette étude offre des avantages significatifs grâce à l'utilisation de données de réanalyse et de variables adaptées pour caractériser les journées chaudes et les îlots de chaleur urbains. Cette classification peut contribuer à améliorer notre compréhension des phénomènes associés aux conditions météorologiques extrêmes et à promouvoir des mesures d'adaptation aux chaleurs extrêmes.

Perspective et synthèse du stage

C'est avec plaisir que je poursuis mon stage dans le cadre du même programme CASSANDRE que l'année dernière. Le projet vise à répondre aux besoins d'adaptation des collectivités

locales de Grenoble et d'Echirolles. Bien que les thèmes des deux stages soient différents, l'objectif est d'étudier les phénomènes des extrêmes thermiques tels que les îlots de chaleur urbains et les jours de forte chaleur. Le sujet de mon stage de cette année consiste à identifier les TTS pertinents pour décrire les journées chaudes et les ICU sur le territoire d'étude.

Au cours de mon stage de quatre mois, j'ai commencé le premier mois à apprendre et à appliquer le script de la méthode TTS et à sélectionner les données en fonction des besoins. Comme les données d'observation étaient incomplètes, j'ai choisi d'utiliser les données de réanalyse d'ERA5. Pour travailler avec ces données, j'ai appris à convertir de format GRIB au format txt. Puis, j'ai validé les données d'ERA5 pour confirmer que je pouvais les utiliser pour la suite. Au cours de ce processus, j'ai également testé les données d'ERA5-land, mais les données d'ERA5 ont finalement choisies car elles étaient plus faciles à télécharger et plus cohérentes avec les données d'observation. Après avoir validé les données, j'ai effectué une série de tests, en me référant aux étapes du script de Julia Hidalgo, et en apportant des modifications aux variables d'entrée. Ensuite, j'ai effectué des tests statistiques sur les résultats pour vérifier s'il existait une association entre le TTS et l'ICU. J'ai essayé de visualiser les résultats, de comparer différentes variables, etc. Le mois suivant, j'ai principalement résumé les résultats de tous les tests et effectué une analyse comparative des résultats. Comme le sujet de notre étude était de caractériser l'ICU, j'ai donné la priorité à la méthode TTS qui représentait le mieux l'ICU. Enfin, j'ai choisi une méthode adaptée qui modifie les variables d'entrée. Une fois la méthode adaptée définie, j'ai analysé des résultats en profondeur au cours du troisième mois. Bien que cette étude se soit concentrée sur les TTS représentant les situations météorologiques estivales, en particulier le TTS 7, j'ai analysé chaque TTS sous le même format d'une fiche de synthèse que dans le projet MApUCE afin d'obtenir une description plus claire des caractéristiques météorologiques correspondant à chaque TTS. Le 4ème et dernier mois a été principalement occupé par la rédaction de mon mémoire et par l'attribution des TTS à des données passées. Si le temps l'avait permis, j'aurais également essayé d'appliquer l'attribution à des données futures.

Cette expérience a non seulement enrichi mes connaissances professionnelles, mais m'a aussi fait réfléchir plus profondément à mes futurs projets de carrière. Tout d'abord, d'un point de vue interdisciplinaire, avec le développement de la technologie, de plus en plus de logiciels et de langages de programmation sont disponibles pour faciliter le traitement des données. Cependant, il ne suffit pas de s'appuyer sur la programmation pour obtenir des résultats, il faut disposer de l'expertise nécessaire pour les interpréter et les analyser. C'est pourquoi la recherche interdisciplinaire devient de plus en plus courante aujourd'hui. Deuxièmement, la recherche est devenue plus ciblée. Ces dernières années, la fréquence des événements climatiques extrêmes est devenue évidente et la vulnérabilité des populations urbaines a commencé à apparaître. Ce phénomène a également attiré l'attention des autorités locales et a souligné l'importance de la recherche sur le climat urbain. Chaque ville a ses propres caractéristiques et enjeux qui nécessitent des actions adaptées.

Ce stage m'a donc permis d'affiner mon projet professionnel dans le domaine du climat urbain et du traitement des données. Je souhaite découvrir d'autres méthodes et approches afin d'appliquer des actions pratiques pour atténuer l'impact des conditions météorologiques extrêmes dans les villes.

Références bibliographiques

- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research : A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Beniston, M. (2004). The 2003 heat wave in Europe : A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, 31(2). <https://doi.org/10.1029/2003GL018857>
- Cantat, O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191, 75-102. <https://doi.org/10.4000/norois.1373>
- Cantat, O., & Savouret, E. (2014). A catalog of 'weather types' in metropolitan France. *Climatologie*, 11, 65-71. <https://doi.org/10.4267/climatologie.584>
- DRIAS, *Les futurs du climat—Accompagnement*. (2020). <http://drias-climat.fr/accompagnement/sections/181>
- Durand-Dastès, F. (2004). À propos des notions de type de temps et de type de circulation. *Norois. Environnement, aménagement, société*, 191, Article 191. <https://doi.org/10.4000/norois.1003>
- Foissard, X. (2015). *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : Application à l'agglomération rennaise*. Thèse de doctorat, Rennes 2. p. 80-81.
- Foissard X, Rome S, Bigot S. 2022, Fouvet A-C. (2022). Réseau de mesures et analyses spatio-temporelles de l'îlot de chaleur urbain grenoblois : l'été 2020. *Le changement climatique, les risques et l'adaptation*. Actes du 35ème colloque annuel de l'AIC. Toulouse, France.
- Gabriel, K. M. A., & Endlicher, W. R. (2011). Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution*, 159(8), 2044-2050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.016>
- Hajat, S., & Kosatky, T. (2010). Heat-related mortality : A review and exploration of heterogeneity. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 64(9), 753-760. <https://doi.org/10.1136/jech.2009.087999>
- He, B.-J. (2018). Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. *Urban Climate*, 24, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.004>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

- Hidalgo, J., & Jouglu, R. (2018). On the use of local weather types classification to improve climate understanding : An application on the urban climate of Toulouse. *PLOS ONE*, 13(12), e0208138. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208138>
- Hidalgo, J., Masson, V., & Baehr, C. (2014). From daily climatic scenarios to hourly atmospheric forcing fields to force Soil-Vegetation-Atmosphere transfer models. *Frontiers in Environmental Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00040>
- IPCC, 2022, *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner HO. Roberts DC. Tignor M. Poloczanska ES. Mintenbeck K. Alegría A. Craig M. Langsdorf S. Lösschke S. Möller V. Okem A. Rama B.]. Cambridge University Press. In Press.
- Jiang, Y., Han, S., Shi, C., Gao, T., Zhen, H., & Liu, X. (2021). Evaluation of HRCLDAS and ERA5 Datasets for Near-Surface Wind over Hainan Island and South China Sea. *Atmosphere*, 12(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/atmos12060766>
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailles, J., Hilal, M., & Wavresky, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155>
- Jouglu, R., Hidalgo, J., & Pouponneau, B. (2019). Identification des situations météorologiques locales pour une cinquantaine de villes françaises. *La Météorologie*, 106, 59. <https://doi.org/10.4267/2042/70370>
- Jourdier, B. (2020). Evaluation of ERA5, MERRA-2, COSMO-REA6, NEWA and AROME to simulate wind power production over France. *Advances in Science and Research*, 17, 63-77. <https://doi.org/10.5194/asr-17-63-2020>
- Karl, T. R., Nicholls, N., & Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. In T. R. Karl, N. Nicholls, & A. Ghazi (Éds.), *Weather and Climate Extremes* (p. 3-7). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9265-9_2
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (2009). *Finding Groups in Data : An Introduction to Cluster Analysis*. John Wiley & Sons.
- Li, D., & Bou-Zeid, E. (2013). Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves : The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2051-2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Luber, G., & McGeehin, M. (2008). Climate Change and Extreme Heat Events. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5), 429-435. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.021>
- Montávez, J. P., Rodríguez, A., & Jiménez, J. I. (2000). A study of the Urban Heat Island of Granada. *International Journal of Climatology*, 20(8), 899-911. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000630\)20:8<899::AID-JOC433>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20:8<899::AID-JOC433>3.0.CO;2-I)

- Nogueira, M., Lima, D. C. A., & Soares, P. M. M. (2020). An integrated approach to project the future urban climate response : Changes to Lisbon's urban heat island and temperature extremes. *Urban Climate*, 34, 100683.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100683>
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)*, 7(8), 769-779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Poumadère, M., Mays, C., Le Mer, S., & Blong, R. (2005). The 2003 Heat Wave in France : Dangerous Climate Change Here and Now. *Risk Analysis*, 25(6), 1483-1494.
<https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00694.x>
- Räisänen, J. (2021). Effect of atmospheric circulation on surface air temperature trends in years 1979–2018. *Climate Dynamics*, 56(7), 2303-2320.
<https://doi.org/10.1007/s00382-020-05590-y>
- Rome, S., Bigot, S., Foissard, X., Madelin, M., Duche, S., & Fouvet, A.-C. (2020). Les deux épisodes caniculaires de l'été 2019 à Grenoble : Constat et perspective pour une gestion des extrêmes thermiques futurs. *Climatologie*, 17, 12.
<https://doi.org/10.1051/climat/202017012>
- Rome, S., Foissard, X., Bigot, S., Fouvet, A.-C., Rousset, E., Quesne, A., Lepeule, J., Bicout, D., & Dubus, N. (2022). *Enjeux et objectifs du projet CASSANDRE (CANicules, SANté et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois). Le changement climatique, les risques et l'adaptation*. Actes du 35ème colloque annuel de l'AIC. Toulouse, France.
- Sheridan, S. C., Lee, C. C., & Smith, E. T. (2020). A Comparison Between Station Observations and Reanalysis Data in the Identification of Extreme Temperature Events. *Geophysical Research Letters*, 47(15), e2020GL088120. <https://doi.org/10.1029/2020GL088120>
- Soubeyroux, J.-M., Ouzeau, G., Schneider, M., Cabanes, O., & Kounkou-Arnaud, R. (2016). Les vagues de chaleur en France : Analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur. *La Météorologie*, 2016(94), 45-51. <https://doi.org/10.4267/2042/60704>
- Stéphan, F., Ghiglione, S., Decailliot, F., Yakhou, L., Duvaldestin, P., & Legrand, P. (2005). Effect of excessive environmental heat on core temperature in critically ill patients. An observational study during the 2003 European heat wave. *British Journal of Anaesthesia*, 94(1), 39-45. <https://doi.org/10.1093/bja/ae9291>
- WHO. (2018). *Global Status Report on Alcohol and Health 2018*. World Health Organization.
- Yang, P., Ren, G., & Hou, W. (2019). Impact of daytime precipitation duration on urban heat island intensity over Beijing city. *Urban Climate*, 28, 100463.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100463>
- Zou, J., Lu, N., Jiang, H., Qin, J., Yao, L., Xin, Y., & Su, F. (2022). Performance of air temperature from ERA5-Land reanalysis in coastal urban agglomeration of Southeast China. *Science of The Total Environment*, 828, 154459.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154459>

Table des Figures

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques : en bleu, les stations de Grenoble Le Versoud et Grenoble-Saint-Geoires (Météo-France); en rouge, les stations Office de Tourisme (Ville de Grenoble) et Hôtel de Ville (Ville d'Echirolles); en jaune, le point au centre de la grille ERA5 (décrite en section 1.2.).	3
Figure 2 : Diagrammes de dispersion (a) de l'amplitude thermique, (b) des précipitations, (c) de la vitesse du vent (N=612) et (d) de l'humidité spécifique (N=381) pour la station météorologique du Versoud par rapport aux variables correspondantes de la grille ERA5. Chaque point représente un jour. La ligne indique la régression linéaire entre les variables observées à la station météorologique du Versoud et les variables correspondantes dans les données d'ERA5. Les mesures de l'humidité spécifique sont arrêtées à partir d'octobre 2021.	6
Figure 3 : Schéma synthétisant la méthodologie générale de l'étude.	7
Figure 4 : Rose des vents horaires pendant la période MJJAS 2019-2022 (N=14688) à partir des données (a) ERA5 et (b) Le Versoud.	8
Figure 5 : Distance entre la série originale et la série reconstruite pour chaque nombre de TTS testé.	9
Figure 6 : Relation entre le vent instantané à la température minimale et ΔT_n à (a) Grenoble (N=377) et (b) Echirolles (N=462).	11
Figure 7 : Relation entre ΔT_n et l'amplitude thermique, combiné avec le vent à (a) Grenoble (N=377) et (b) Echirolles (N=462).	12
Figure 8 : Répartition des 7 TTS à Grenoble et Echirolles; à gauche, répartition fréquentielle; à droite, déclinaison par saison.	14
Figure 9 : Distribution des TTS en fonction de leurs caractéristiques moyennes.	15
Figure 10 : Cycle journalier des paramètres du TTS 6 (a) et du TTS 7 (b). Le tracé en clair correspond à la moyenne et le panache est délimité par le minimum et le maximum d'un échantillon réduit aux 80 % les plus proches de la moyenne. La ligne noire en pointillés représente le cycle journalier du centroïde. Le printemps est en vert, l'été en violet et l'automne en marron; l'hiver n'est pas représenté car trop peu de journées lui sont associées.	17
Figure 11 : Comparaison de distribution des jours (a, b) par TTS à différentes intensités d'ICU, (c, d) avec différentes classes de T_x à chaque TTS, (e, f) à la nuit tropicale ($T_n > 20^\circ\text{C}$) et au-dessus des seuils biométéorologiques ($T_n \geq 19^\circ\text{C}$ et $T_x \geq 34^\circ\text{C}$) par TTS à Grenoble entre (a, c, e) la méthode adaptée (paramètres dT , RR_seuil , q , FF) et (b, d, f) méthode originale	15

(paramètres dT, RR, q, FF, DD) avec les données d'ERA5 (moins de 3 % sans étiquette). (Echirolles en annexe 6).20

Figure 12 : Résultats de l'attribution des nombres de jours pour TTS de mai à septembre sur deux périodes passées (1960-1980, 1981-2001) et comparaison des tendances avec la période de référence (2002-2022).21

Table des Tableaux

Tableau 1 : Données météorologiques horaires d'ERA5.....5

Tableau 2 : Nombre de jours sous la combinaison du seuil ΔT_n et du seuil de vitesse du vent et pourcentage de jours avec l'intensité d'ICU obtenue pour a) Grenoble et b) Echirolles. ...13

Tableau 3 : Valeurs moyennes des variables de la classification.15

Tableau 4 : Définition des TTS en fonction de leurs caractéristiques.16

Tableau 5 : Moyenne des températures maximales et minimales saisonnières pour chaque TTS de 2002 à 2022 (a) pour les données d'ERA5 et (b) les données du Versoud et (c) nombre de jours avec des T_x supérieures à 35°C, 30°C et 25°C, des T_n supérieures à 20°C et des T_x supérieures ou égales à 34°C et T_n supérieures ou égales à 19°C pour chaque type de TTS à partir des données du Versoud (sachant que les seuils biométéorologiques pour l'Isère sont $T_n \geq 19^\circ\text{C}$ et $T_x \geq 34^\circ\text{C}$).18

Tableau 6 : Comparaison des valeurs moyennes et médianes des variables d'entrée et de température pour la période de mai à septembre par rapport aux deux dernières périodes (1960-1980, 1981-2001) et à la période de référence (2002-2022).22

Table des Annexes

Annexe 1 : Fiche de synthèse en anglais pour la classification par Types de Temps Sensibles pour Grenoble. (17 pages au total).....32

Annexe 2 : Corrélation des variables entre les données d'ERA5, d'ERA5-land et du Versoud en utilisant la méthode de Spearman. (L'histogramme présent sur le graphique représente la distribution de chaque variable. Les points de données sur le graphique représentent les paires de valeurs des données analysées. L'indice varie de -1 à 1, où -1 indique une corrélation négative parfaite, 1 indique une corrélation positive parfaite, et 0 indique une absence de corrélation linéaire. Les trois étoiles indiquent qu'une p-value est inférieure à 0.001. * ~ 0.05, ** ~ 0.01).....49

Annexe 3 : Diagrammes de dispersion (a) de la température maximale et (b) de la température minimale (N=612) pour la station météorologique du Versoud par rapport aux variables correspondantes de la grille ERA5. Chaque point représente un jour. La ligne indique la régression linéaire entre les variables observées par la station météorologique du Versoud et les variables correspondantes dans les données d'ERA5.....49

Annexe 4 : Rose des vents horaires pendant la période MJJAS 2019-2022 à partir des données de la station de Grenoble-Saint-Geoirs. (Source : <https://mesonet.agron.iastate.edu/>).....50

Annexe 5 : Tableau des résultats des tests pour différents paramètres d'entrée. La première colonne est des tableaux des paramètres du centroïde pour chaque TTS. La deuxième colonne est des figures de la distribution de fréquence des TTS pour chaque saison. La troisième colonne est des tableaux du pourcentage de chaque type de TTS à différents ΔT_n et T_x50

Annexe 6 : Comparaison de distribution des jours (a, b) par TTS à différentes intensités d'ICU, (c, d) avec différentes classes de T_x à chaque TTS, (e, f) à la nuit tropicale ($T_n > 20^\circ\text{C}$) et au-dessus des seuils biométéorologiques ($T_n \geq 19^\circ\text{C}$ et $T_x \geq 34^\circ\text{C}$) par TTS à Echirolles entre (a, c, e) la méthode adaptée (paramètres dT, RR_seuil, q, FF) et (b, d, f) méthode originale (paramètres dT, RR, q, FF, DD) avec les données d'ERA5 (moins de 3 % sans étiquette).51

Table des matières

Résumé	i
Remerciements.....	ii
Sommaire.....	iii
Sigles et acronymes	iv
Contexte et objectif du stage	1
Introduction	2
1. Zone d'étude, données et méthodes.....	3
1.1. Zone d'étude.....	3
1.2. Investigation des données météorologiques disponibles à Grenoble.....	4
1.2.1. Données nécessaires à l'application de la méthode	4
1.2.2. Données atmosphériques disponibles	4

1.2.3. Données de réanalyse utilisées.....	4
1.2.4. Evaluation de la qualité des données d'ERA5 à partir des données de la station du Versoud	5
1.3. Méthodes.....	7
1.3.1. Méthode adaptée de la classification de Types de Temps Sensibles (TTS)	8
1.3.2. Définition de l'intensité de l'ICU	10
2. Résultats.....	14
2.1. Résultats de la classification des TTS.....	14
2.2. Détails des TTS estivaux typiques.....	16
2.3. Relation entre les TTS et la présence des ICU et des journées chaudes.....	17
3. Discussion.....	19
3.1. Interprétation des liens entre l'occurrence des ICU et des journées chaudes et les variables sélectionnées.....	19
3.2. TTS dans les attributions passées.....	21
3.3. Limites et utilisation.....	22
Conclusion.....	23
Perspective et synthèse du stage	23
Références bibliographiques	25
Table des Figures.....	28
Table des Tableaux.....	29
Table des Annexes.....	29
Annexes.....	32

Annexes

Annexe 1 : Fiche de synthèse en anglais pour la classification par Types de Temps Sensibles pour Grenoble. (17 pages au total).

Summary sheet for classification by Local Weather Types for GRENOBLE

June 21, 2023

Abstract

This summary sheet, produced as part of the research project CASSANDRE (CAnicules, SAnité et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois), is based on the classification work in the ANR-MAPUCE research project and has been adapted specifically for Grenoble. It was completed by Yingting Wang, a master 2 intern at the IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement), under the supervision of Sandra Rome (manager of the CASSANDRE project), Sylvain Bigot and Xavier Foissard (supervisors), and Julia Hidalgo (co-supervisor and manager of the MAPUCE project).

Contents

1	Geographical and physical context	2
2	Description of Re-analysis data for applications	3
3	Method adapted from the classification by Local Weather Types	4
4	General description of the Local Weather Types (LWTs)	5
5	Details of the LWTs	7
5.1	LWTs associated with no precipitation	7
5.2	LWTs associated with precipitation	10
5.3	LWTs associated with intense precipitation	13
6	Additional information concerning the LWTs	14



1 Geographical and physical context

Grenoble is located in the southeast of France. The city is situated in the Alps, between the Vercors, Belledonne, and Chartreuse massifs. The terrain surrounding Grenoble is mountainous, and the city itself is built along the Isère and Drac rivers.

In the Météo France weather network, Grenoble has two stations, Grenoble-Saint-Geoirs and Le Versoud, with at least 20 years of data available for analysis. The Grenoble-Saint-Geoirs station has been in operation since 1940 but is located 48 km away from Grenoble. The Versoud station, which is situated in a rural area near Grenoble, is the most suitable for classification purposes. However, it will no longer provide data on humidity, a variable required for classification, from October 2021.

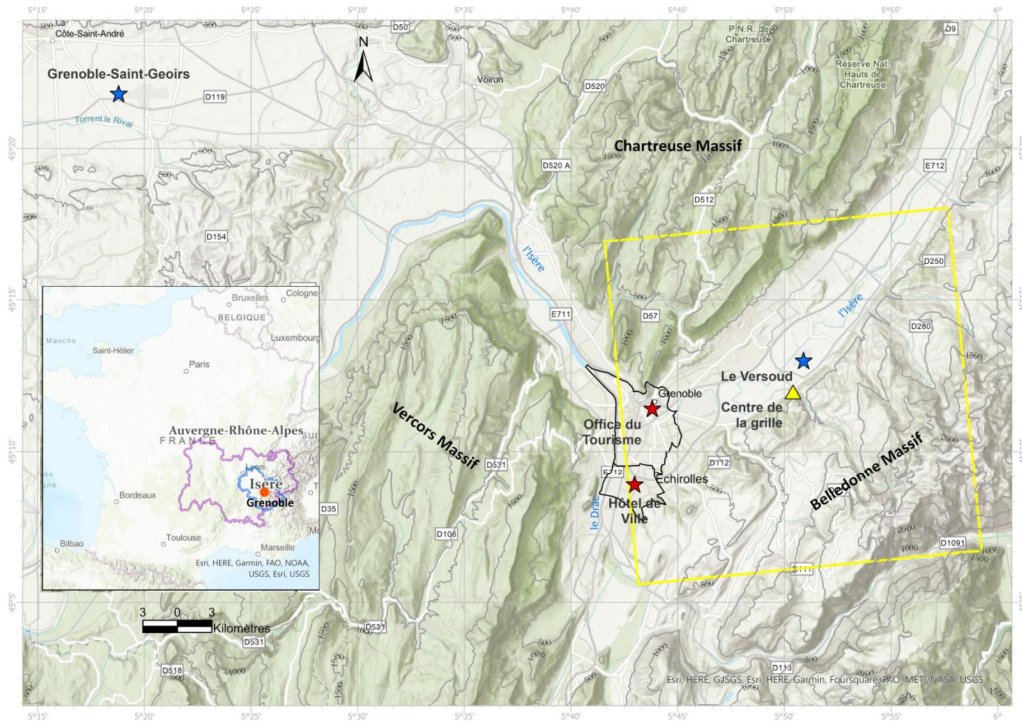


Figure 1: Location of the study area and weather stations in blue at Le Versoud (Météo-France) and Grenoble-Saint-Geoirs (Météo-France); stations in red at the Tourist Office (Grenoble) and the Town Hall (Echirolles); the centre point of the ERA5 grid in yellow.(2010).

2 Description of Re-analysis data for applications

ERA5 is a climate reanalysis dataset collected by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and is available for download from the Climate Data Store (CDS). The data is provided on regular latitude and longitude grids with a resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (approximately 30 km) and at an hourly temporal resolution. ERA5 represents a significant improvement over previous generations of reanalyses and is widely used in Europe and around the world.

When extracting ERA5 data, it is necessary to specify the desired time period and geographical area. A minimum of 10 years of data is typically recommended. In this case, the chosen grid (Figure 1) covers the area around the Versoud station from 2002 to 2022. The extracted data is usually available in GRIB format, with the grid center located at $45^\circ 12' N$ and $5^\circ 50' E$.

Scatterplots of the four variables, displaying data from ERA5 and the Versoud station, are presented, along with their coefficients of determination and root mean square error (RMSE). The coefficient of determination between thermal amplitude and specific humidity is high, exceeding 0.85. However, the coefficient of determination for precipitation is average, around 0.5, and for wind speed, it is low, approximately 0.39. Since the biases in the reanalysis data are acknowledged, these four variables can be utilized as input variables for the method.

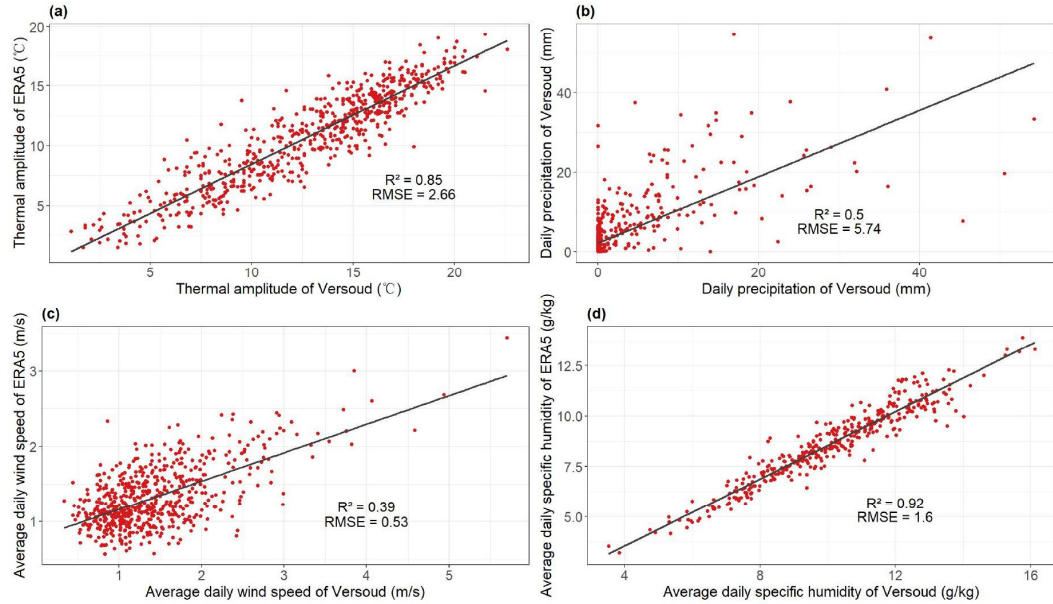


Figure 2: Scatter plots of (a) thermal amplitude, (b) precipitation, (c) wind speed (N=612), and (d) specific humidity (N=381) are shown, comparing the variables observed at the Versoud weather station with the corresponding variables in the ERA5 grid. Each point represents data from one day. The line represents the linear regression between the observed variables at the Versoud weather station and the corresponding variables in the ERA5 data. It is important to note that specific humidity measurements are discontinued from October 2021.

The particular conditions of Grenoble’s geographical location, surrounded by mountains on three sides, add to the difficulty of measuring wind direction. As shown in Figure 3, ERA5 is compared with the hourly wind direction from the Versoud reference station and shows major differences. The wind directions expressed in the ERA5 data are mainly north-north-west and south-east, whereas the main sources of wind direction measured at the Versoud station are north-north-east and north-east. They were identified as different quadrants according to the four quadrants of wind direction in the original method.

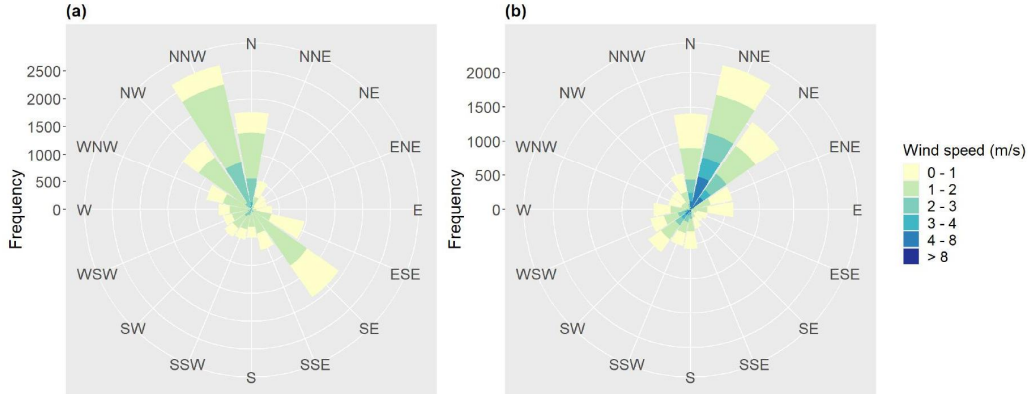


Figure 3: Hourly wind rose for the period MJJAS 2019-2022 (N=14688) based on data from (a) ERA5 and (b) Le Versoud.

3 Method adapted from the classification by Local Weather Types

The unique geographical conditions of Grenoble, with mountains surrounding it on three sides, present challenges in accurately measuring wind direction. Figure 3 illustrates the comparison between ERA5 data and hourly wind direction data from the Versoud reference station, highlighting significant differences. In the ERA5 data, the predominant wind directions are mainly north-northwest and south-east. However, the primary wind directions observed at the Versoud station are north-northeast and northeast. These differences have been identified as distinct quadrants based on the four-quadrant classification of wind direction in the original method.

The original five variables were modified to four variables: wind direction was removed. Precipitation was transformed from numerical to categorical data and divided into three categories. The four final modified variables were used as input parameters : the daily temperature variation (dT in $^{\circ}C$) and specific humidity (q in $kg\ kg^{-1}$), the daily average precipitation (RR in three groups: 0-1 mm; 1-15 mm; 15 mm) and wind speed (FF in $m\ s^{-1}$).

4 General description of the Local Weather Types (LWTs)

The iterative study using the PAM statistical method of classification leads to an optimal classification of 7 LWTs to describe the local climate of Grenoble.

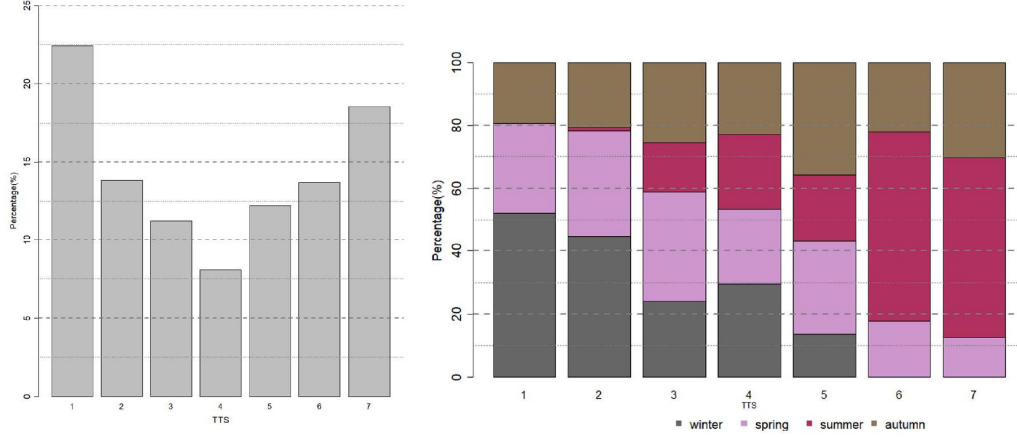


Figure 4: Frequency distribution of the local weather types (LWTs) (left). Variation by season of the LWTs with autumn in brown, summer in magenta, spring in pink, and winter in gray (right).

LWT	ΔT	RR	q	FF	date	freq
1	10.88	0.14	3.28	1.01	2011-12-09	22.43
2	5.60	14.93	4.23	1.12	2021-02-07	13.85
3	6.47	7.47	5.43	1.86	2006-04-15	11.23
4	5.70	38.05	5.48	1.33	2018-01-04	8.07
5	8.70	0.01	5.73	1.68	2018-11-05	12.22
6	9.36	1.13	9.36	1.10	2004-08-30	13.68
7	13.50	0.27	8.72	1.13	2015-06-02	18.54

Table 1: Values of the five classification variables for the centroid day: ΔT indicates the daily temperature variation [$^{\circ}\text{C}$], RR indicates the daily average precipitation [mm], q indicates the specific humidity [g kg^{-1}], and FF indicates the wind speed [m s^{-1}]. The date corresponds to the centroid day, and freq indicates the frequency of allocation of the days to each local weather type (LWT).

The distribution of data based on LWTs exhibits heterogeneity. LWT 1 is slightly more represented than the others, accounting for just under 22.5% of the dataset, while LWT 4 is the least represented, comprising just over 8% of the dataset. During summer, LWTs 6 and 7 are the most prevalent, representing over 50% of the days in this season. Conversely, LWTs 1 and 2 are the most representative of winter. It is worth noting that certain LWTs are either not represented or have very few instances during specific seasons. For example, LWTs 1 and 2 have few or no occurrences in summer, while LWTs 6 and 7 have no occurrences in winter.

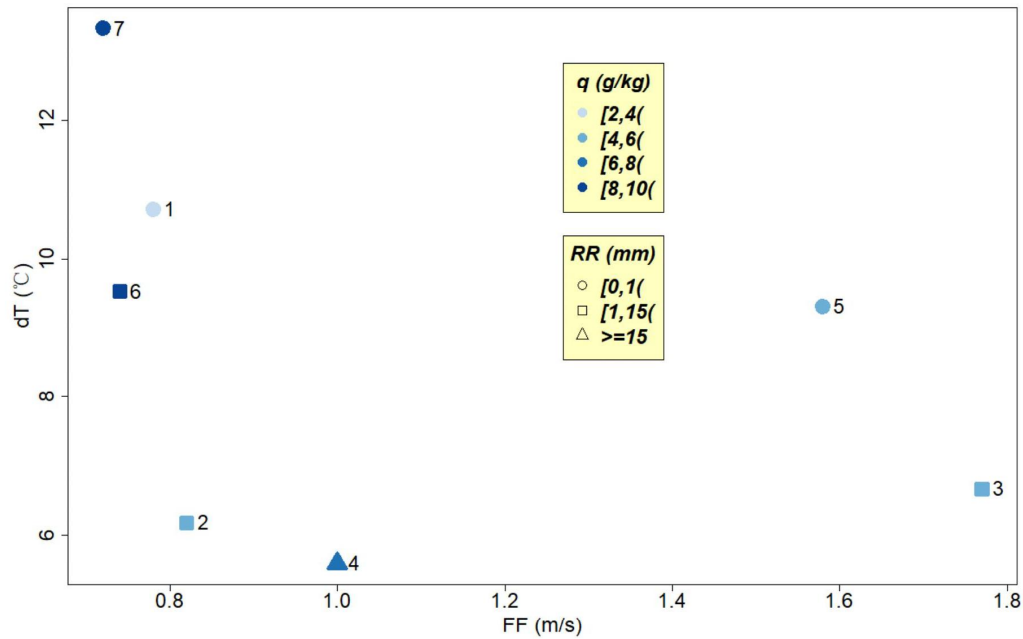


Figure 5: Distribution of LWTs according to their mean characteristics.

A representation of the distribution of the LWTs as a function of their average characteristics of thermal range, wind speed and direction, and average precipitation (Figure 4) allows us to distinguish the large LWT classes. Here, the classes are formed not to reduce the number of LWTs but to facilitate their communication and appropriation by grouping them according to certain characteristics that may be common to them. For Grenoble, three classes are proposed:

- LWTs associated with no precipitation(1, 5 and 7);
- LWTs associated with precipitation(2, 3 and 6);
- LWTs associated with intense precipitation(4).

5 Details of the LWTs

5.1 LWTs associated with no precipitation

- LWT 5

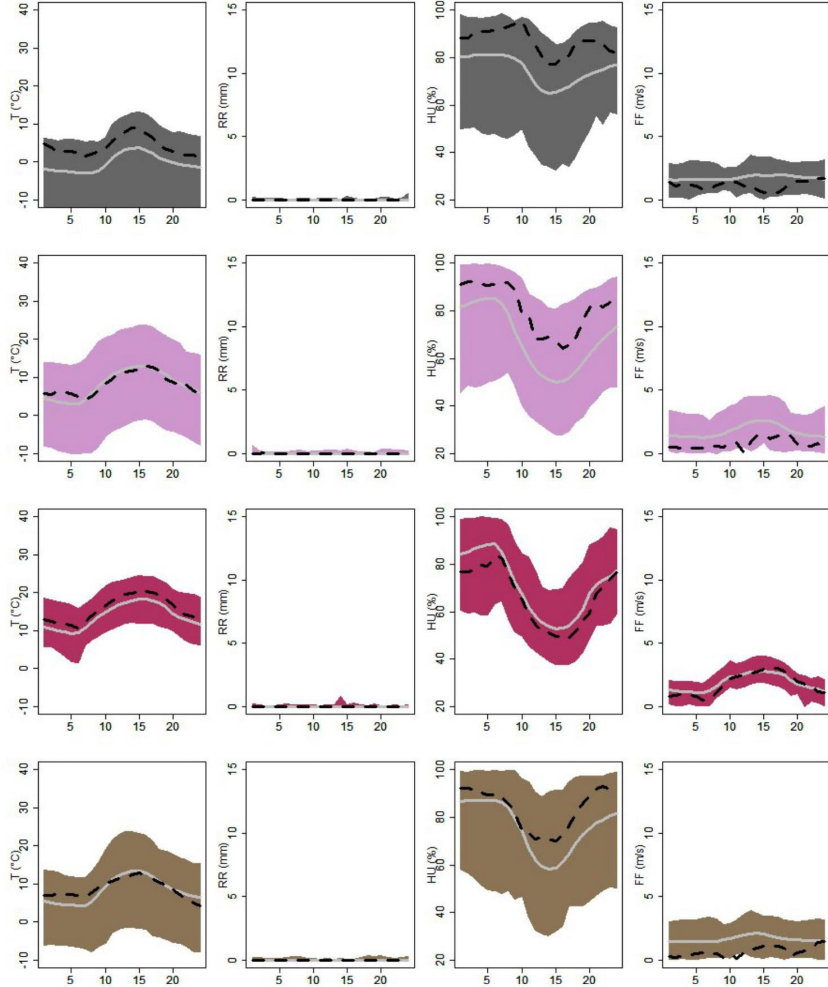


Figure 6: Daily cycle of the LWT 5 parameters: T indicates the temperature; RR indicates the precipitation; HU indicates the relative humidity; and FF indicates the wind speed. The light solid lines in the left panels correspond to the mean, the dark dashed lines to the centroid, and the distributions are delimited by the minimum and maximum values of the sample reduced to 80% of the LWT days closest to the mean. Winter is shown in gray, spring in pink, summer in magenta, and autumn in brown. When a season is not represented is because too few days are associated with it.

Local Weather Type 5 is associated with almost 12.5% of the classification's days. This weather type is represented in all seasons: 15% in winter, 30% in spring, 20% in summer, and 35% in autumn. The average daily temperature range is less than 10°C. In terms of temperature, the days associated with this LWT are mild, with maximum temperatures reaching up to 25°C in summer. No precipitation is recorded for this weather type. The average cycles of relative humidity are dry. The wind speed is strong for this LWT in summer, with a daily average exceeding 3 m s^{-1} .

- LWT 1

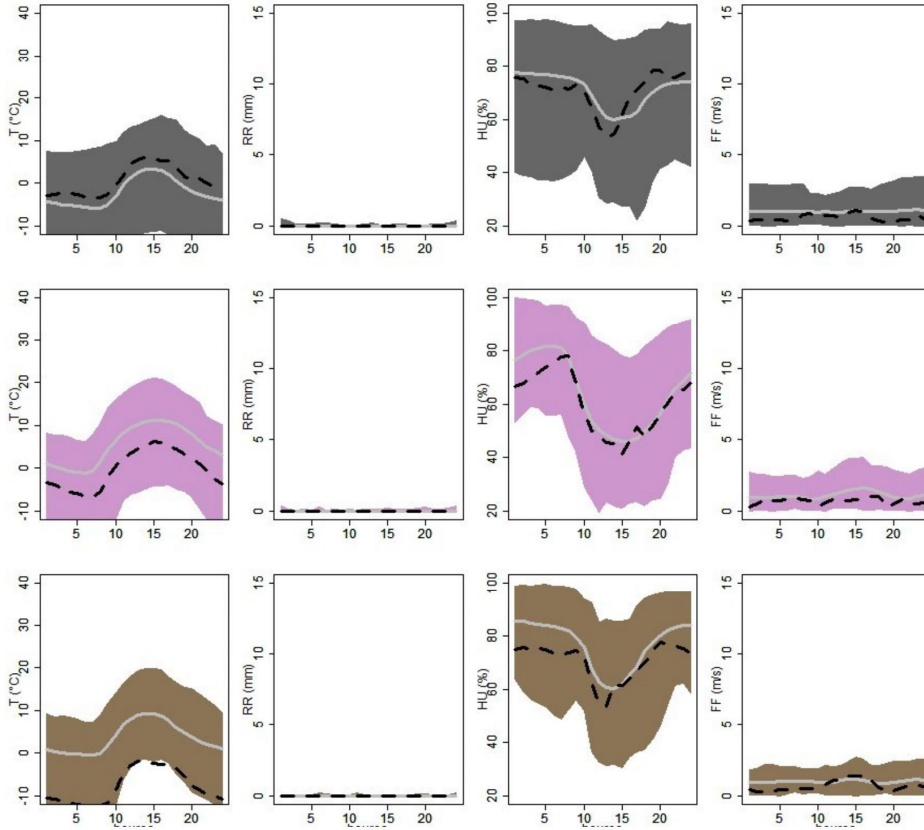


Figure 7: Daily cycles of the LWT 1 parameters. Plots as in Figure 5. Here, summer is not represented because too few days are associated with it.

Local Weather Type 1 is the most frequent weather type, accounting for approximately 22.5% of the total number of days in the dataset. Its distribution is as follows: 50% in winter, 30% in spring, and 20% in autumn. The percentage for summer is too low to be statistically significant and is therefore not included. LWT 1 exhibits a notable temperature profile, with a strong thermal range averaging nearly 10°C. Frosts are prevalent during spring and winter, and slightly less frequent during autumn. LWT 1 days are associated with minimal precipitation, while the relative humidity levels remain within the normal range. The wind speed is generally calm or low, but there is typically some afternoon wind.

- LWT 7

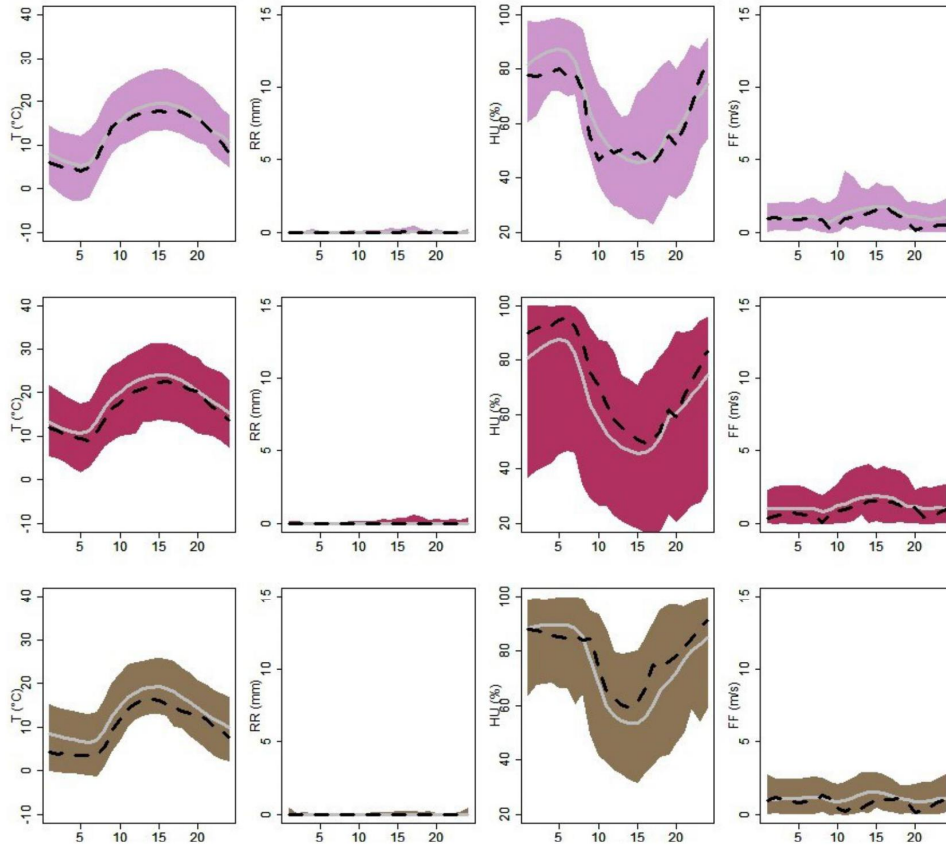


Figure 8: Daily cycles of the LWT 7 parameters. Plots as in Figure 5. Here, winter is not represented because too few days are associated with it.

Approximately 18% of the days in the dataset are attributed to Local Weather Type 7. The distribution of days associated with this LWT is nearly 15% in spring, 50% in summer, and just over 25% in autumn. The number of days in winter is very low, making it unrepresentative. LWT 7 represents the most summery weather type in Grenoble. It exhibits an average daily temperature range of almost 13.5°C , which is the highest among the defined LWTs for Grenoble. The average summer cycle exceeds 20°C in the afternoon, with maximum temperatures exceeding 30°C in summer, 25°C in spring, and 25°C in autumn (adjusted for the generally low and biased temperatures in ERA5, they should actually be 5°C higher). Precipitation is absent, and the average cycle of relative humidity is very dry. Wind speeds are generally low and consistent, with an average wind cycle of approximately 1 m s^{-1} .

5.2 LWTs associated with precipitation

- LWT 2

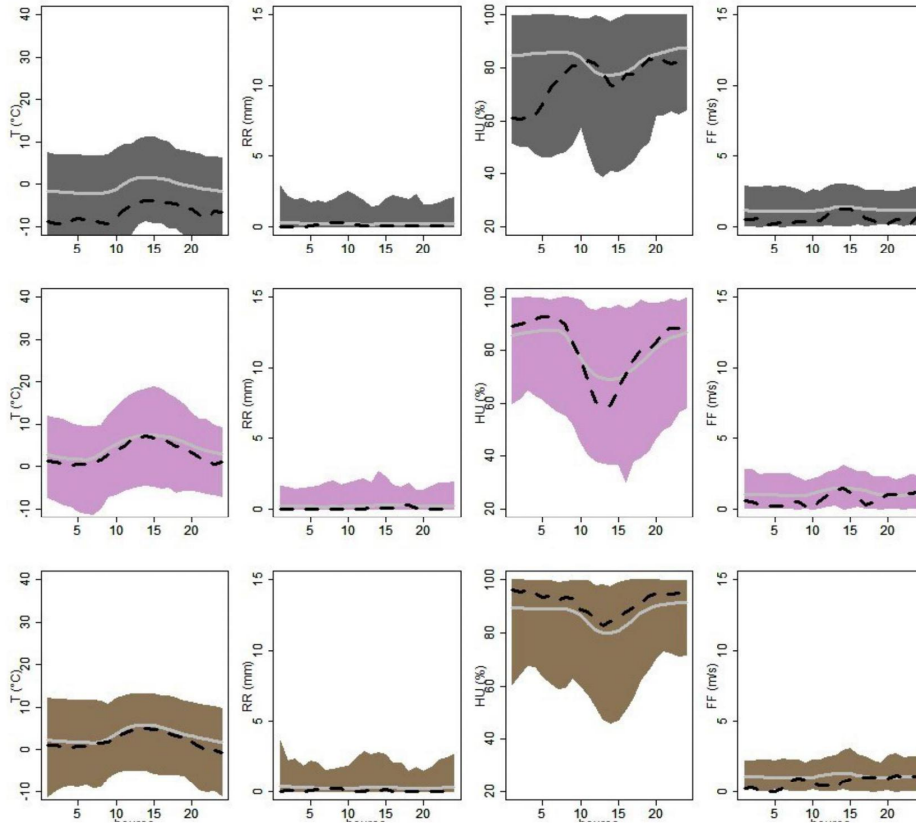


Figure 9: Daily cycles of the LWT 2 parameters. Plots as in Figure 5. Here, summer is not represented because too few days are associated with it.

Local Weather Type 2 represents 14% of the base dataset and is distributed as follows: 45% in winter, 35% in spring, and just under 20% in autumn. The daily amplitude of the average temperature cycle for this LWT is low, around 6°C. The associated days with LWT 2 are generally cool. Winter experiences a higher frequency of frosts, followed by slightly fewer occurrences in the other two seasons. Precipitation is possible throughout the day. The relative humidity values do not exhibit any notable patterns. On average, the wind speed shows minimal variation throughout the day, averaging around 1 m s⁻¹.

- LWT 3

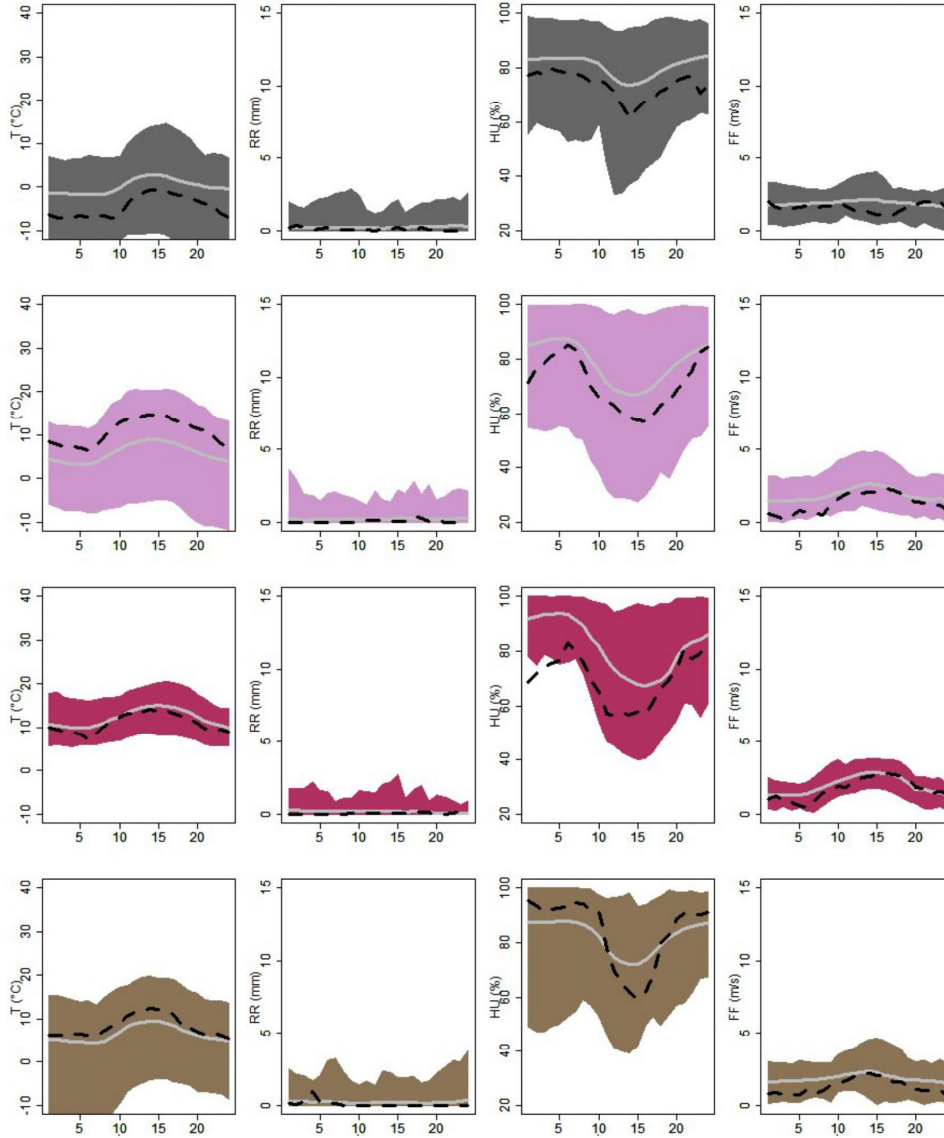


Figure 10: Daily cycles of the LWT 3 parameters. Plots as in Figure 5.

Local weather type 3 is associated with 11% of the days in the base dataset. The seasonal distribution is 25% in winter, 35% in spring, 15% in summer, and 25% in autumn. The daily temperature range is not very pronounced. The days are cool. In winter, it is possible that temperatures do not exceed 0°C ; in spring and autumn, there is always the possibility of nighttime frosts. Finally, in summer, temperatures remain low, and the maximum temperatures hardly exceed 20°C . Precipitations are regular, sometimes very intense, exceeding 3 mm h^{-1} . The wind speed is higher than the other LWT, especially in the afternoon, where it can reach 4 to 5 m s^{-1} . The wind can be highly variable, with an average around 0 m s^{-1} in the morning and increasing to around 4 m s^{-1} in the afternoon.

- LWT 6

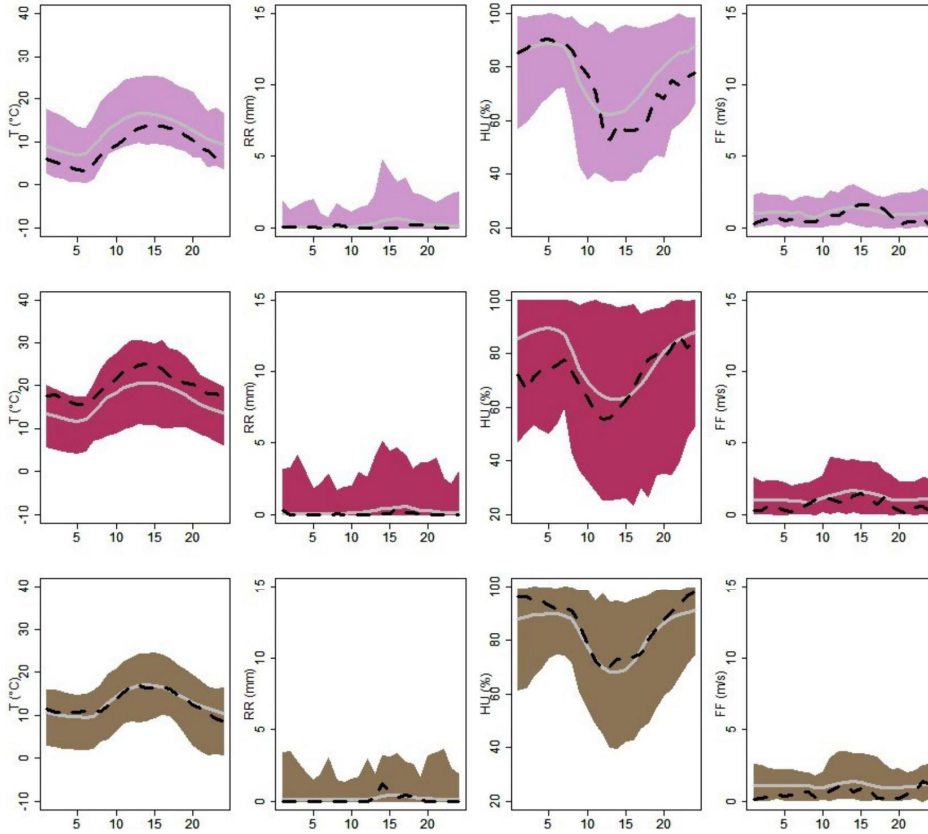


Figure 11: Daily cycles of the LWT 6 parameters. Plots as in Figure 5. Here, winter is not represented because too few days are associated with it.

Local Weather Type 6 is associated with almost 14% of the days in the classification. This LWT is distributed as slightly less than 20% in spring, 60% in summer, and less than 20% in autumn. No winter days are associated with LWT 6. The average daily temperature range is 10°C. In terms of temperature, the days associated with LWT 6 are mild to warm. Maximum temperatures reach 30°C in summer. Precipitation is positive on average. The average seasonal cycles of relative humidity have an amplitude of about 20 or 30% and are centered around 70%. The wind is weak for this LWT.

5.3 LWTs associated with intense precipitation

- LWT 4

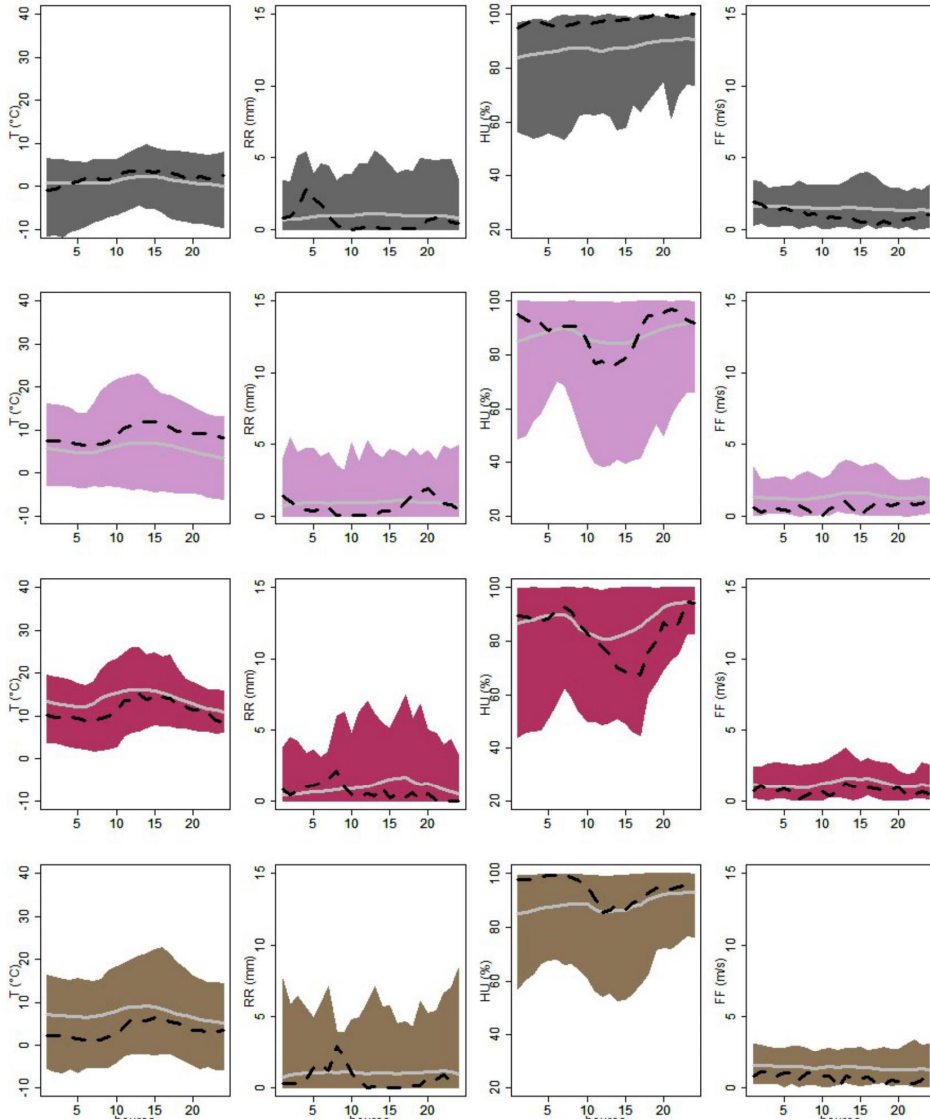


Figure 12: Daily cycles of the LWT 4 parameters. Plots as in Figure 5.

Local Weather Type 4 represents the smallest portion of the dataset, comprising 8% of the total. The distribution of this LWT across the four seasons is relatively even, with 30% occurring in winter, 25% in spring, 21% in summer, and 24% in autumn. The daily temperature range for LWT 4 is low, around 6°C. Daytime temperatures are not very hot, with an average temperature of less than 10°C. Precipitation is strong and can occur throughout the day. The relative humidity cycle indicates a humid atmosphere. The wind is never calm but also not particularly strong, averaging around 1.5 m s^{-1} .

6 Additional information concerning the LWTs

This section only provides a partial overview of the available post-classification elements. Additional information and characteristics of the weather types, as explained in the introductory sheet, are available upon request. Here, we present the average values for each LWT based on the entire dataset (Table 2), as well as a breakdown by season (Table 3). Unlike the centroid days presented in Section 4, which correspond to specific values, Tables 2 and 3 represent averages taken over all days associated with a specific LWT and within a given season. These tables should be correlated with Figure 6-12, where the values in the tables correspond to the daily averages represented by the bold solid line in the plots. Additionally, Tables 4, 5, and 6 provide the distribution of the 7 LWTs for each day, covering the 21-year period of the classification.

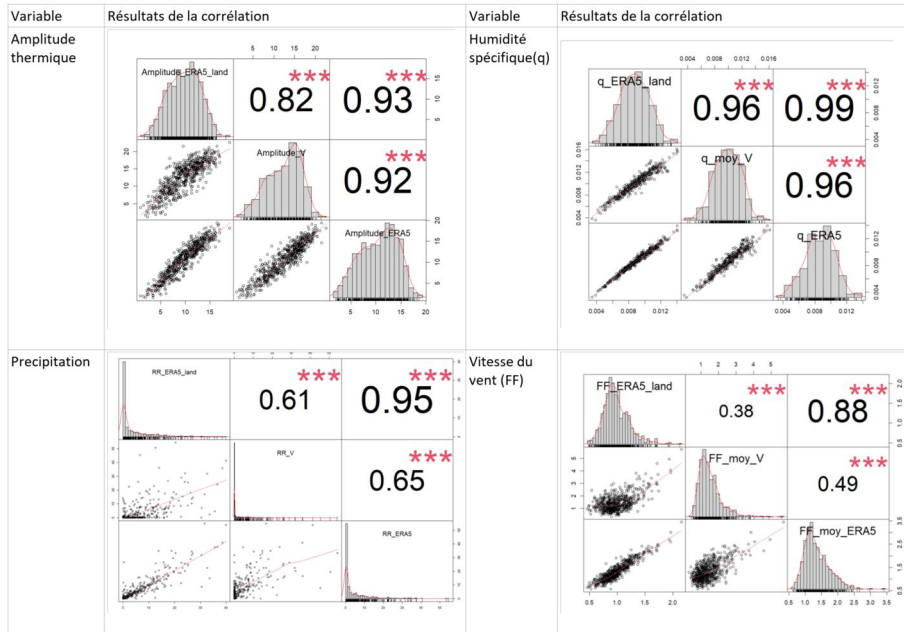
LWT	ΔT	RR	q	FF	freq
1	10.71	0.12	3.33	0.78	22.43
2	6.17	5.84	4.32	0.82	13.85
3	6.66	5.68	5.41	1.77	11.23
4	5.59	23.28	6.47	1	8.07
5	9.31	0.25	5.72	1.58	12.22
6	9.53	5.5	9.36	0.74	13.68
7	13.34	0.18	8.6	0.72	18.54

Table 2: Average values of the five classification variables calculated throughout the days associated with a particular LWT for all data. Variables are as defined in Table 1.

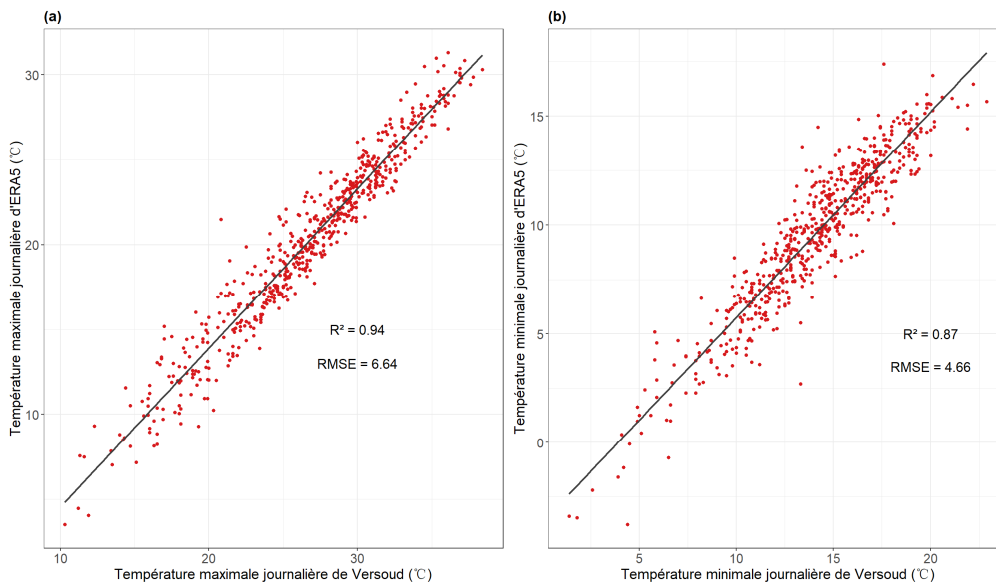
Winter							Spring						
LWT	ΔT	RR	q	FF	freq		LWT	ΔT	RR	q	FF	freq	
1	9.74	0.12	2.66	0.87	52.27		1	12.64	0.14	3.95	0.63	28.37	
2	5.63	5.63	3.54	0.9	44.92		2	6.91	5.7	4.88	0.74	33.33	
3	6.46	6.14	3.62	1.78	24.16		3	7.22	5.75	5.21	1.72	34.73	
4	4.6	22.81	4.21	1.09	29.4		4	5.54	22.43	5.81	1	24.07	
5	7.37	0.27	3.34	1.68	13.66		5	10.27	0.3	5.11	1.57	29.46	
6	10.1	3.75	6.2	1.01	0.1		6	10.12	5.79	7.71	0.64	17.73	
7	-	-	-	-	0		7	14.37	0.22	6.95	0.63	12.66	

Summer							Autumn						
LWT	ΔT	RR	q	FF	freq		LWT	ΔT	RR	q	FF	freq	
	11.57	0.06	5.86	0.74	0.12		1	10.48	0.08	4.24	0.73	19.24	
2	5.19	7.69	7.3	0.83	1.13		2	6.2	6.43	4.96	0.8	20.62	
3	6.18	4.8	7.96	1.88	15.56		3	6.39	5.69	5.81	1.77	25.55	
4	6.73	23.03	9.74	0.85	23.59		4	5.72	25.04	6.68	1.02	22.94	
5	9.23	0.27	7.82	1.8	21.24		5	9.3	0.2	5.88	1.44	35.65	
6	9.7	5.61	10.12	0.78	59.96		6	8.6	5	8.64	0.74	22.21	
7	13.47	0.19	9.41	0.79	56.96		7	12.65	0.13	7.76	0.62	30.38	

Table 3: Average seasonal values throughout the days associated with a LWT and a season showing the five classification variables. Variables are as defined in Table 1.



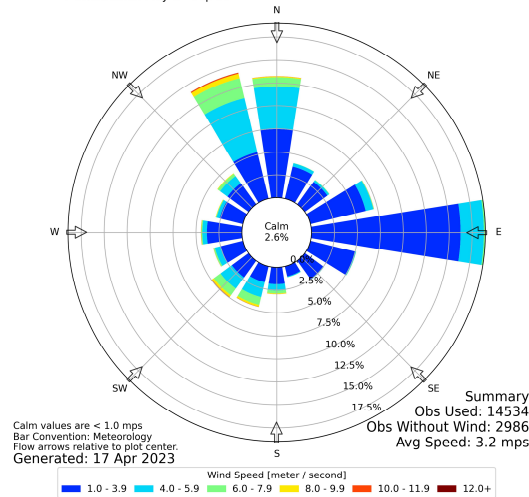
Annexe 2 : Corrélation des variables entre les données d'ERA5, d'ERA5-land et du Versoud en utilisant la méthode de Spearman. (L'histogramme présent sur le graphique représente la distribution de chaque variable. Les points de données sur le graphique représentent les paires de valeurs des données analysées. L'indice varie de -1 à 1, où -1 indique une corrélation négative parfaite, 1 indique une corrélation positive parfaite, et 0 indique une absence de corrélation linéaire. Les trois étoiles indiquent qu'une p-value est inférieure à 0.001. * ~ 0.05, ** ~ 0.01).



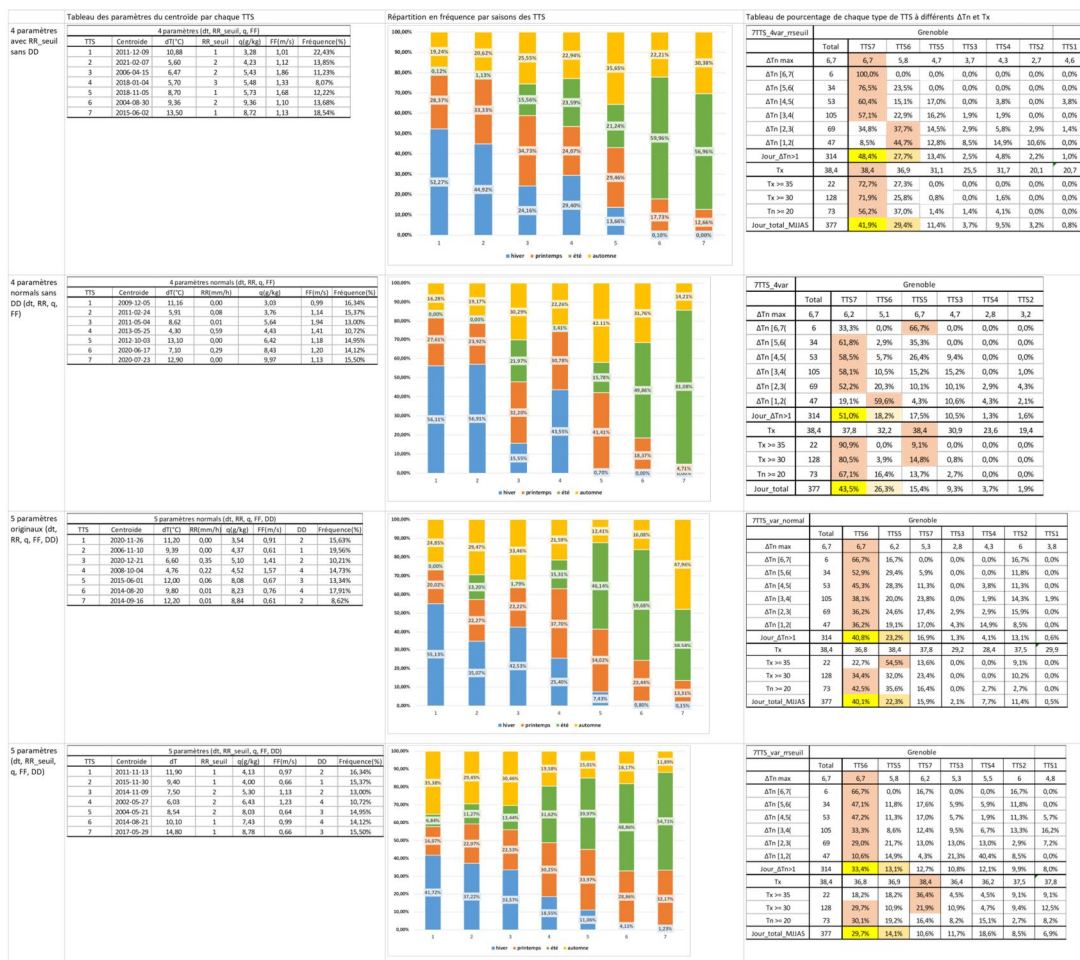
Annexe 3 : Diagrammes de dispersion (a) de la température maximale et (b) de la température minimale (N=612) pour la station météorologique du Versoud par rapport aux variables correspondantes de la grille ERA5. Chaque point représente un jour. La ligne indique la régression linéaire entre les variables observées par la station météorologique du Versoud et les variables correspondantes dans les données d'ERA5.



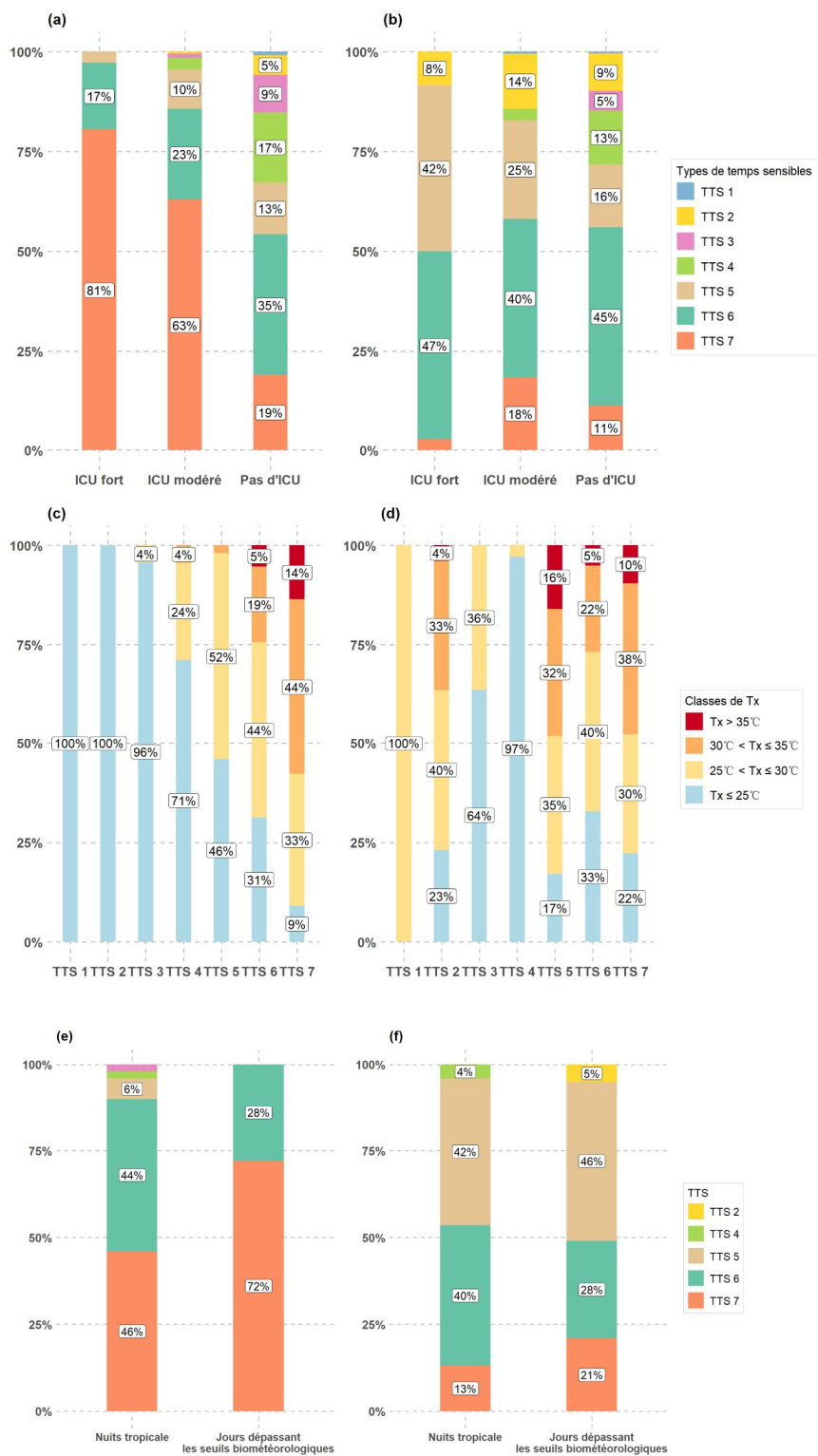
Windrose Plot for [LFLS] Grenoble
 Obs Between: 01 May 2019 01:00 AM - 29 Sep 2022 11:00 PM Europe/Paris
 Constraints: May 1 - Sep 30



Annexe 4 : Rose des vents horaires pendant la période MJJAS 2019-2022 à partir des données de la station de Grenoble-Saint-Geoirs. (Source : <https://mesonet.agron.iastate.edu/>).



Annexe 5 : Tableau des résultats des tests pour différents paramètres d'entrée. La première colonne est des tableaux des paramètres du centroïde pour chaque TTS. La deuxième colonne est des figures de la distribution de fréquence des TTS pour chaque saison. La troisième colonne est des tableaux du pourcentage de chaque type de TTS à différents ΔTn et Tx.



Annexe 6 : Comparaison de distribution des jours (a, b) par TTS à différentes intensités d'ICU, (c, d) avec différentes classes de Tx à chaque TTS, (e, f) à la nuit tropicale ($T_n > 20^\circ\text{C}$) et au-dessus des seuils biométéorologiques ($T_n \geq 19^\circ\text{C}$ et $T_x \geq 34^\circ\text{C}$) par TTS à Echirrolles entre (a, c, e) la méthode adaptée (paramètres dT, RR_seuil, q, FF) et (b, d, f) méthode originale (paramètres dT, RR, q, FF, DD) avec les données d'ERA5 (moins de 3 % sans étiquette).