

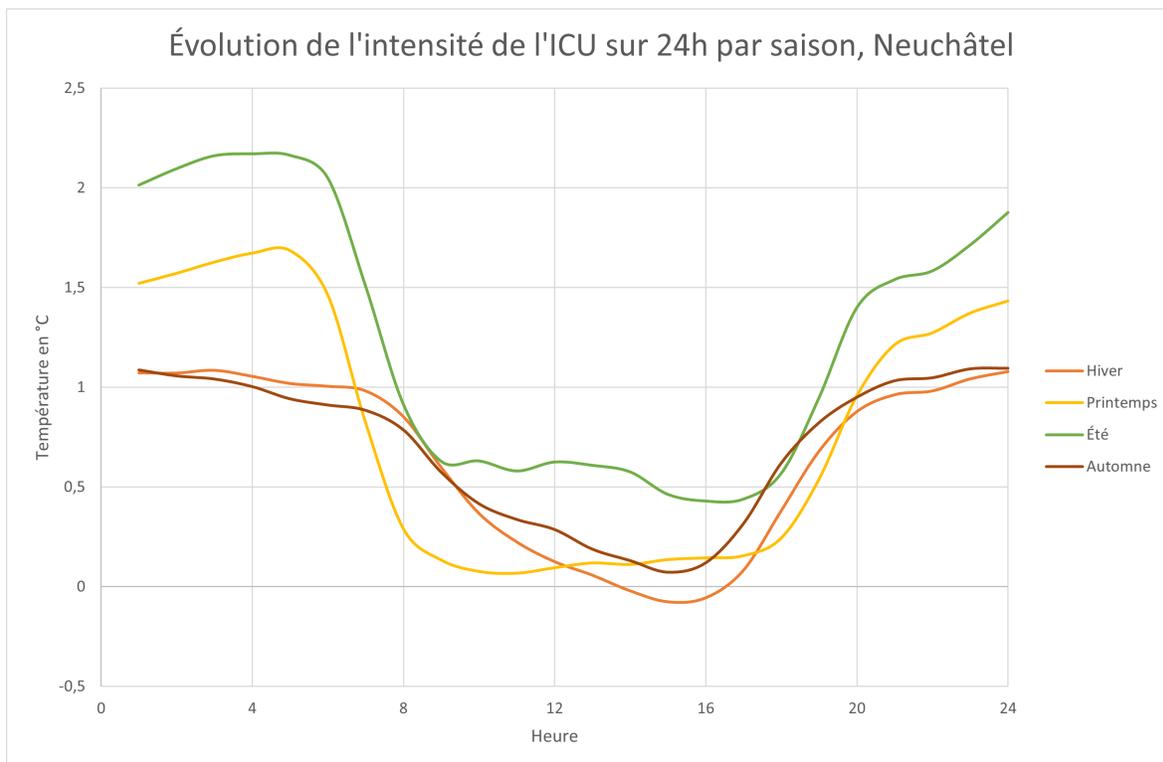
## Master en fondements et pratiques de la durabilité

Étude des îlots de chaleur urbains dans 4 petites et moyennes villes de Suisse romande (Delémont, Porrentruy, La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel)

Loïc Pianaro

Sous la direction du Dr Jean-Michel Fallot, MER

Sous l'expertise de la Dre Judith Eeckman



Ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication, d'une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce travail n'en est pas moins soumis aux règles sur le droit d'auteur. A ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur.e sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur est en outre applicable.

### **Illustration de couverture**

Moyenne de l'évolution de l'intensité de l'ICU sur 24h par saison, période 2013-2019, Neuchâtel



## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, à la rédaction de ce mémoire. Que ce soit par la contribution de données, des réponses à mes questions ou des relectures, chaque geste était nécessaire afin de terminer l'écriture de ce travail.

Je voudrais remercier en premier lieu mon directeur de mémoire, le Dr Jean-Michel Fallot pour ses conseils précieux et l'aide apportée durant la rédaction de ce travail. Je remercie également la Dre Judith Eeckman, qui a aimablement acceptée d'être mon experte pour la défense de ce mémoire.

Je remercie également le Service de l'énergie et de l'environnement du canton de Neuchâtel et l'Office de l'environnement du canton du Jura qui ont aimablement mis leurs données à ma disposition afin de réaliser ce mémoire. Je remercie également Météo Suisse qui m'a donné accès à leur base de données.

Je tiens à remercier très profondément Sophie Desbiolles. Ton soutien sans faille et ton aide m'ont été précieux afin d'arriver au bout de ce travail.

Je remercie également mes parents pour leur aide durant cette période troublée qu'est celle du Covid. Merci maman pour ta relecture très précieuse.

Enfin, je remercie mes amis, qui étaient dans la même situation et qui ont permis d'avancer ensemble.



## Résumé

Les villes favorisent un réchauffement des températures par rapport aux régions rurales environnantes pour diverses raisons. Les îlots de chaleur urbains (ICU) peuvent accentuer l'inconfort thermique des habitants lors de vagues de chaleur en été qui tendent à devenir de plus en plus fréquentes et intenses en lien avec le réchauffement climatique. En Suisse, d'après une étude de Météo Suisse dans les 5 grandes villes du pays (Genève, Lausanne, Berne, Zürich et Bâle), il est possible de mesurer des températures pouvant être jusqu'à 7°C plus élevées entre la ville et la périphérie rurale. Ce travail a pour but d'analyser le phénomène des ICU pour 4 villes suisses de petite et moyenne taille : Delémont, Porrentruy, La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel. À l'aide des données de MétéoSuisse et des offices cantonaux de l'environnement, l'ampleur, la périodicité et les moments de la journée et de l'année où les ICU sont le plus intense ont été calculés. Les résultats sont comparés à ceux des 5 grandes villes de Suisse afin de déterminer les différences et les similitudes. La connaissance de cette problématique permet aux outils institutionnels de mettre en place des solutions afin de diminuer l'impact des ICU sur les habitants en ville, notamment en été.

## Mots-clés

Réchauffement climatique | Ilots de chaleur urbains | Petites et moyennes villes | Grandes villes de Suisse | Intensité | Amplitude | Moyennes mensuelles | Maxima | Minima | Moyennes horaires | Saison | Solutions | Durabilité



## Liste des abréviations, acronymes et définition importante

|      |   |
|------|---|
| ICU  | Îlot(s) de chaleur urbain(s)                                      |
| ENV  | Office de l'environnement du canton du Jura                       |
| OFEV | Office fédéral de l'environnement                                 |
| SENE | Service de l'énergie et de l'environnement du canton de Neuchâtel |

Intensité et ampleur : dans ce travail, l'intensité et l'ampleur de l'ICU sont définies de la même manière. Il s'agit de la différence de température entre la ville et la périphérie rurale. Si une phrase ou un graphique parle d'une intensité ou d'une ampleur de 3°C, cela signifie qu'il fait 3°C plus chaud en ville qu'en zone périphérique.



# Table des matières

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1</b>  | <b>Introduction</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1       | État de l'art . . . . .  | 3         |
| 1.2       | Problématique . . . . .  | 7         |
| <b>2</b>  | <b>Données</b>   | <b>8</b>  |
| <b>3</b>  | <b>Cadre géographique</b>  | <b>9</b>  |
| 3.1       | Delémont . . . . .   | 9         |
| 3.2       | Porrentruy . . . . .   | 11        |
| 3.3       | Chaux-de-Fonds . . . . .   | 12        |
| 3.4       | Neuchâtel . . . . .  | 13        |
| <b>4</b>  | <b>Méthodologie</b>  | <b>15</b> |
| <b>5</b>  | <b>Résultats</b>   | <b>21</b> |
| 5.1       | Rappel des résultats des 5 grandes villes de Suisse . . . . .    | 21        |
| 5.2       | Intensités moyennes mensuelles des ICU . . . . .                 | 23        |
| 5.3       | Heures des maxima et des minima de l'intensité des ICU . . . . . | 29        |
| 5.4       | Moyennes horaires de l'intensité des ICU . . . . .               | 35        |
| 5.5       | Évolution moyenne de l'intensité de l'ICU, par saison . . . . .  | 40        |
| 5.6       | Les 20 ICU ponctuels les plus intenses . . . . .                 | 46        |
| <b>6</b>  | <b>Discussion</b>  | <b>50</b> |
| 6.1       | Delémont . . . . .   | 50        |
| 6.2       | Porrentruy . . . . .   | 51        |
| 6.3       | La Chaux-de-Fonds . . . . .                                      | 52        |
| 6.4       | Neuchâtel . . . . .  | 53        |
| 6.5       | Discussion générale . . . . .                                    | 54        |
| <b>7</b>  | <b>Solutions</b>   | <b>56</b> |
| <b>8</b>  | <b>Conclusion</b>  | <b>60</b> |
| <b>9</b>  | <b>Bibliographie</b>   | <b>62</b> |
| <b>10</b> | <b>Annexes</b>   | <b>66</b> |



# 1 Introduction

En raison du réchauffement climatique, la température annuelle moyenne de 2002 à 2011 était supérieure de 1.3°C en Europe et de 2°C en Suisse par rapport à 1864<sup>1</sup>. De ce fait, les villes subissent de nombreux effets négatifs, notamment à cause des îlots de chaleur urbains. Le concept d'îlot de chaleur urbain (ICU) apparaît pour la première fois en 1833 dans *Climate of London* publié par Luke Howard. Il est le premier à reconnaître l'effet de l'urbanisme sur le climat local (Mills, 2008). Un îlot de chaleur urbain (ICU) est caractérisé par "une zone métropolitaine dont la température est significativement plus élevée que celle des zones rurales environnantes" (Anquez et Herlem, 2011). Son effet est plus visible le soir et durant la nuit, car le béton et l'asphalte, qui ont une capacité thermique élevée, stockent la chaleur plus longtemps qu'à la campagne. Un manque de refroidissement nocturne peut constituer un risque pour la santé et mettre en danger la vie de certains groupes de population comme les personnes âgées, les malades chroniques ou encore les enfants (Gehrig et al., 2018). C'est d'autant plus vrai lors des vagues de chaleur récentes des étés 2003, 2015 ou 2016 en Europe. Lors de ces vagues de chaleurs extrêmes, la relation linéaire entre la température minimale et la mortalité devient une fonction exponentielle. Cela signifie que chaque augmentation d'un dixième de degré celsius a une influence dramatique sur le taux de mortalité total. En raison du changement climatique, ces phénomènes ont augmenté au 20<sup>e</sup> siècle et seront toujours plus habituels pendant le 21<sup>e</sup>.

D'après MétéoSuisse, l'été 2003 fût le plus chaud en Europe depuis au moins 250 ans et les scénarios climatiques CH2018 montrent que la température moyenne suisse va continuer d'augmenter durant ce siècle et ainsi accentuer les effets d'ICU. Ces scénarios prévoient des étés plus secs, des températures estivales moyennes en hausse de 2.5°C à 4.5°C, des périodes de sécheresse en hausse jusqu'à 9 jours, de plus de 3 à 17 jours de fortes chaleur ou encore le jour le plus chaud de l'année en hausse de plus 2°C à plus 5.5°C (NCCS, 2018). Les villes ont une influence thermique qui provoque un "réchauffement de la température et la formation d'un îlot de chaleur urbain plus ou moins prononcé" (Fallot, 2020). Avec l'augmentation de la population et surtout une urbanisation croissante, les villes suisses n'échappent pas à ce phénomène. En 2015, 82.5% de la population suisse vivait dans un espace à caractère urbain (OFEV, 2018). Ces zones urbaines diffèrent des espaces verts de la campagne dans leurs propriétés thermiques et hygrométriques. En effet, les surfaces bâties comme le goudron, le béton ou encore les tuiles emmagasinent plus de chaleur le jour que les zones vertes de la campagne. De plus, ces effets sont plus visibles avec l'augmentation de la taille des agglomérations et leur industrialisation. C'est pourquoi en Amérique du Nord, des écarts supérieurs à 10°C peuvent être observés dans les grandes villes (Fallot, 2020). La pollution est également un facteur important, car les villes rejettent des polluants, ainsi que de la chaleur, au travers des chauffages, du trafic et de l'industrie. La pollution réchauffe indirectement l'air ambiante par effet de serre. Plus la ville et les zones industrielles sont grandes, plus ces rejets sont importants. L'îlot de chaleur urbain est à son ampleur maximale dans le centre ville à hauteur des toits. Son intensité diminue avec la hauteur et disparaît vers 1000 mètres d'altitude. Plus les villes sont grandes, plus l'ICU est important en superficie.

---

1. <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse/evolution-de-la-temperature-et-des-precipitations.html>

La saison et les situations météorologiques impactent les ICU de toutes les villes. Dans les grandes villes des latitudes moyennes, l'ampleur maximale a lieu par situation anticyclonique avec des vents faibles et un temps ensoleillé (Fallot, 2020). Ce type de météo permet l'accumulation des polluants rejetés par la ville et les activités humaines ainsi que celle de l'air chaud.

La taille de la ville est un facteur important de l'ampleur de l'îlot de chaleur urbain. En 2018, Météo Suisse a publié un article sur les ICU des 5 plus grandes villes de Suisse : Zürich, Berne, Bâle, Genève et Lausanne (Gehrig et al., 2018). Les résultats montrent des situations similaires à celles de Paris ou Londres notamment. L'effet est le plus fort en été et pendant la nuit. En moyenne, la température pendant la nuit était d'environ 2°C plus élevée en ville qu'en campagne avec des maxima pouvant atteindre 6-7°C. Mais la Suisse ne possède pas que des grandes villes à fort taux d'urbanisation. C'est pourquoi ce mémoire s'intéresse à des villes de petite et moyenne taille : Delémont, Porrentruy, La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel.

## 1.1 État de l'art

De nos jours, la capacité d'une ville à générer un îlot de chaleur urbain est un fait bien reconnu. Il s'agit même de l'un des effets climatologiques les plus connus de la modification de l'environnement atmosphérique par l'homme et l'un des défis les plus importants du 21<sup>e</sup> siècle (Oke, 1973). L'article le plus influent sur la thématique des ICU a été publié en 1973 par Timothy Richard Oke et s'intitule "City size and the urban heat island". Ce fut le premier à mettre en avant le lien entre la structure urbaine d'une ville et l'intensité des ICU. Par l'usage de chauffés, du trafic et des industries, les villes rejettent de la chaleur et des polluants dans l'atmosphère. Ces rejets sont augmentés avec la taille de la ville ainsi que le nombre d'industries. De plus, ils sont plus élevés en saison froide dans les moyennes et hautes latitudes. Dans une ville, les surfaces bâties comme le goudron, le béton ou encore les tuiles ont des propriétés thermique et hygrométriques différentes que les espaces verts de la campagne. Ayant des capacités thermiques plus grandes que les zones vertes, les bâtiments stockent davantage de chaleur provenant du soleil durant la journée pour la restituer progressivement durant la nuit. Cela implique un refroidissement durant la nuit plus lent des villes par rapport à la campagne. Avec des sols imperméables en ville, ces dernières s'assèchent rapidement après un épisode de pluie, car l'eau s'écoule par les égouts et les canalisations vers les cours d'eau. En campagne, l'humidité des sols est plus grande car une bonne partie des eaux de pluie s'infiltre dans les sols. L'évaporation est de ce fait plus faible en ville qu'en campagne. Avec une végétation plus importante en campagne, celle-ci évapore beaucoup d'eau par transpiration végétale. L'évapotranspiration, qui est la combinaison de l'évaporation et de la transpiration végétale, consomme quantité d'énergie qui est puisée dans celle du soleil et qui ne réchauffera pas le sol, au contraire de la ville. L'énergie solaire qui arrive à la surface du sol est décomposée en 3 flux : le flux de chaleur sensible, le flux de chaleur dans le sol et le flux de chaleur latente. Le flux de chaleur sensible réchauffe l'air environnant depuis le sol. Le flux de chaleur dans le sol va réchauffer le sous-sol. Le flux de chaleur latente est utilisé pour l'évapotranspiration de l'eau. Les flux de chaleur sensible et le réchauffement de l'air sont plus importants en ville qu'en campagne, notamment lors de la saison chaude et un temps bien ensoleillé favorable à une évapotranspiration forte en campagne. Ces différences entre l'évapotranspiration ainsi que les différents flux de chaleur sont des causes majeures de la formation d'un îlot de chaleur urbain en été. En hiver, ce sont les rejets de chaleur par l'homme qui sont la principale cause de températures plus élevées en ville dans les moyennes latitudes. Il y a également d'autres paramètres qui peuvent influencer les températures en ville mais de manière moins significative. C'est notamment le cas de l'albédo, qui correspond au pourcentage d'énergie solaire réfléchi en direction de l'espace. Étant moins prononcé en ville qu'en campagne dans les moyennes latitudes, une plus grande quantité d'énergie solaire va réchauffer la surface du sol ainsi que l'air ambiant en ville (Fallot et Rebetez, 2008 ; Fallot, 2020). Lors de conditions météorologiques propices à la formation d'un ICU, c'est-à-dire une situation d'anticyclone avec un ciel dégagé et des vents nuls ou légers, il arrive fréquemment que la différence de température entre une zone urbaine et la campagne atteigne 5 à 10°C (Azevedo, 2016). Ce phénomène est visible sur la *figure 1* avec l'îlot de chaleur urbain de la ville de Shanghai.

### Îlot de chaleur urbain à Shanghai

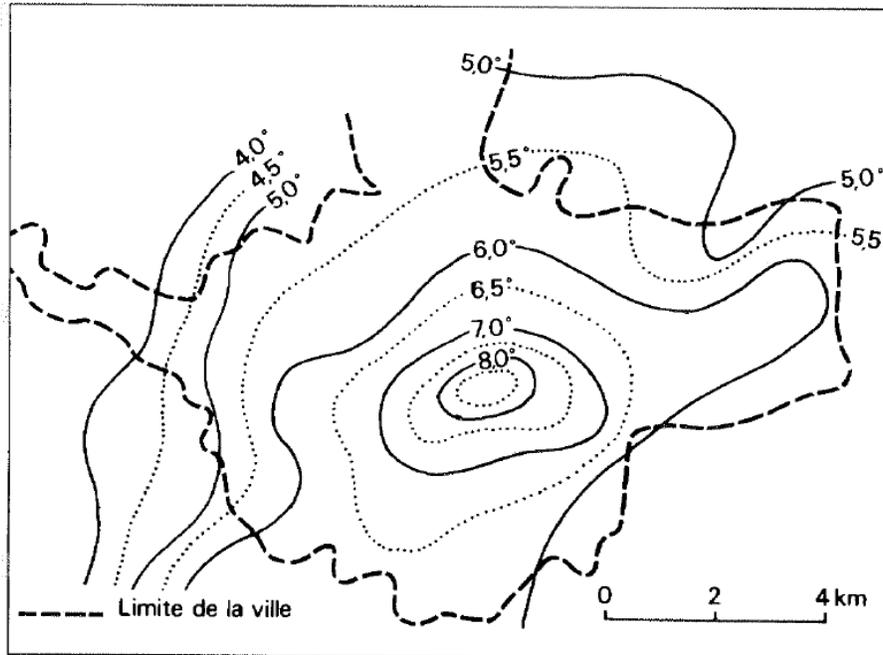


FIGURE 1 – Source : Escourrou (1991)

Il a également été constaté que l'ICU était généralement plus marqué la nuit. Certaines études ont cherché à montrer ce phénomène. C'est notamment le cas à Paris, où une différence d'intensité entre le jour et la nuit allant jusqu'à 6°C a été observée (Lemonsu et al., 2013). À Londres, des analyses similaires ont montré une différence pouvant atteindre 9°C (Doick et al., 2014).

Entre 1989 et 2016, plus de 3700 articles ont été publiés sur le sujet des ICU (Branea et al., 2016). Depuis le début des années 2000, l'intérêt pour les ICU grandit de manière exponentielle comme cela est visible sur la *figure 2* (Branea et al., 2016).

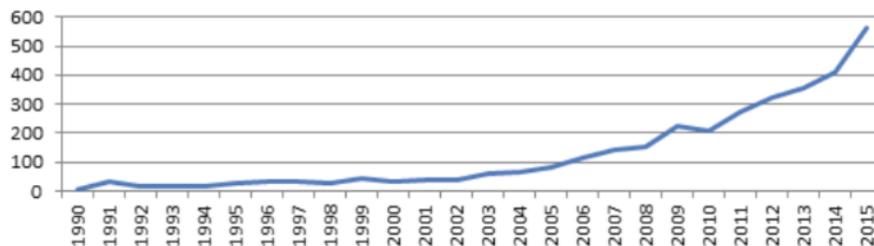


FIGURE 2 – Nombre d'articles publié depuis les années 1990 sur les ICUs

Le nombre croissant d'articles révèle que les problèmes liés aux ICU deviennent de plus en plus importants au sein de la communauté scientifique et que ce phénomène va encore se compliquer avec l'augmentation des vagues de chaleur et une urbanisation en expansion. Il est également à noter que le nombre d'articles augmente de manière plus significative dans les pays avec un taux d'urbanisation élevé comme la Chine ou les États-Unis (Branea et al., 2016). Mais c'est également le cas en Europe, avec d'importantes recherches qui ont été effectuées sur les ICU ces dernières années (Santamouris, 2007), par exemple en Roumanie avec 33 articles publiés depuis 2009 (Branea et al., 2016). Il en existe également pour la Péninsule Ibérique avec Pinho and Manso Orgaz (2000) qui ont mesuré l'intensité de l'ICU de la ville d'Aveiro et Balkestahl et al. (2006) pour la ville de Porto au Portugal avec des intensités pouvant atteindre 7°C, mais aussi Yaggie et al (1991) pour Madrid en Espagne. De nombreuses études ont été effectuées pour les villes italiennes avec notamment Colacino and Lavagnini (1982) pour Rome avec une mise à jour de Bonacquisti et al. (2006) qui montre une amplitude maximale atteignant 5°C environ. Zanella (1976) a étudié la ville de Parme et Bacci and Maugeri (1992) la ville de Milan. Une étude existe également pour Florence par Petralli et al. (2006). Pour des études plus récentes, il est possible de lire les travaux de Pongracz et al (2006) sur les villes hongroises avec des moyennes mensuelles d'intensité de 4°C ou Blazejczyk et al. (2006) pour celles polonaises. Beranova and Huth (2005) ont analysés l'ICU de Prague sur la période 1961-1990 et Watkins et al (2002) ont analysé les mesures de l'été 1999 de Londres pour conclure à la présence d'un ICU d'une ampleur qui pouvait atteindre 7°C. Dans le journal *Climatologie*, Renard et Alonso (2020) dressent un bilan plus récent mais confirment que le nombre d'articles publiés sur le sujet des ICU est croissant. Ainsi, la ville de Rennes a été le sujet d'étude de Dubreuil et al. (2020) pendant 16 ans (de 2004 à 2019) afin de déterminer la fréquence et l'intensité des ICU qui peut atteindre 6°C. C'est aussi le cas pour la ville de Metz par les chercheurs Hassani et Drogue (2019) ou encore Caen par Cantat et Follin (2019).

Les villes de Suisse ont également été analysées afin de savoir si le phénomène des ICU était présent dans le pays. En 2018, Gehrig et al. ont publié un rapport au sein de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse qui s'intitule *Städtische Wärmeinseln in der Schweiz - klimatologische Studie mit Messdaten in fünf Städten* et qui étudie la présence et l'intensité des ICU pour les 5 plus grandes villes de Suisse : Zurich, Genève, Bâle, Lausanne et Berne, qui comptent toutes plus de 100'000 habitants. Les résultats montrent des situations similaires à celles de Paris ou Londres. L'effet urbain est plus intense en été et pendant la nuit, en moyenne, la température la nuit était d'environ 2°C plus élevée en ville qu'en campagne avec des maxima pouvant atteindre 6-7°C. Mais la Suisse ne possède qu'une sixième ville avec une population supérieure à 100'000 habitants : Winterthour. La plupart des villes suisses sont de petites ou moyennes tailles. Plusieurs études ont été réalisées sur les ICU en Suisse dans les années 1980. L'article de Wanner et Hertig (1984) synthétise ces études en décrit les caractéristiques des ICU pour plusieurs villes en Suisse en fonction de leur taille et de leur situation topographique. Une étude menée sur l'ICU de la ville de Fribourg (Ruffieux, 1986) révèle que celui-ci atteint son ampleur maximale durant l'après-midi par situation anticyclonique durant l'après-midi par situation anticyclonique en été et pas durant la nuit comme pour les 5 plus grandes villes de Suisse (Gehrig et al., 2018). Cependant, ces articles datent d'il y a plus de 30 ans et c'est pourquoi l'objectif de ce mémoire est d'effectuer une étude sur deux villes de taille moyenne, La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel, et deux villes de petite taille, Delémont et Porrentruy. La période choisie va du 1<sup>er</sup> janvier 2013 au 31 décembre 2019 et est identique pour les 4 villes. Pour Deilami et al (2018), l'effet d'îlot de chaleur urbain est inévitable pour une ville. C'est pourquoi le postulat de base est que pour chaque ville étudiée, un ICU est présent. Dans ce mémoire, il est question d'analyser leur ampleur, leur périodicité et les moments de la journée et de l'année où ils sont le plus intense.

## 1.2 Problématique

Afin d'aborder cette problématique, la question générale de recherche suivante est formulée :

**De quelle manière les îlots de chaleur urbains des villes de Delémont, Porrentruy, La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel ressemblent-ils et/ou se différencient-ils de ceux des 5 grandes villes de Suisse ?**

Trois hypothèses sont posées afin de répondre à la question de recherche :

**1 Les îlots de chaleur urbains pour les 4 villes choisies sont moins intenses que ceux des 5 grandes villes suisses.**

Ces villes, étant plus petites et moins denses, les effets attendus des ICU sont plus faibles. En effet, la densité est un facteur important de l'ampleur d'un ICU.<sup>2</sup>

**2 Les îlots de chaleur urbains pour les 4 villes choisies sont le plus intense en été de la même manière que les 5 grandes villes suisses.**

C'est en été que les jours les plus chauds ont lieu, c'est pourquoi il est attendu que ce soit durant cette période de l'année que la chaleur accumulée est la plus importante. Ainsi, une fois libérée, cette chaleur permet à un ICU d'atteindre son amplitude maximale durant l'été.

**3 Les îlots de chaleur urbains pour les 4 villes choisies sont le plus intense durant la nuit de la même manière que les 5 grandes villes suisses.**

Les ICU sont le plus intense lorsque la chaleur accumulée la journée est libérée. Ce phénomène se produit en fin de journée et l'intensité maximale est attendue lorsque le soleil se couche, c'est-à-dire la nuit.

Afin de répondre à la question de recherche, ce mémoire présente tout d'abord les données utilisées, ainsi que le cadre géographique des stations de mesure utilisées pour les récolter, mais aussi celui des 4 villes choisies ainsi que leurs caractéristiques (hauteur, densité, nombre d'habitants). La méthodologie expliquera la manière dont les îlots de chaleur urbains, leur intensité et leur périodicité ont été calculés. Ce mémoire présente ensuite les résultats obtenus et discute de ces derniers afin de répondre aux hypothèses. Un chapitre *Solutions* met en avant les possibilités de réduire l'impact négatif des ICU. Une conclusion termine ce mémoire.

---

2. <http://www.e6-consulting.fr/les-ilots-de-chaleur-urbains-point-de-vigilance-du-confort-dete/>

## 2 Données

Un îlot de chaleur urbain (ICU) est caractérisé par "une zone métropolitaine dont la température est significativement plus élevée que celle des zones rurales environnantes" (Anquez et Herlem, 2011). Afin de calculer son intensité, il est nécessaire d'avoir la température du centre ville ainsi que de la campagne environnante. MétéoSuisse a un réseau de mesure automatique de 160 stations qui récolte toutes les 10 minutes diverses données. Les stations ne sont pas situées au centre ville<sup>3</sup>. De ce fait, les données de la campagne environnante proviennent de MétéoSuisse et plus précisément de leur portail IDAWEB<sup>4</sup> qui permet après inscription de télécharger les données de toutes les stations de leur réseau. Pour les 4 villes, deux types de données ont été téléchargées sur la même période de temps, qui va du 1<sup>er</sup> janvier 2013 au 31 décembre 2019. Tout d'abord, la température de l'air à 2 mètres au-dessus du sol en degré celsius, calculée sur une moyenne horaire journalière et l'échelle de temps UTC. Le deuxième paramètre téléchargé est la vitesse du vent scalaire en km/h calculée sur une moyenne horaire, du 1<sup>er</sup> janvier 2013 au 31 décembre 2019. L'utilité de ce paramètre est expliqué dans le chapitre *Méthodologie*. La récupération des données du vent dans le portail IDAWEB s'explique par le fait que les stations de MétéoSuisse sont situées dans des endroits bien dégagés en périphérie de la ville ou en campagne. Le choix des stations de mesures sera présenté dans le chapitre *Cadre géographique*. Il est important de préciser que les stations de mesures de MétéoSuisse sont ventilées. Cela aura son importance lors de l'interprétation des résultats.

Pour les mesures du centre ville de Neuchâtel et de La Chaux-de-Fonds, les données ont été aimablement fournies par le Service de l'énergie et de l'environnement (SENE) du canton de Neuchâtel<sup>5</sup>. Les données contiennent la température de l'air en degré celsius du 1<sup>er</sup> janvier 2013 au 31 décembre 2019. Contrairement aux données de MétéoSuisse, les valeurs sont des moyennes semi-horaires et l'échelle de temps est UTC +1. Pour les mesures du centre ville de Delémont et Porrentruy, l'Office de l'environnement (ENV) du canton du Jura<sup>6</sup> a eu l'amabilité de fournir les données. De la même manière que celles du SENE, les données contiennent la température de l'air en degré celsius du 1<sup>er</sup> janvier 2013 au 31 décembre 2019 sous forme de moyennes semi-horaires et l'échelle de temps est également UTC +1. Les capteurs de température des stations du SENE et de l'ENV ne sont pas ventilés, contrairement à ceux des stations de MétéoSuisse.

---

3. <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/systemes-de-mesure-et-de-prevision/stations-au-sol/reseau-de-mesures-automatiques.html>

4. <https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do;idaweb=0phLTWMBTNWxHG75fhJCyM1NXX6JQM4vpvKkgkv3LypRfQpZxfXY!-1907983237?language=fr>

5. <https://www.ne.ch/autorites/DDTE/SENE/Pages/accueil.aspx>

6. <https://www.jura.ch/env>

### 3 Cadre géographique

Afin de mesurer l'intensité des îlots de chaleur urbain des villes sélectionnées, il est nécessaire de mesurer la température de deux stations. Comme le choix des stations de MétéoSuisse est limité, il a fallu trouver des stations pertinentes afin d'effectuer les calculs. Ce choix affecte les résultats, car pour être le plus précis possible, il est souhaitable que les stations de mesures du centre ville et de la campagne environnante soient dans une situation géographique et topographique similaire. Cela permettrait aux deux stations d'avoir un même ensoleillement, une exposition au vent identique, une altitude similaire ou encore un revêtement sur lequel la station est posée avec les mêmes propriétés thermiques. De ce fait, les températures mesurées auraient les mêmes influences et il serait possible de les comparer sans prendre en compte des facteurs perturbateurs. Par exemple, toutes les stations de MétéoSuisse sont posées sur de la pelouse qui a un flux de chaleur sensible plus faible qu'un métal comme l'acier. Une chaleur sensible élevée réchauffera plus fortement l'air environnant depuis le sol (Fallot, 2020). Cela signifie que deux stations de mesures à quelques dizaines de mètres l'une de l'autre, mais posées sur deux revêtements distincts donneront des températures différentes. C'est pourquoi ces facteurs doivent être pris en compte et sont présentés dans ce chapitre, ainsi que les caractéristiques des villes.

#### 3.1 Delémont

Delémont est la 106<sup>e</sup> plus grande ville de Suisse avec environ 12'600 habitants et une densité de 557 habitants par  $km^2$ . Elle est le chef-lieu du canton du Jura et se situe à une altitude de 414 mètres. Delémont se caractérise par un climat tempéré semi-continentale avec une température moyenne annuelle de 9.4°C et des précipitations moyennes annuelles de 871mm. La station de MétéoSuisse, en service depuis 1892, se situe aux coordonnées géographiques 593270/244543 à une altitude de 439 mètres en périphérie de Delémont. La station de l'ENV se trouve au centre ville de Delémont à la rue de l'Avenir aux coordonnées géographiques 593500/246050 à une altitude de 410 mètres dans un site suburbain. La *figure 3* montre l'emplacement des deux stations.



FIGURE 3 – Emplacement des deux stations de mesures pour la ville de Delémont  
©Google Maps

Leur éloignement de quelques kilomètres fait que les deux stations ont des caractéristiques géographiques et topographiques similaires. Il n'y a pas de facteurs connus qui influencent l'une ou l'autre station de manière significative. Enfin, Delémont se situe dans le fond d'une vallée, qui favorise l'accumulation d'air froid. Cette information sera pertinente lorsqu'il s'agira de comparer les intensités des ICU des différentes villes.

### 3.2 Porrentruy

Porrentruy est la 165<sup>e</sup> plus grande ville de Suisse avec environ 6'700 habitants et une densité de 435 habitants par  $km^2$ . Elle se situe dans le canton du Jura, plus précisément dans le district d'Ajoie. L'altitude de Porrentruy est de 443 mètres. Porrentruy Delémont se caractérise par un climat tempéré semi-continentale avec une température moyenne annuelle de 9.3°C et des précipitations moyennes annuelles de 918mm. La station de MétéoSuisse utilisée pour récolter les données se trouve à Fahy à environ 15 kilomètres de Porrentruy, plus précisément aux coordonnées 562464/252675 à une altitude de 596 mètres. La station de l'ENV se situe à Porrentruy, à la rue Gustave Amweg, aux coordonnées géographiques 572775/252050 à une altitude de 420 mètres. La *figure 4* montre l'emplacement des deux stations.



FIGURE 4 – Emplacement des deux stations de mesure pour la ville de Porrentruy  
©Google Maps

Comme Delémont, Porrentruy se situe au fond d'une vallée, celle de l'Allaine. Par situation anticyclonique, un fond de vallée est exposé à une accumulation d'air froid qui se produit la nuit. Ces accumulations se superposent aux ICU et les atténuent fortement par rapport à d'autres situations géographiques. C'est notamment le cas pour Fahy, qui se situe sur un haut plateau et n'est pas exposée à ces accumulations d'air froid. Cette différence de situations entre les 2 stations a un fort impact sur les résultats des intensités des ICU et sera prise en compte lors de l'analyse de ces derniers.

### 3.3 Chaux-de-Fonds

15<sup>e</sup> plus grande ville de Suisse, La Chaux-de-Fonds comprend environ 38'000 habitants et une densité de 682 habitants par  $km^2$ . Son altitude moyenne est d'environ 1000 mètres et se caractérise par un climat tempéré semi-continental avec une température moyenne annuelle de 6.2°C et des précipitations moyennes annuelles de 1289mm. La station de MétéoSuisse se situe en périphérie de La Chaux-de-Fonds, près de l'aérodrome des Éplatures aux coordonnées géographiques 2550919/1214861 à une altitude de 1017 mètres. La station de l'ENV se situe à La Chaux-de-Fonds au parc de l'Ouest aux coordonnées géographiques 255346.7/121696.3. Il est à préciser que le capteur des températures de la station du SENE se situe sur un revêtement métallique. Les deux stations sont séparées par environ 4.5 kilomètres et la *figure 5* montre l'emplacement des deux stations.

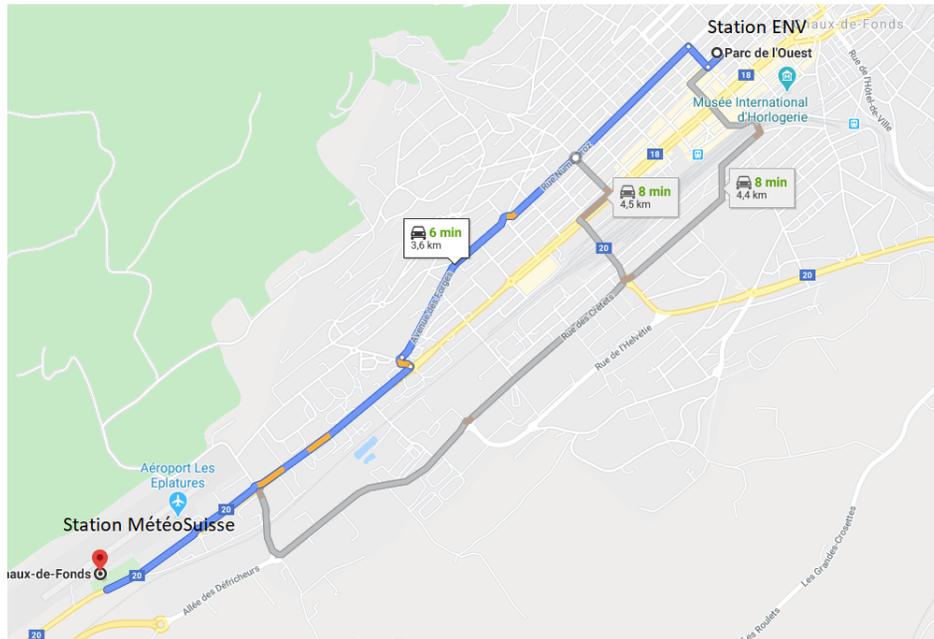


FIGURE 5 – Emplacement des deux stations de mesure pour la ville de la Chaux-de-Fonds  
©Google Maps

Comme pour Delémont, la situation géographique et topographique est similaire pour les 2 stations. Cependant, le fait que le capteur de la station de l'ENV soit sur une surface métallique alors que celle de MétéoSuisse est sur une surface herbeuse influence les mesures et, de ce fait, les résultats.

### 3.4 Neuchâtel

21<sup>e</sup> plus grande ville de Suisse, Neuchâtel compte environ 33'000 habitants et une densité de 1850 habitants par  $km^2$ . L'altitude moyenne de la ville est d'environ 480 mètres (430 pour le bord du lac). Neuchâtel se caractérise par un climat tempéré semi-continental avec une température moyenne annuelle de 9°C et des précipitations moyennes annuelles de 926mm. La station de MétéoSuisse se trouve à la Rue de l'Observatoire à Neuchâtel aux coordonnées géographiques 2563087/1205560 à une altitude de 485 mètres. La station du SENE se trouve à l'avenue de la Gare à Neuchâtel aux coordonnées géographiques 265151.8/120493.5 à une altitude de 461 mètres. Les deux stations se trouvent sur un versant à environ 50 mètres au-dessus du lac de Neuchâtel.

Comme MétéoSuisse possède une station de mesure à Cressier, à environ 14 kilomètres de Neuchâtel, il a été décidé de faire les calculs entre cette station et celle du SENE. Cela permet d'effectuer une comparaison entre les deux résultats obtenus et ainsi d'affiner les observations ou de mettre en lumière des anomalies. Après les calculs, les résultats n'étaient pas satisfaisants, car ils étaient trop irréguliers et trop anormaux par rapport aux autres villes. Comme les stations du SENE ont pour objectif principal de surveiller la qualité de l'air, elles ne sont pas nécessairement situées dans un emplacement favorable à la mesure de la température. C'est pourquoi il a été décidé que l'intensité de l'îlot de chaleur urbain de Neuchâtel serait calculé à l'aide des stations de mesures MétéoSuisse de Neuchâtel et de Cressier. La station de Cressier se situe aux coordonnées géographiques 2571163/1210798 à une altitude de 430 mètres. Contrairement à Neuchâtel, Cressier se situe au fond d'une plaine et est ainsi davantage exposée à des accumulations d'air froid durant la nuit par ciel clair et vent faible. La *figure 6* montre l'emplacement des deux stations.

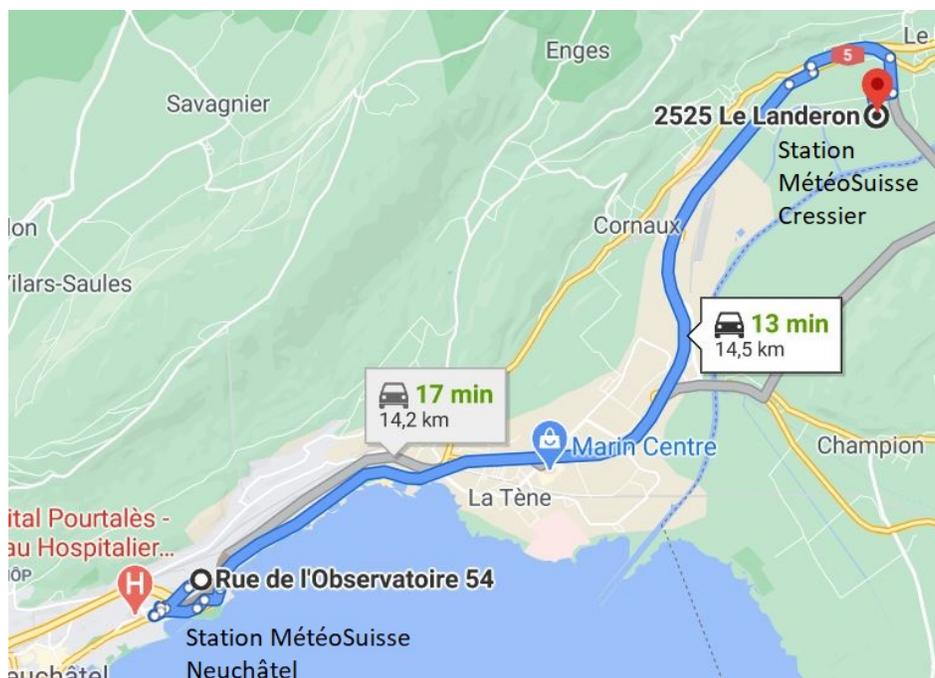


FIGURE 6 – Emplacement des deux stations de mesure pour la ville de Neuchâtel  
©Google Maps

Comme Cressier est sujette à des accumulations d'air froid qui impactent l'intensité des ICU pour la ville de Neuchâtel, cette caractéristique sera prise en compte lors de l'analyse des résultats.

## 4 Méthodologie

Afin de traiter la nombreuse quantité de données, il a été décidé de coder les différentes manipulations et calculs à effectuer en langage Python. Les données récupérées sur le portail IDAWEB sont en format *csv* et grâce à la bibliothèque Pandas<sup>7</sup>, il est aisé de transformer ces fichiers en format Excel (.xlsx) afin qu'ils soient du même format que les données reçues de la part du SENE et de l'ENV. Par la suite, il a fallu effectuer de nombreuses opérations mathématiques basiques comme des calculs de moyennes ou encore des soustractions. Python se prête très bien à ce genre d'opérations. Dans ce chapitre, il est question d'expliquer le cheminement pour arriver aux résultats qui sont présentés dans le *chapitre 5*, sans aller dans les détails du code. Des exemples sont cependant disponibles dans l'annexe *Méthodologie* pour plus d'informations. La ville de Delémont est prise en exemple, mais le processus pour chaque ville est identique.

La première étape a été de rendre les deux bases de données identiques. Même si les données de MétéoSuisse et du SENE/ENV sont enregistrées dans un fichier Excel, elles ne sont pas sauveées dans un format similaire. En effet, les températures du SENE et de l'ENV sont transmises en moyenne semi-horaire et l'échelle de temps est UTC +1. L'entrée "01h00" est la moyenne semi-horaire de "01h00 à 01h29" et l'entrée "01h30" est la moyenne semi-horaire de "01h30" à "01h59". Afin d'obtenir une moyenne horaire, il suffit de faire la moyenne entre l'entrée "01h00" et "01h30". Ainsi, la nouvelle entrée "01h00" correspond à la moyenne horaire de "01h00" à "01h59". En revanche, les données de MétéoSuisse sont en moyenne horaire et l'échelle de temps est UTC. De plus, l'entrée "02h00" est en réalité la moyenne horaire de "01h00 à 01h59". Cette différence est en réalité bénéfique, car cela signifie que malgré la différence d'échelle de temps, les entrées "01h00" (après le calcul de moyenne horaire pour les températures du SENE et de l'ENV) correspondent à la même heure de la journée que pour les stations de MétéoSuisse, car les deux décalages s'annulent. Le seul changement qui a été effectué dans les données de MétéoSuisse est l'ajout de la première entrée de l'année suivante comme étant la dernière de l'année précédente. Par exemple, la dernière entrée de l'année 2013 n'est pas le 31.12.2013 à 23h00, mais le 1.01.2014 à 00h00. Ceci afin d'avoir un nombre d'entrées identique entre les données de MétéoSuisse et du SENE/ENV. Une fois les nouveaux fichiers Excel terminés, il a été possible d'effectuer les calculs à proprement parler. Le format des résultats des autres mois sont identiques.

---

7. <https://pypi.org/project/pandas>

Un exemple de résultat final pour le mois de janvier de la ville de Delémont est visible sur la figure 7.

| N  | O       | P  | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y |
|--|---------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <b>Delémont MétéoSuisse, Moyenne Janvier 2013-2019</b> |         |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| heure  | Station | Moyenne de la moyenne horaire de la température en °C de l'air à 2m/sol pour le mois de janvier de 2013 à 2019 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 00h01 à 01h00                                       | DEM     | 0.63   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 01h01 à 02h00                                       | DEM     | 0.469  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 02h01 à 03h00                                       | DEM     | 0.353  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 03h01 à 04h00                                       | DEM     | 0.197  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 04h01 à 05h00                                       | DEM     | 0.054  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 05h01 à 06h00                                       | DEM     | -0.049   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 06h01 à 07h00                                       | DEM     | -0.171   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 07h01 à 08h00                                       | DEM     | -0.215   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 08h01 à 09h00                                       | DEM     | -0.064   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 09h01 à 10h00                                       | DEM     | 0.499  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 10h01 à 11h00                                       | DEM     | 1.292  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 11h01 à 12h00                                       | DEM     | 2.119  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 12h01 à 13h00                                       | DEM     | 2.82   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 13h01 à 14h00                                       | DEM     | 3.36   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 14h01 à 15h00                                       | DEM     | 3.673  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 15h01 à 16h00                                       | DEM     | 3.571  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 16h01 à 17h00                                       | DEM     | 3  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 17h01 à 18h00                                       | DEM     | 2.459  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 18h01 à 19h00                                       | DEM     | 2.035  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 19h01 à 20h00                                       | DEM     | 1.739  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 20h01 à 21h00                                       | DEM     | 1.478  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 21h01 à 22h00                                       | DEM     | 1.255  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 22h01 à 23h00                                       | DEM     | 1.067  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 23h01 à 00h00                                       | DEM     | 0.907  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

FIGURE 7 – Exemple de résultat pour la température moyenne calculée heure par heure pour le mois de janvier à Delémont sur une période de 7 ans (2013-2019)

Tout d’abord, la moyenne de chaque heure pour chaque jour du mois de janvier est calculée. Puis, la moyenne des 7 années est effectuée (janvier 2013, janvier 2014, etc. jusqu’à janvier 2019). C’est pourquoi, à la fin, pour chaque mois, il ne reste que 24 entrées, une pour chaque heure de la journée. Ce processus est répété pour chaque mois de l’année. Pour les données de MétéoSuisse de la ville de Delémont, il en découle 12 tableaux (1 pour chaque mois) de 24 entrées chacun. Bien que la structure du code soit similaire pour les autres mois, il est important de faire attention aux nombres de jours de chaque mois et surtout, ne pas oublier que février n’en compte que 28, mais 29 en 2016! Ces calculs sont répétés pour les données de l’ENV de Delémont pour obtenir un nombre d’entrées équivalent. Comme les fichiers Excel sont identiques en terme de format, le même code peut être utilisé, ce qui simplifie grandement la méthodologie. Il est nécessaire cependant de changer les entrées de texte, comme le nom des stations ou la provenance des données. Ainsi, pour les données provenant du centre ville et de la campagne environnante, les formats sont identiques et les températures peuvent être comparées. Il est ensuite facile de calculer l’intensité des ICU pour chaque ville, dans cet exemple Delémont. En effet, l’intensité de l’ICU est la différence de température entre le centre ville et la périphérie ou la campagne environnante. Dans les faits, cela se traduit par la soustraction de par exemple l’entrée ”janvier 01h00” de MétéoSuisse à l’entrée identique venant de la station de mesure de l’ENV.

Cependant, avant d'effectuer cette soustraction, il est nécessaire de ramener les valeurs à une même altitude au travers des gradients verticaux de Bouët (Bouët, 1985). Comme les prises de mesure ne se font pas à la même altitude, cette correction est nécessaire afin d'annuler l'effet de l'altitude sur les températures. En prenant Delémont comme exemple, cette correction s'effectue en calculant la différence d'altitude entre les deux stations de mesure. Ici, 439 mètres pour celle de MétéoSuisse et 410 mètres pour celle de l'ENV. Le résultat obtenu est de 29 mètres. Puis, cette valeur est multipliée par la valeur du gradient vertical de Bouët dans la couche du fond multiplié par 0.01, car les gradients sont exprimés en °C/100m et non pas en °C/m. Par exemple, pour le mois de janvier, le calcul est donc de  $29 \times 0.24 \times 0.01 = 0.0696$ . Cette correction est ensuite ajoutée à chaque moyenne du mois de janvier pour les valeurs de Météo Suisse, car c'est la station la plus élevée. Chaque gradient est visible dans le *tableau 1*.

TABLEAU 1 – Gradients verticaux moyens de température de Bouët en °C/100m

| Janv. | Févr. | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juillet | Août | Sept. | Oct. | Nov. | Déc. |
|-------|-------|------|-------|------|------|---------|------|-------|------|------|------|
| 0.24  | 0.33  | 0.50 | 0.61  | 0.63 | 0.63 | 0.63    | 0.61 | 0.59  | 0.57 | 0.55 | 0.54 |

La *figure 8* montre un exemple de cette correction, pour le mois de janvier des données de MétéoSuisse de la ville de Delémont.

| I  | J       | K           | L                 | M | N                         | O | P      | Q |
|--|---------|-------------|-------------------|---|---------------------------|---|--------|---|
| <b>Delémont MétéoSuisse, Moyenne Janvier 2013-2019</b> |         |             |                   |   |                           |   |        |   |
| heure UTC  | Station | °C à 2m/sol | Valeurs corrigées |   | Altitude Delémont ENV (m) |   | 410    |   |
| de 00h01 à 01h00                                       | DEM     | 0.63        | 0.6996            |   | Altitude Delémont MS (m)  |   | 439    |   |
| de 01h01 à 02h00                                       | DEM     | 0.469       | 0.5386            |   | Différence                |   | 29     |   |
| de 02h01 à 03h00                                       | DEM     | 0.353       | 0.4226            |   |                           |   |        |   |
| de 03h01 à 04h00                                       | DEM     | 0.197       | 0.2666            |   | Gradient de Bouët         |   |        |   |
| de 04h01 à 05h00                                       | DEM     | 0.054       | 0.1236            |   | Janvier                   |   | 0.0696 |   |
| de 05h01 à 06h00                                       | DEM     | -0.049      | 0.0206            |   | Février                   |   | 0.0957 |   |
| de 06h01 à 07h00                                       | DEM     | -0.171      | -0.1014           |   | Mars                      |   | 0.145  |   |
| de 07h01 à 08h00                                       | DEM     | -0.215      | -0.1454           |   | Avril                     |   | 0.1769 |   |
| de 08h01 à 09h00                                       | DEM     | -0.064      | 0.0056            |   | Mai                       |   | 0.1827 |   |
| de 09h01 à 10h00                                       | DEM     | 0.499       | 0.5686            |   | Juin                      |   | 0.1827 |   |
| de 10h01 à 11h00                                       | DEM     | 1.292       | 1.3616            |   | Juillet                   |   | 0.1827 |   |
| de 11h01 à 12h00                                       | DEM     | 2.119       | 2.1886            |   | Aout                      |   | 0.1769 |   |
| de 12h01 à 13h00                                       | DEM     | 2.82        | 2.8896            |   | Septembre                 |   | 0.1421 |   |
| de 13h01 à 14h00                                       | DEM     | 3.36        | 3.4296            |   | Octobre                   |   | 0.1131 |   |
| de 14h01 à 15h00                                       | DEM     | 3.673       | 3.7426            |   | Novembre                  |   | 0.0957 |   |
| de 15h01 à 16h00                                       | DEM     | 3.571       | 3.6406            |   | Décembre                  |   | 0.0754 |   |
| de 16h01 à 17h00                                       | DEM     | 3           | 3.0696            |   |                           |   |        |   |
| de 17h01 à 18h00                                       | DEM     | 2.459       | 2.5286            |   |                           |   |        |   |
| de 18h01 à 19h00                                       | DEM     | 2.035       | 2.1046            |   |                           |   |        |   |
| de 19h01 à 20h00                                       | DEM     | 1.739       | 1.8086            |   |                           |   |        |   |
| de 20h01 à 21h00                                       | DEM     | 1.478       | 1.5476            |   |                           |   |        |   |
| de 21h01 à 22h00                                       | DEM     | 1.255       | 1.3246            |   |                           |   |        |   |
| de 22h01 à 23h00                                       | DEM     | 1.067       | 1.1366            |   |                           |   |        |   |
| de 23h01 à 00h00                                       | DEM     | 0.907       | 0.9766            |   |                           |   |        |   |

FIGURE 8 – Exemple de correction des températures moyennes horaires pour le mois de janvier à Delémont sur une période de 7 ans (2013-2019)

Les gradients verticaux moyens de température de M. Bouët correspondent à des valeurs moyennes mensuelles calculées sur une période de 30 ans pour l'ensemble du jour et de la nuit. Ces gradients tendent à être plus élevées durant le jour que la nuit, notamment par situation anticyclonique. Les situations favorisent une accumulation d'air froid près du sol durant la nuit, en particulier au fond des vallées, et le développement d'une couche convective durant le jour (Fallot, 2020). Cela peut influencer les résultats notamment là où les différences d'altitude entre 2 stations sont importantes comme entre Porrentruy et Fahy.

Une fois les corrections effectuées pour chaque heure de chaque mois, l'intensité de l'ICU est calculée. La *figure 9* présente un exemple de cette intensité pour le mois de janvier de Delémont. À gauche sont présentées les valeurs de l'ENV, à droite celles de MétéoSuisse. Ces deux colonnes permettent d'effectuer le calcul des intensités moyennes. En effet, cette intensité résulte de la soustraction entre la température mesurée au centre ville représentée par la colonne de la station de l'ENV et la température mesurée en périphérie représentée par la colonne de la station de MétéoSuisse. Ainsi,  $Différence = ENV - MétéoSuisse$ . La valeur *Moyenne* (0.572°C) résulte du calcul de la moyenne de chaque entrée de la colonne *Différence*. Ainsi,  $Moyenne = (0.5284 + 0.627 + \dots + 0.566)/24$ . Ces résultats sont ensuite présentés dans différents graphiques qui sont explicités dans le chapitre *Résultats*.

| Delémont ENV, Moyenne Janvier 2013-2019 |             |                  | Delémont MétéoSuisse, Moyenne Janvier 2013-2019 |                  |             |                   |
|---|-------------|------------------|---|------------------|-------------|-------------------|
| heure                                   | °C à 2m/sol |                  | Différence en °C                                | heure            | °C à 2m/sol | Valeurs corrigées |
| de 00h01 à 01h00                        | 1,228       |                  | 0,5284  | de 00h01 à 01h00 | 0,63        | 0,6996            |
| de 01h01 à 02h00                        | 1,166       | de 01h01 à 02h00 | 0,627   | de 01h01 à 02h00 | 0,469       | 0,5386            |
| de 02h01 à 03h00                        | 1,031       | de 02h01 à 03h00 | 0,608   | de 02h01 à 03h00 | 0,353       | 0,4226            |
| de 03h01 à 04h00                        | 0,881       | de 03h01 à 04h00 | 0,614   | de 03h01 à 04h00 | 0,197       | 0,2666            |
| de 04h01 à 05h00                        | 0,782       | de 04h01 à 05h00 | 0,658   | de 04h01 à 05h00 | 0,054       | 0,1236            |
| de 05h01 à 06h00                        | 0,745       | de 05h01 à 06h00 | 0,724   | de 05h01 à 06h00 | -0,049      | 0,0206            |
| de 06h01 à 07h00                        | 0,635       | de 06h01 à 07h00 | 0,736   | de 06h01 à 07h00 | -0,171      | -0,1014           |
| de 07h01 à 08h00                        | 0,543       | de 07h01 à 08h00 | 0,688   | de 07h01 à 08h00 | -0,215      | -0,1454           |
| de 08h01 à 09h00                        | 0,557       | de 08h01 à 09h00 | 0,551   | de 08h01 à 09h00 | -0,064      | 0,0056            |
| de 09h01 à 10h00                        | 0,858       | de 09h01 à 10h00 | 0,289   | de 09h01 à 10h00 | 0,499       | 0,5686            |
| de 10h01 à 11h00                        | 1,578       | de 10h01 à 11h00 | 0,216   | de 10h01 à 11h00 | 1,292       | 1,3616            |
| de 11h01 à 12h00                        | 2,344       | de 11h01 à 12h00 | 0,155   | de 11h01 à 12h00 | 2,119       | 2,1886            |
| de 12h01 à 13h00                        | 3,065       | de 12h01 à 13h00 | 0,175   | de 12h01 à 13h00 | 2,82        | 2,8896            |
| de 13h01 à 14h00                        | 3,674       | de 13h01 à 14h00 | 0,244   | de 13h01 à 14h00 | 3,36        | 3,4296            |
| de 14h01 à 15h00                        | 4,141       | de 14h01 à 15h00 | 0,398   | de 14h01 à 15h00 | 3,673       | 3,7426            |
| de 15h01 à 16h00                        | 4,299       | de 15h01 à 16h00 | 0,658   | de 15h01 à 16h00 | 3,571       | 3,6406            |
| de 16h01 à 17h00                        | 4,043       | de 16h01 à 17h00 | 0,973   | de 16h01 à 17h00 | 3           | 3,0696            |
| de 17h01 à 18h00                        | 3,439       | de 17h01 à 18h00 | 0,910   | de 17h01 à 18h00 | 2,459       | 2,5286            |
| de 18h01 à 19h00                        | 2,91        | de 18h01 à 19h00 | 0,805   | de 18h01 à 19h00 | 2,035       | 2,1046            |
| de 19h01 à 20h00                        | 2,532       | de 19h01 à 20h00 | 0,723   | de 19h01 à 20h00 | 1,739       | 1,8086            |
| de 20h01 à 21h00                        | 2,227       | de 20h01 à 21h00 | 0,679   | de 20h01 à 21h00 | 1,478       | 1,5476            |
| de 21h01 à 22h00                        | 1,938       | de 21h01 à 22h00 | 0,613   | de 21h01 à 22h00 | 1,255       | 1,3246            |
| de 22h01 à 23h00                        | 1,709       | de 22h01 à 23h00 | 0,572   | de 22h01 à 23h00 | 1,067       | 1,1366            |
| de 23h01 à 00h00                        | 1,543       | de 23h01 à 00h00 | 0,566   | de 23h01 à 00h00 | 0,907       | 0,9766            |
|   |             | Moyenne :        | 0,572   |                  |             |                   |

FIGURE 9 – Exemple de l'intensité moyenne calculée par heure pour le mois de janvier à Delémont sur une période de 7 ans (2013-2019)

Pour terminer, les ICU les plus intenses sur la période de 7 ans ont été recherchés. Ici, ce sont les températures horaires ponctuelles qui sont mises en avant et non les moyennes. Pour cela, les deux bases de données MétéoSuisse et ENV avec les températures sous forme de moyenne horaire sont soustraites entre les deux dates correspondantes. La valeur de MétéoSuisse est soustraite à celle de l'ENV. Par exemple "1.01.2013 à 04h00 ENV" - "1.01.2013 à 04h00 MétéoSuisse". Une fois ce calcul fait pour toutes les entrées, elles sont triées de la plus haute température à la plus petite. Ainsi, il suffit de récupérer les 20 données les plus élevées. Il est important de préciser que si les valeurs trouvées se suivent sur quelques heures, seule la température la plus élevée a été retenue. La raison du calcul de ces 20 données est de pouvoir confirmer que ces ICU ont bien lieu lors de conditions météorologiques anticycloniques et ainsi propices à leur formation. Pour vérifier cela, la vitesse du vent est nécessaire et c'est la raison pour laquelle ces données ont été téléchargées du portail IDAWEB. En effet, vérifier la vitesse du vent au moment où l'ICU est le plus intense permet de s'assurer que ce n'est pas une anomalie ou une erreur. Si le vent est faible ( $\leq$  que 10 km/h), alors les conditions sont remplies. En contrôlant la météo des dates auxquelles ces mesures ont été mesurées, il a été possible de contrôler que les conditions météorologiques correspondaient bien à un anticyclone.

À partir du calcul des données, quatre figures ont été réalisées pour chaque ville. La première présente les intensités moyennes mensuelles des ICU. Les entrées sont simplement les moyennes de chaque mois. La seconde comprend les heures des maxima et des minima de l'intensité des ICU par mois. Pour chaque mois, l'heure à laquelle l'ICU est le plus et le moins intense a été cherchée puis présentée sur la figure. La troisième contient les moyennes horaires de l'intensité des ICU sur toute l'année. Cela permet de voir la variation de l'intensité des ICU depuis le 1 janvier jusqu'au 31 décembre. Enfin, la quatrième présente l'évolution moyenne horaire de l'intensité de l'ICU, par saison. Ceci permet d'identifier la saison à laquelle l'ICU est le plus intense, en moyenne.

Pour clore ce chapitre, il est nécessaire de préciser l'état de certaines données. En effet, certaines stations n'ont pas été actives tout le temps et certaines données manquent. Souvent, ce sont des entrées ponctuelles qui n'impactent pas les calculs (ou tellement peu que cela ne se voit pas). Ces trous ont simplement été ignorés. Cependant, certaines périodes avec des valeurs manquantes sont importantes et peuvent atteindre plusieurs mois consécutifs. Dans ce cas, ces périodes ont été ignorées dans les calculs. Il est difficile de déterminer leur l'impact sur les résultats, mais il ne devrait pas être significatif. Le *tableau 2* présentent les données qui n'ont pas été prises en compte dans les calculs.

TABLEAU 2 – Données manquantes

|                              |                            |
|------------------------------|----------------------------|
| <b>Delémont :</b>            | <b>Porrentruy :</b>        |
| 2 au 3 janvier 2017          | Janvier à juillet 2016     |
| 19 au 20 Avril 2017          | 29 mai au 31 décembre 2019 |
| 5 au 7 août 2014             |                            |
|                              |                            |
| <b>Chaux-de-Fonds :</b>      | <b>Neuchâtel :</b>         |
| 9 octobre au 24 octobre 2016 | 10 au 17 juin 2013         |
| Septembre 2019               | 3 au 30 décembre 2013      |
|                              | 18 au 23 septembre 2014    |
|                              | Juin et juillet 2016       |

## 5 Résultats

Dans ce chapitre, les résultats obtenus pour chaque ville sont présentés sous forme de graphiques. Les *figures 11 à 14* présentent l'intensité moyenne des ICU des 4 villes étudiées pour chaque mois sur une période de 7 ans (2013-2019). Les *figures 15 à 18* montrent les heures auxquelles les maxima et minima de l'intensité de l'ICU se rencontrent, afin de savoir à quel moment de la journée cette intensité est en moyenne la plus élevée et la plus basse et de les comparer avec les 5 grandes villes de Suisse. Les *figures 19 à 22* présentent les intensités moyennes horaires de l'ICU calculées du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre sur une période de 7 ans (2013-2019). Les *figures 23 à 26* illustrent l'évolution moyenne horaire des ICU calculée pour chaque saison sur une période de 7 ans (2013-2019), afin notamment de voir si les intensités les plus élevées des ICU se rencontrent en été. Enfin, les 20 valeurs horaires les plus élevées des ICU sont montrés pour chaque ville avec les dates et heures, ainsi que la vitesse du vent associée afin de vérifier qu'elles coïncident avec des situations anticycloniques. Il est important de prendre en compte les informations présentées dans le chapitre *cadre géographique* qui impacte les résultats. Une analyse pertinente est effectuée dans le chapitre *discussion* afin d'expliquer les résultats et certaines anomalies visibles sur les figures.

### 5.1 Rappel des résultats des 5 grandes villes de Suisse

Le rappel des résultats pour les 5 grandes villes de Suisse (Gehrig et al., 2018) permet d'utiliser ces valeurs comme outil de comparaison lors de la présentation des résultats pour les 4 villes de ce mémoire. Le constat principal est que la température dans les villes est plus élevée que dans les zones rurales. L'îlot de chaleur urbain est présent dans les 5 villes étudiées durant toute l'année. Les températures maximales sont atteintes en été, surtout la nuit. Les températures nocturnes des centres-villes sont en moyenne en été 2°C à 3°C plus élevées que les zones rurales. Dans les zones de la ville moins denses, la différence de température varie entre 1 et 2°C, toujours avec les zones rurales. Au maximum, pendant la nuit, il a été calculé une différence de température allant jusqu'à 7°C. Pendant les nuits les plus chaudes, la température n'est jamais descendue en deçà de 24°C. Les nuits dites tropicales sont nettement plus nombreuses au centre-ville qu'à la campagne. La *figure 10* illustre l'évolution journalière par saison de l'ICU mesurée dans la ville de Zurich sur une période de 13 ans (2004-2016).

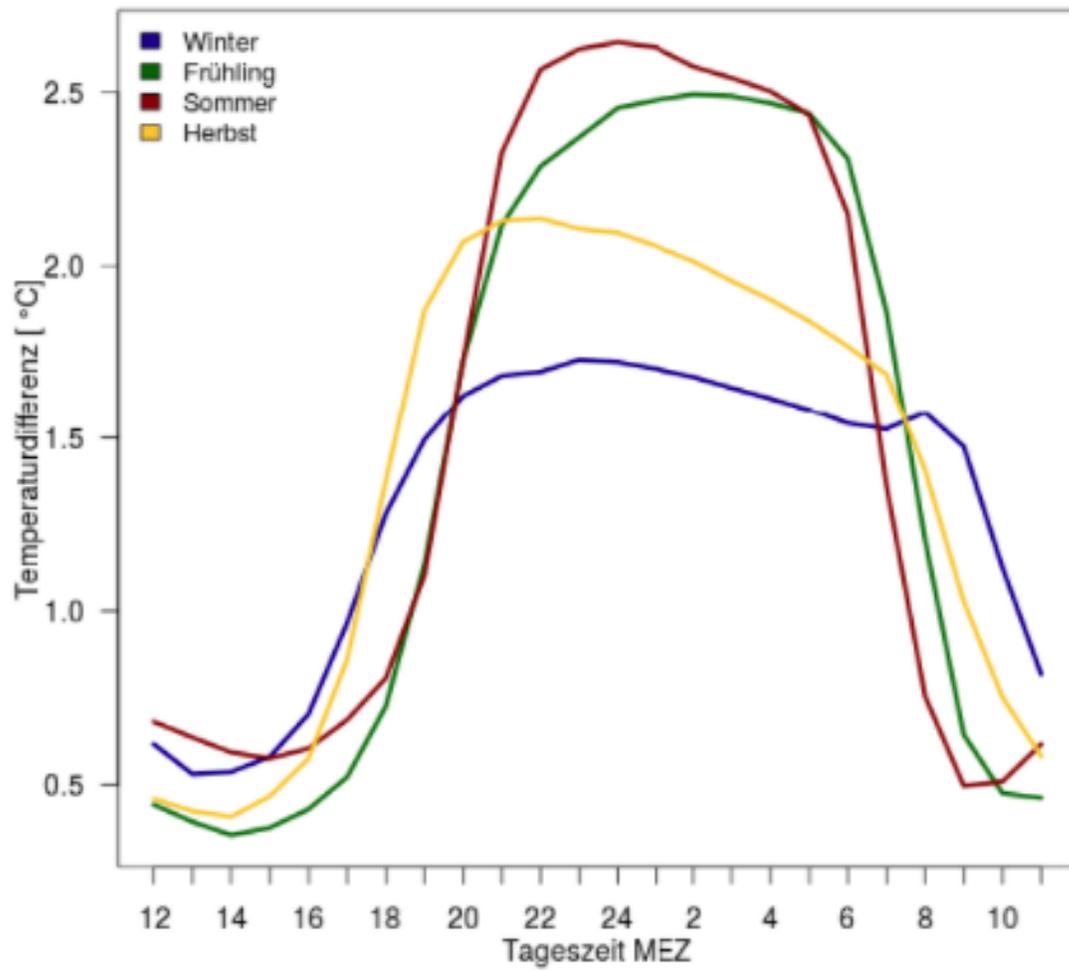


FIGURE 10 – Source : Gehrig et al. (2018)

## 5.2 Intensités moyennes mensuelles des ICU

Les intensités moyennes mensuelles des ICU présentées dans ce sous-chapitre donnent une première indication de l'ampleur de l'ICU et des mois où ils sont le plus intense. Ces figures ne permettent pas une analyse fine de la situation, car les variations quotidiennes et annuelles n'y sont pas visibles. De plus, certaines valeurs moyennes sont négatives, mais cela ne veut pas dire que l'ICU est absent durant ce mois, juste moins intense en moyenne. Il est en effet possible d'avoir des pics de température élevés, mais cela sera plus visible dans les sous-chapitres suivants. Pour rappel, comme expliqué dans le chapitre *méthodologie*, les moyennes sont calculées sur la période 2013-2019. Les intensités moyennes mensuelles de l'ICU dépendent de la saison mais aussi de la fréquence moyenne des situations anticycloniques et cycloniques. Un mois avec une fréquence plus élevée de situations anticycloniques se signalera par des ICU plus marqués, notamment en été. Il serait possible d'observer l'inverse en hiver à cause des accumulations d'air froid se produisant dans ce genre de situation, notamment au fond des vallées.

La *figure 11* présente les moyennes mensuelles de l'intensité de l'ICU pour la ville de Delémont. Il est visible que toutes les moyennes sont supérieures à  $0^{\circ}\text{C}$  et inférieures à  $1^{\circ}\text{C}$ . Il apparaît également que les intensités moyennes les plus fortes ont lieu pendant le printemps, notamment pour les mois d'avril et de mai alors qu'elles sont les plus faibles en août. Les résultats de chaque mois sont proches les uns des autres, avec 10 mois ayant une valeur comprise entre  $0.4^{\circ}\text{C}$  et  $0.6^{\circ}\text{C}$ . L'intensité mensuelle moyenne de l'ICU de Delémont varie peu tout au long de la période étudiée.

La *Figure 12* présente les résultats de l'intensité mensuelle moyenne de la ville de Porrentruy. Contrairement à Delémont, il est difficile d'observer une tendance générale, tant les variations sont grandes entre les différents mois. Les valeurs négatives les plus grandes se rencontrent au printemps (mars-avril) et en décembre. À l'opposé, le mois de janvier se signale par l'intensité moyenne mensuelle la plus élevée, ce qui rend l'analyse complexe. Similairement, juin et juillet ont des intensités moyennes supérieures à  $0^{\circ}\text{C}$ , alors qu'elles sont négatives en août. Porrentruy ne possède, selon ces résultats, pas de constance concernant l'intensité mensuelle moyenne des ICU.

Les intensités mensuelles moyennes de La Chaux-de-Fonds sont présentées sur la *figure 13*. Elles ressemblent à celles de Delémont, à la différence près que les intensités sont très élevées. En effet, elles dépassent  $2.5^{\circ}\text{C}$  pour tous les mois de l'année, alors qu'elles n'excèdent pas  $0.8^{\circ}\text{C}$  à Delémont. Comme les intensités moyennes de tous les mois se situent entre  $2.5$  et  $3.5^{\circ}\text{C}$ , il est difficile d'observer une période de l'année où les ICU sont plus marqués à La Chaux-de-Fonds. Il apparaît tout de même que les mois de novembre, janvier et février ont des intensités moyennes de l'ICU légèrement plus élevées que les autres mois. Contrairement aux deux autres villes, il apparaît que les valeurs observées à La Chaux-de-Fonds sont similaires à celles des 5 grandes villes de Suisse.

La *figure 14* présente les résultats pour la ville de Neuchâtel. Les intensités moyennes mensuelles de l'ICU se situent entre  $0.4^{\circ}\text{C}$  et  $1.4^{\circ}\text{C}$ . Cette figure montre qu'elles sont les plus élevées en juillet, août et septembre. Les mois de mars et d'avril ont également des températures moyennes légèrement supérieures à celles des mois d'hiver. Contrairement aux 3 autres villes étudiées, Neuchâtel est la première localité où les intensités moyennes de l'ICU sont les plus élevées en été et les plus basses en hiver, comme pour les 5 grandes villes de Suisse (Gehrig et al., 2018). Neuchâtel possède des intensités équivalentes à celles de Delémont pour certains mois, mais supérieures d'un peu moins de  $1^{\circ}\text{C}$  pour ceux de l'été notamment.

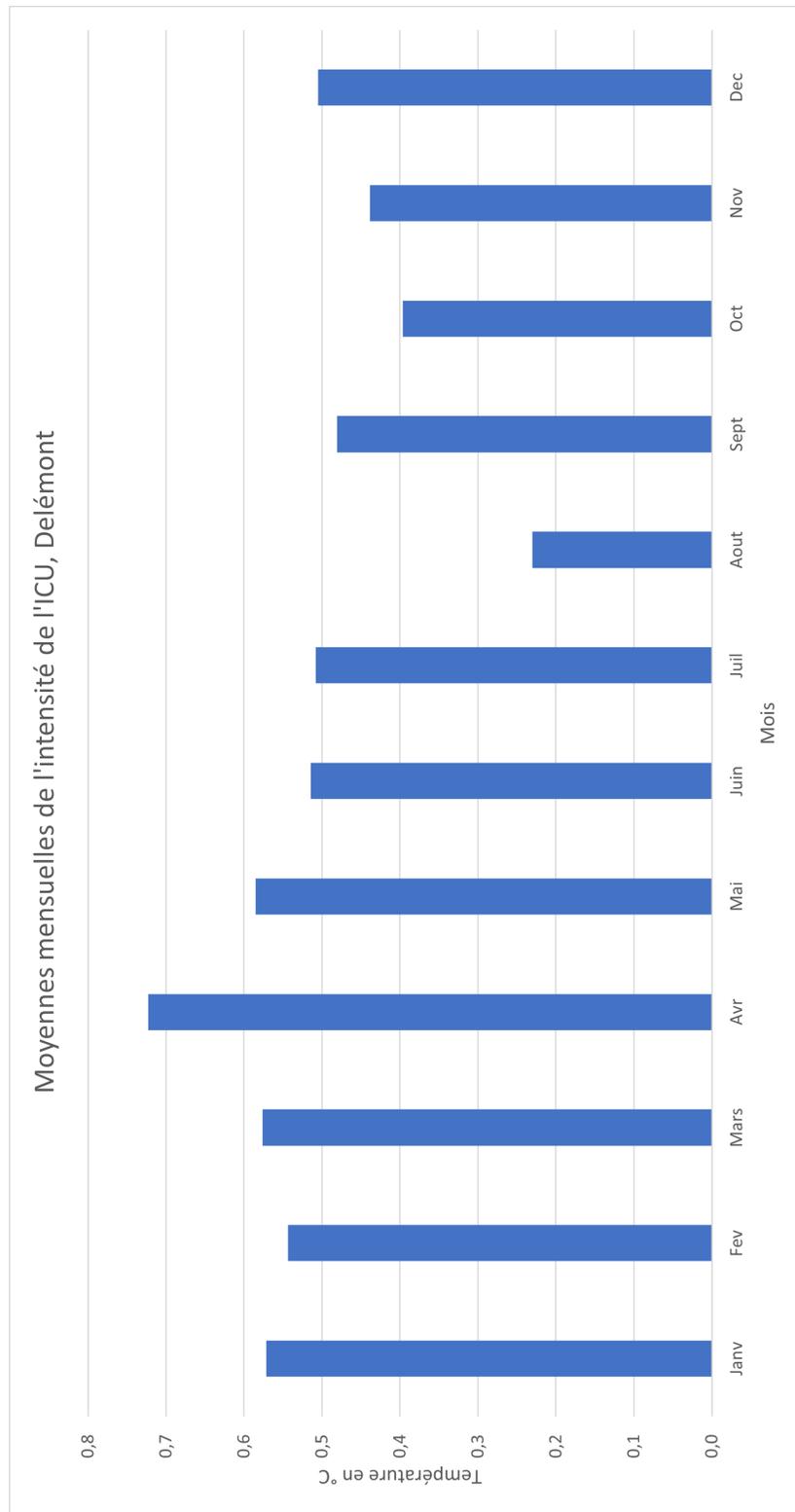


FIGURE 11 – Moyennes mensuelles de l'intensité de l'ICU sur la période 2013-2019, Delémont

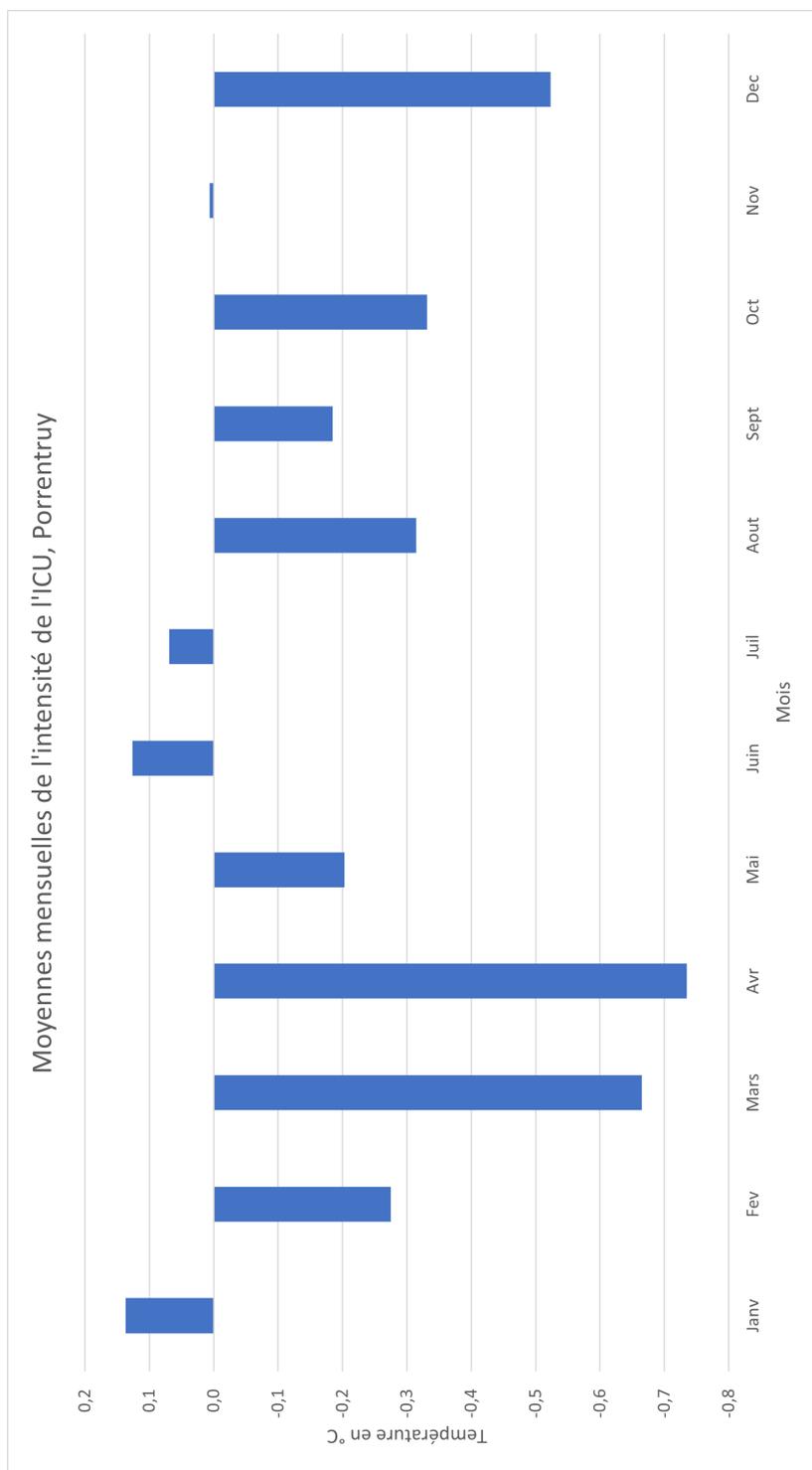


FIGURE 12 – Moyennes mensuelles de l'intensité de l'ICU sur la période 2013-2019, Porrentruy

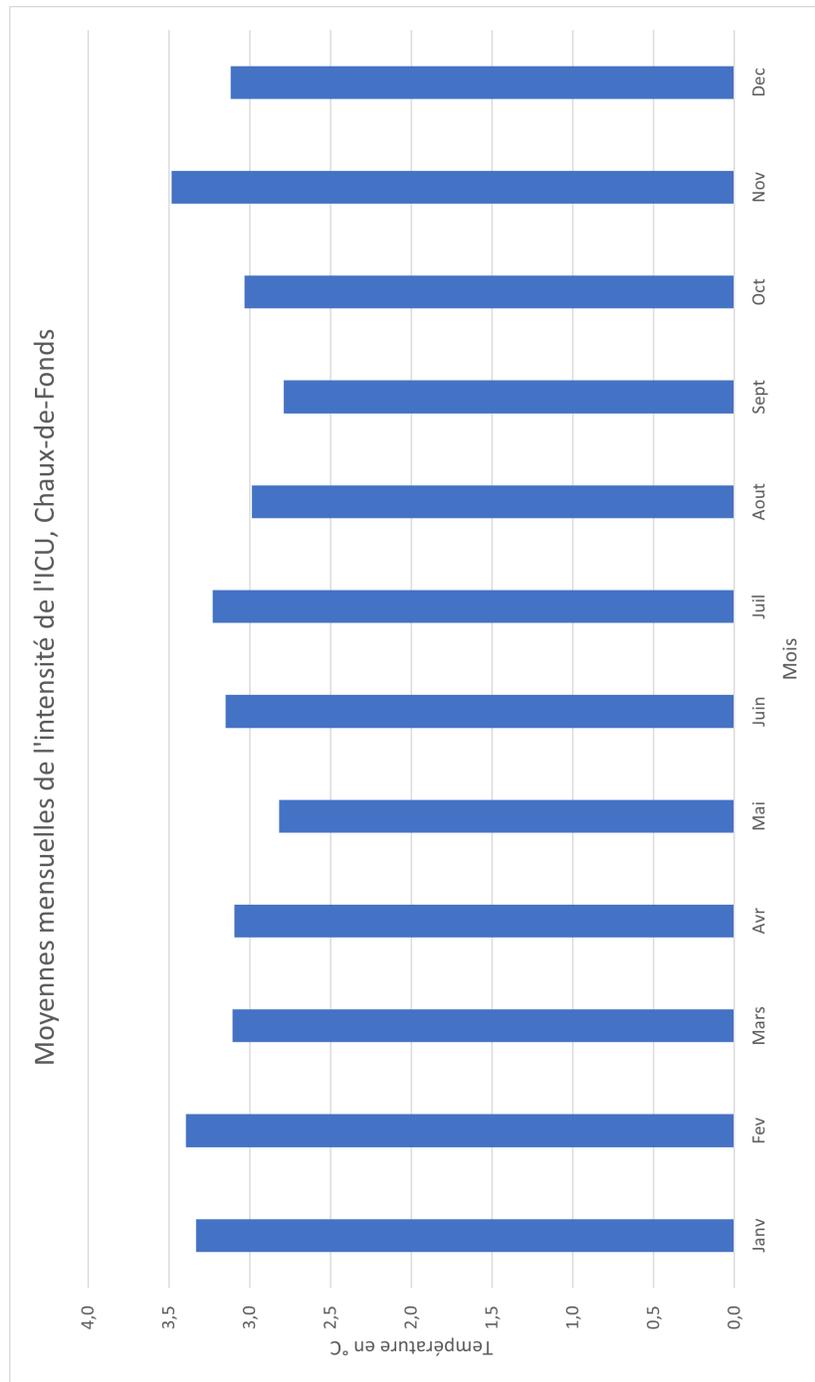


FIGURE 13 – Moyennes mensuelles de l'intensité de l'ICU sur la période 2013-2019, Chaux-de-Fonds

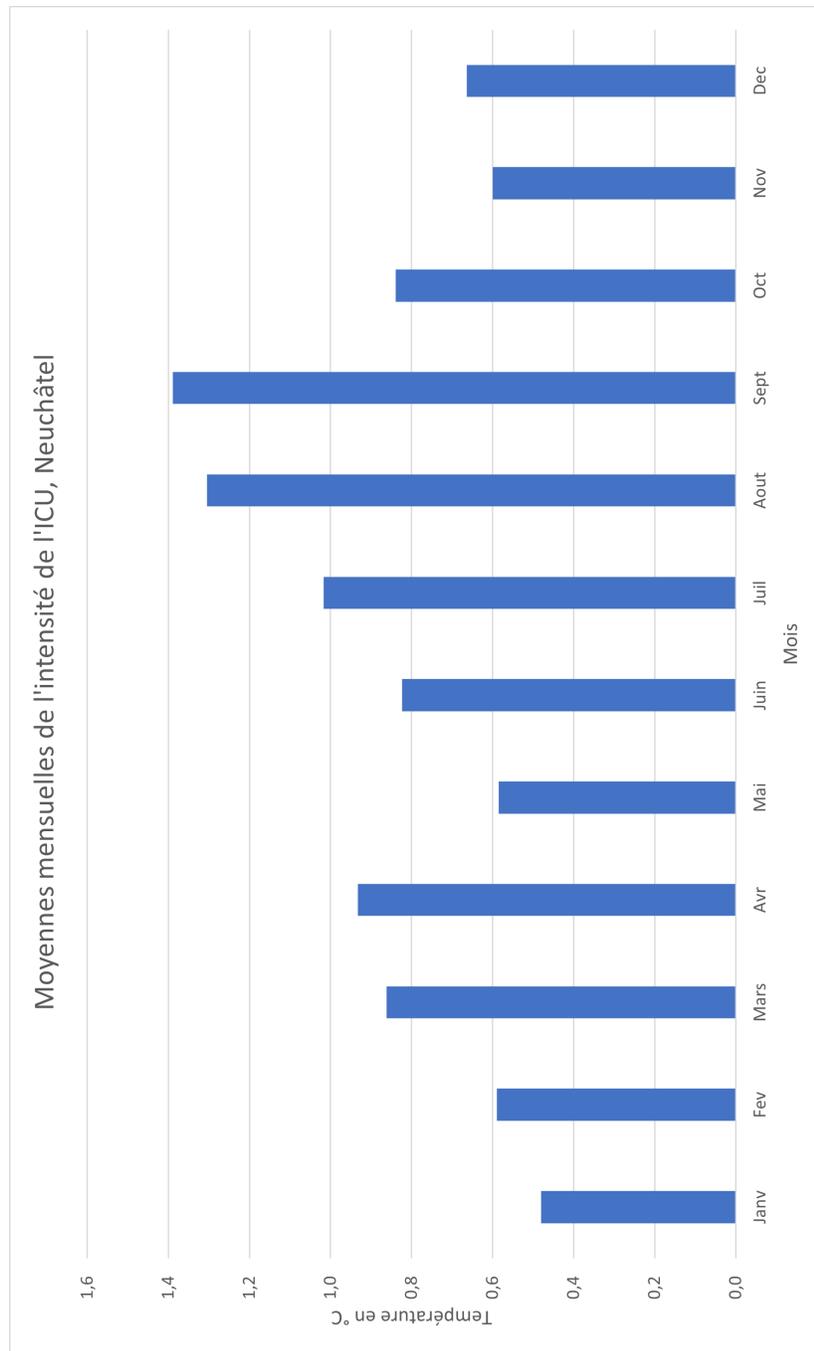


FIGURE 14 – Moyennes mensuelles de l'intensité de l'ICU sur la période 2013-2019, Neuchâtel

Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure de MétéoSuisse de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Cressier.

### 5.3 Heures des maxima et des minima de l'intensité des ICU

Ce sous-chapitre présente les heures auxquelles les maxima et les minima de l'intensité de l'ICU de chaque ville par mois ont lieu. Ceci permet d'observer si l'intensité est maximale durant la nuit comme pour les 5 grandes villes de Suisse ou à un autre moment de la journée et si les minima apparaissent en matinée, une fois que les villes se sont refroidies. De plus, il est possible d'observer s'il y a une régularité entre les différents mois et quelles sont les différences saisonnières.

La *figure 15* présente les heures des maxima et minima de l'ICU pour la ville de Delémont. Il est visible que depuis janvier, l'heure où les maxima apparaissent augmente progressivement pour atteindre le moment le plus tard de la journée aux mois de juin et juillet à 22h pour ensuite redescendre jusqu'à décembre et atteindre le même horaire que janvier à 17h. Les maxima de l'ICU n'ont pas lieu durant la nuit, mais en fin de journée lorsque le soleil se couche. Les minima observent une courbe inverse par rapport aux maxima. Les mois d'hiver ont les minima les plus tardifs, vers 13h et ceux d'été entre 8h et 10h. Les minima sont mesurés quelques heures après le lever du soleil.

La *figure 16* montrent les heures des maxima et minima de l'ICU pour la ville de Porrentruy. Les heures des maxima sont similaires à ceux de Delémont, avec ceux des mois de juin et juillet ayant lieu à 20h. Pour les mois précédents, janvier possède le maxima qui se produit le plus tôt, à 16h, puis les heures augmentent progressivement jusqu'en juin. Après le mois d'août, les heures des maxima diminuent pour atteindre à nouveau 16h en novembre et décembre. Cela signifie, comme pour Delémont, que les ICU sont les plus intenses lorsque le soleil se couche. Pour les minima, l'heure de mesure est toujours entre 7h et 10h. Comme pour Delémont, les minima les plus tardifs sont en hiver, avec novembre à 9h et décembre à 10h. Les mois où le minima est le plus tôt sont en été avec ceux de juin et juillet. Il est visible que les minima de l'ICU apparaissent quelques heures après le lever du soleil.

La Chaux-de-Fonds possède des résultats similaires à Porrentruy et Delémont, comme cela est visible sur la *figure 17*. Les deux courbes ont une forme identique et les heures correspondent pour la plupart à celles de Delémont. En effet, les maxima les plus tardifs sont en été avec 22h pour juin et juillet et les moins tardifs sont en fin et début d'année, avec 17h pour janvier, novembre et décembre. Pour les minima, il y a quelques différences, notamment le mois de mai où il apparaît à la même heure qu'en juin et juillet, c'est-à-dire à 7h. Les minima les plus tardifs sont janvier et décembre à 11h. Il apparaît donc que les minima de l'ICU se produisent aussi quelques heures après le lever du soleil et les maxima lorsque le soleil se couche.

La *figure 18* présente les heures des minima et maxima de l'ICU à Neuchâtel. Les résultats sont ici complètement différents des 3 autres villes. Les maxima ont lieu plusieurs heures après le coucher du soleil, la plupart se produisant au milieu de la nuit. Les mois du printemps et d'été ont les heures les plus tardives, en prenant le coucher du soleil comme point de départ. Les maxima d'avril, mai et juin ont lieu à 5h, alors que pour février, c'est minuit. Janvier et décembre ont les maxima les plus tôt, respectivement 22h et 21h. Même si ces résultats sont bien différents des 3 autres villes, ils ressemblent à ceux des 5 grandes villes de Suisse avec les maxima apparaissant durant la nuit plutôt qu'en fin de journée. Pour les minima, il est plus compliqué d'établir une tendance tant les résultats varient d'un mois à l'autre. De manière générale, ils sont plus tardifs que les 3 autres villes avec des minima pouvant se produire en fin d'après-midi, comme juillet à 17h ou encore février à 16h. En Outre, il est visible que tous les minima se situent entre 9h et 17h, avec 9 mois au-delà de 12h. Cela signifie qu'ils apparaissent bien après le lever du soleil. Cependant, il est visible par exemple que pour le mois de juin, seulement 4h séparent le maxima et le minima de l'ICU. Cela signifie que l'ICU s'affaiblit rapidement en début de matinée en juin. À l'opposé, pour le mois de février, 16h sont observées entre les deux valeurs. Cela montre que les résultats de Neuchâtel fluctuent et sont moins régulières que les autres villes pour ce qui concerne les maxima et les minima.

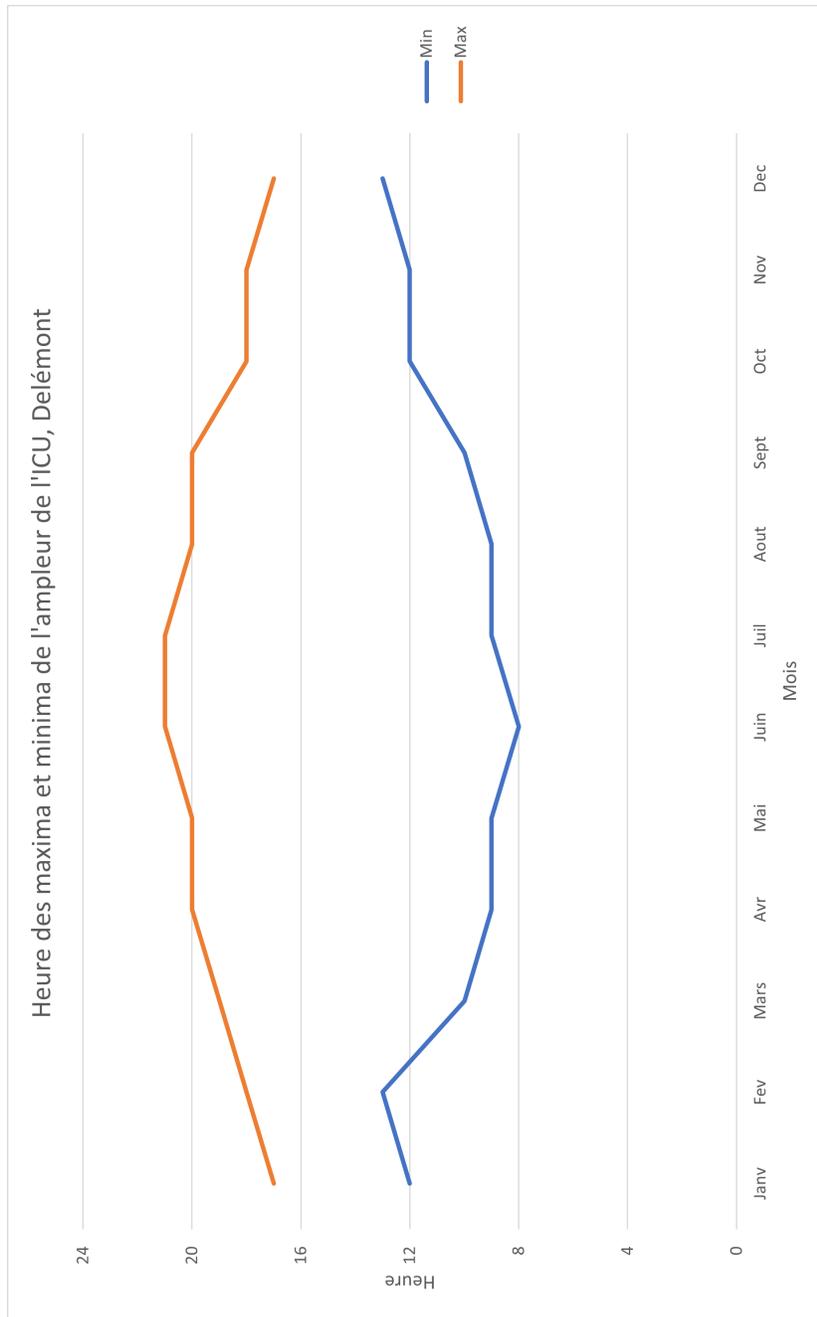


FIGURE 15 – Heure des maxima et minima de l'ampleur de l'ICU par mois, période 2013-2019, Delémont

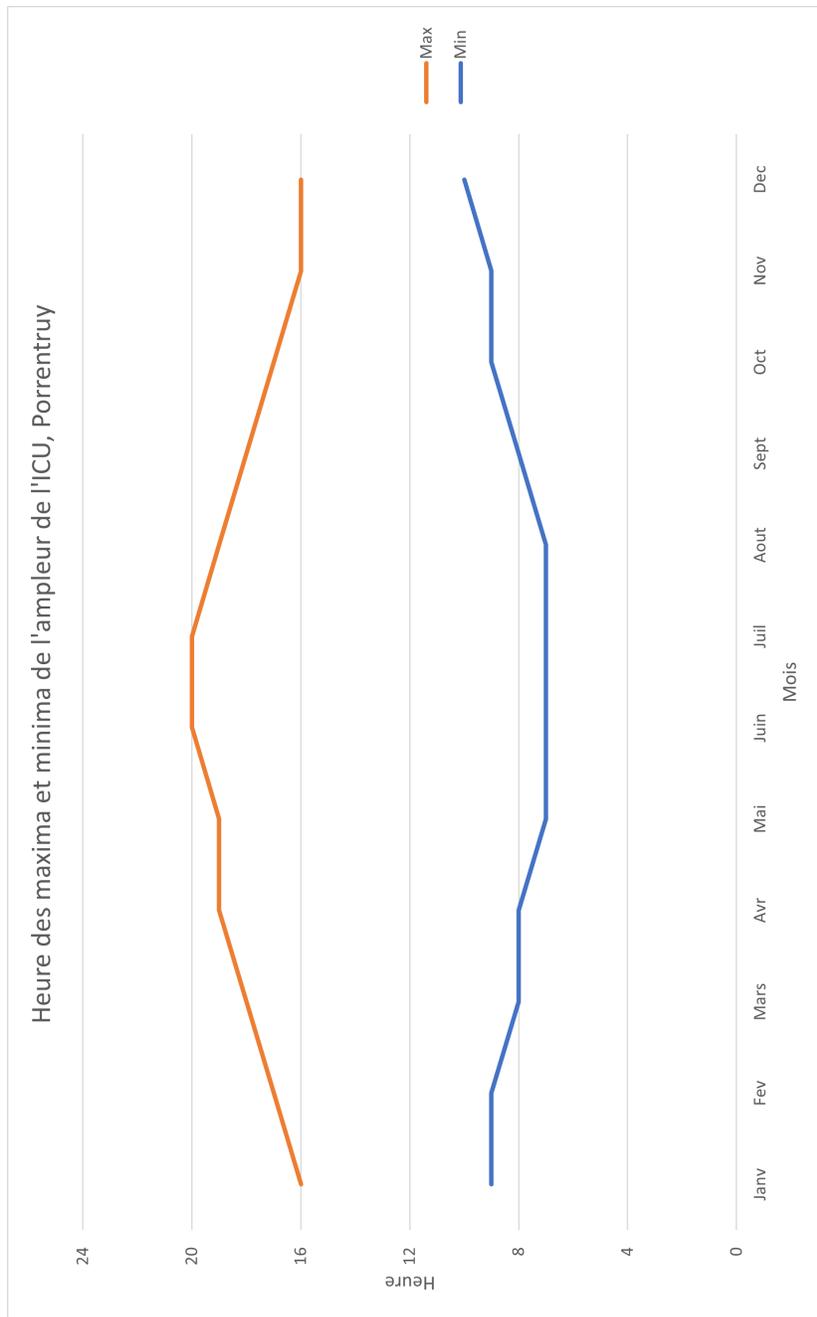


FIGURE 16 – Heure des maxima et minima de l'ampleur de l'ICU par mois, période 2013-2019, Porrentruy

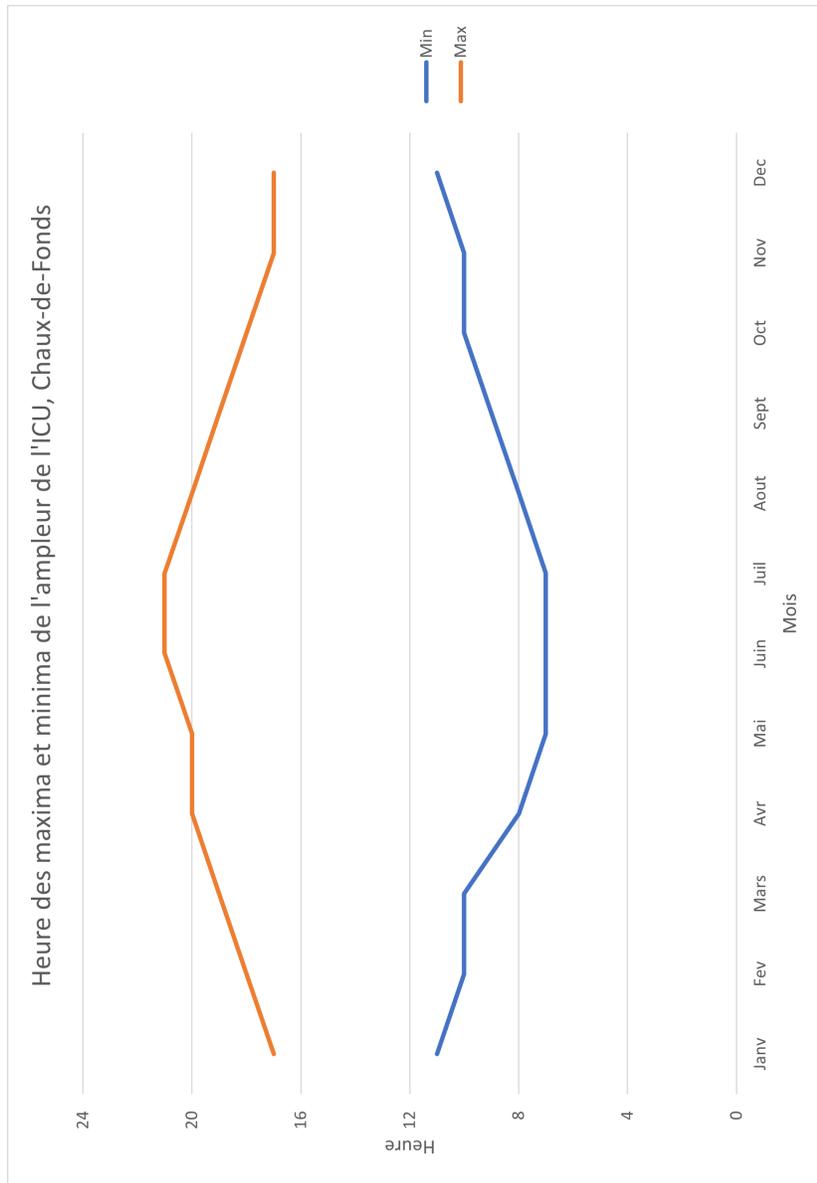


FIGURE 17 – Heure des maxima et minima de l'ampleur de l'ICU par mois, période 2013-2019, Chaux-de-Fonds

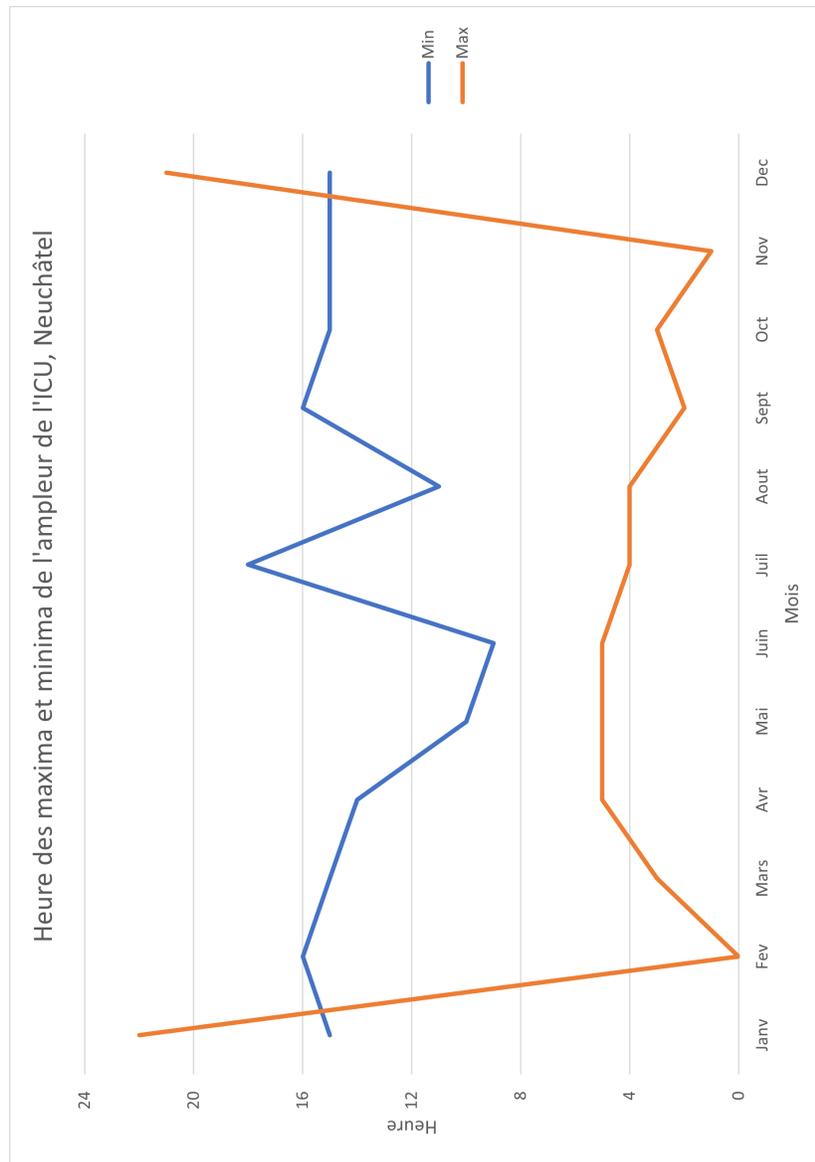


FIGURE 18 – Heure des maxima et minima de l’ampleur de l’ICU par mois, période 2013-2019, Neuchâtel

Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure de MétéoSuisse de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Cressier.

## 5.4 Moyennes horaires de l'intensité des ICU

Dans ce sous-chapitre, il est question d'observer la variation de l'intensité de l'ICU sur la période mesurée. Les résultats sont présentés heure par heure et permettent d'analyser l'ampleur de l'ICU, mais également la régularité ou non des variations. Ces *figures 19 à 22* sont très pertinentes pour observer quels sont les mois avec les plus grandes variations et quels sont les mois avec les intensités les plus élevées. Ce graphique présente plus précisément le comportement de l'ICU sur la période observée. L'axe des abscisses est en heures. Cela signifie que 24 représente 1 mois, en débutant par celui de janvier.

La *figure 19* présente les résultats de la ville de Delémont. Les mois avec les intensités les plus élevées sont avril, mai, juin et juillet, dépassant  $1.8^{\circ}\text{C}$ . Cela signifie qu'à son pic, en moyenne, l'ICU est pratiquement  $2^{\circ}\text{C}$  plus chaud que la périphérie de la ville. Même en hiver, l'ICU est présent, avec le mois de mars atteignant  $1.6^{\circ}\text{C}$ . Il est visible que l'ICU varie régulièrement au cours de la période analysée, avec une ampleur plus importante au printemps et en été. Pour tous les mois sauf janvier, les amplitudes de l'ICU descendent au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$  durant la matinée lorsque la ville devient plus froide que la campagne environnante.

La *figure 20* illustre les variations de l'intensité de l'ICU de la ville de Porrentruy. Les variations sont plus nettes que pour la ville de Delémont et les amplitudes plus importantes. Par exemple, le mois de juin a un pic d'intensité qui atteint presque  $2.5^{\circ}\text{C}$ , alors qu'ensuite il descend à  $-2^{\circ}\text{C}$ . Les intensités de l'ICU sont en moyenne plus élevées que Delémont. L'ICU est en moyenne le plus intense en été et le plus faible en hiver à Porrentruy. Il est bien présent durant toute l'année.

Les résultats pour la ville de La Chaux-de-Fonds sont montrés sur la *figure 21*. Comme pour les deux villes précédentes, la variation de l'intensité de l'ICU est bien visible pour chaque mois. L'ampleur est très importante, sans aucun mois avec des valeurs inférieures à  $0^{\circ}\text{C}$ . Il est visible que le mois de juillet possède un ICU maximal de presque  $4.5^{\circ}\text{C}$  pour ensuite descendre jusqu'à  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Les mois qui atteignent l'ICU le plus intense sont au printemps, en été et le mois de novembre, similairement aux autres villes. Ce graphique confirme que La Chaux-de-Fonds détient les ICU les plus intenses des 4 villes étudiées. L'ICU est également présent toute l'année.

La *figure 22* illustre les variations de l'ICU de Neuchâtel. Ce sont les mois de juillet, août et septembre qui possèdent l'intensité la plus élevée. Les amplitudes de chaque mois varient, les mois d'hiver et d'automne ayant une amplitude d'environ  $1^{\circ}\text{C}$  et ceux du printemps et de l'été de  $2^{\circ}\text{C}$ . L'ICU est bien présent toute l'année et il est rare que les températures descendent en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ , comme cela est visible sur la *figure 20*.

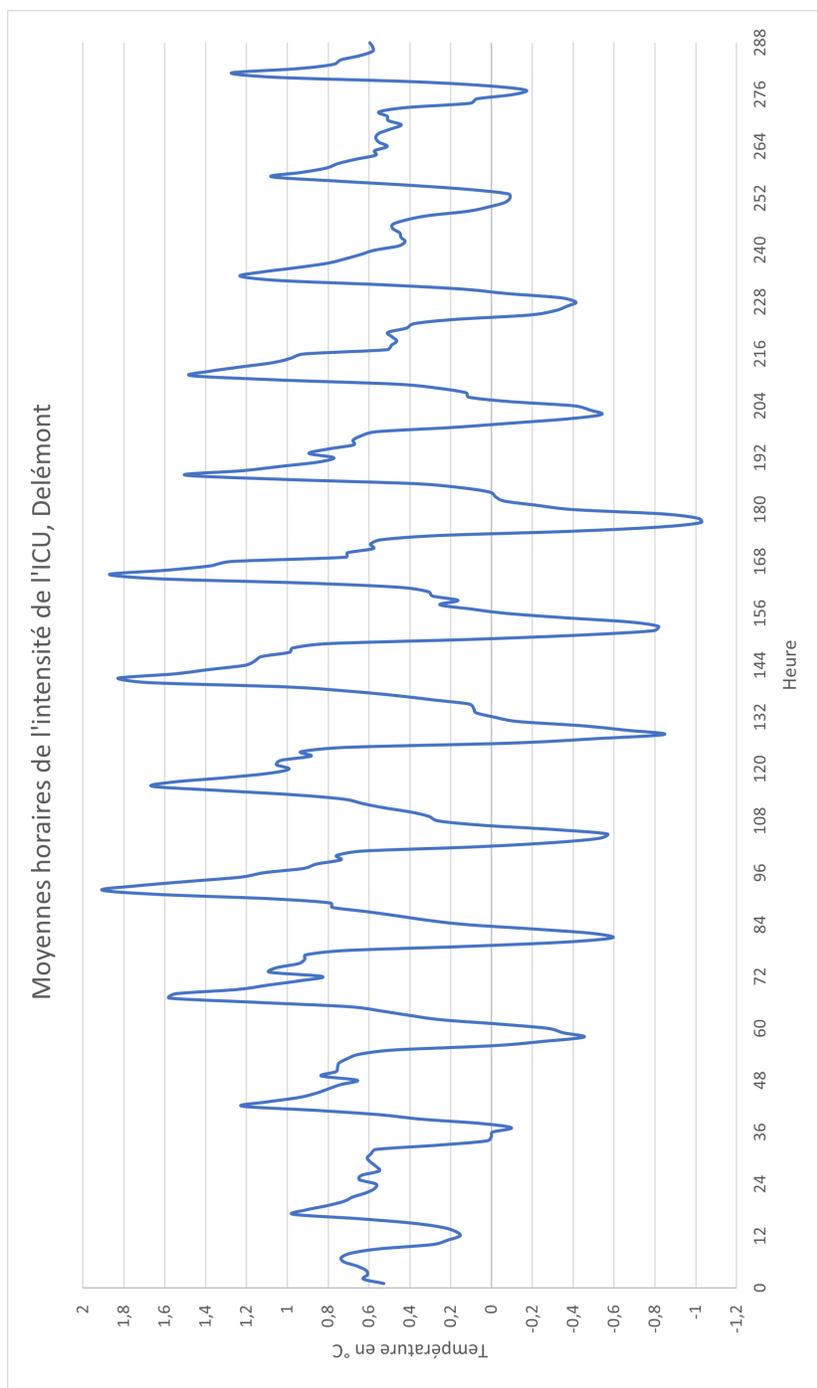


FIGURE 19 – Moyennes horaires de l'intensité de l'ICU, période 2013-2019, Delémont

Les variations moyennes de l'amplitude pour un mois sont représentées sur cette figure par un cycle de 24 heures. De ce fait, sur l'axe des abscisses, 0 à 24 représente le mois de janvier, 25 à 48 le mois de février jusqu'au mois de décembre, de 265 à 288.

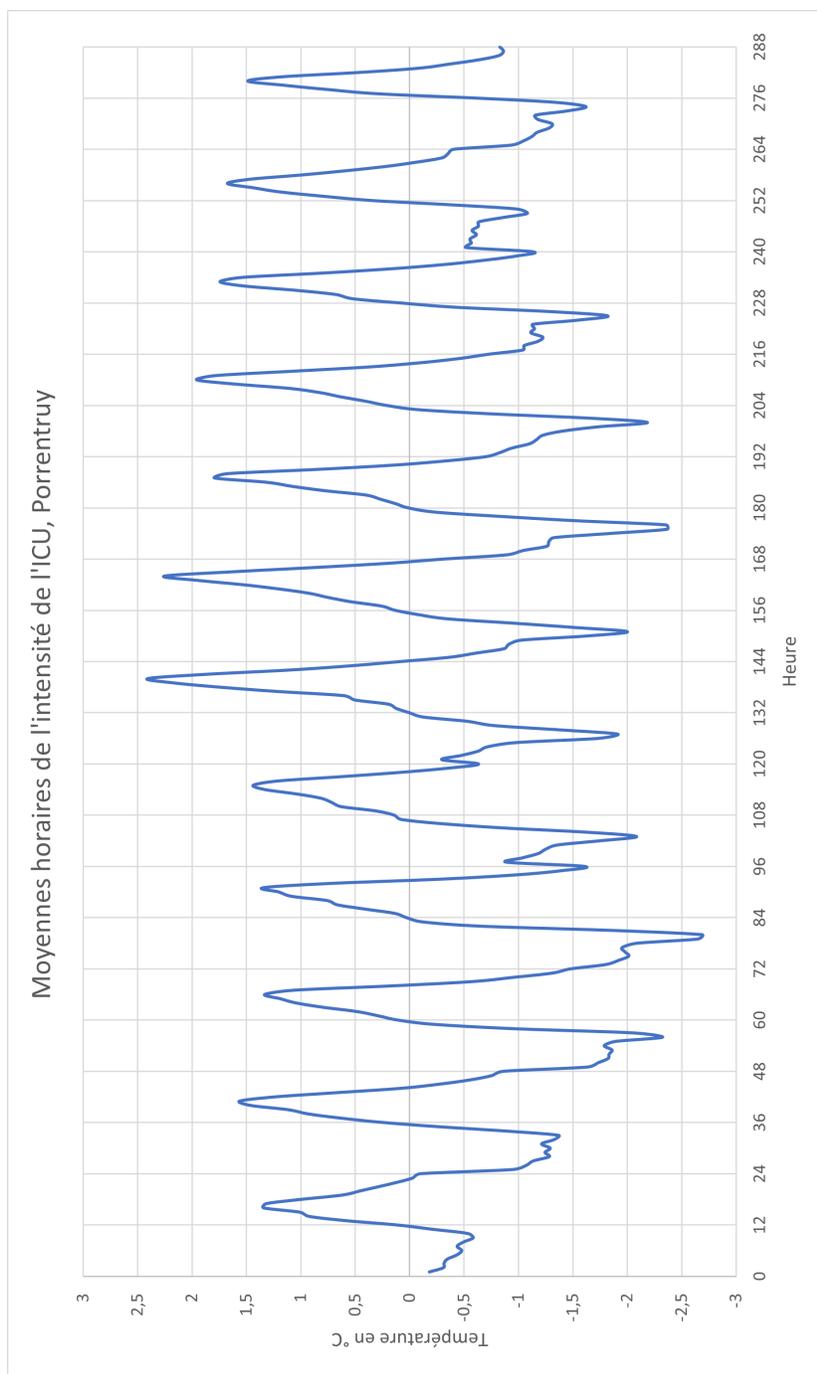


FIGURE 20 – Moyennes horaires de l'intensité de l'ICU, période 2013-2019, Porrentruy

Les variations moyennes de l'amplitude pour un mois sont représentées sur cette figure par un cycle de 24 heures. De ce fait, sur l'axe des abscisses, 0 à 24 représente le mois de janvier, 25 à 48 le mois de février jusqu'au mois de décembre, de 265 à 288.

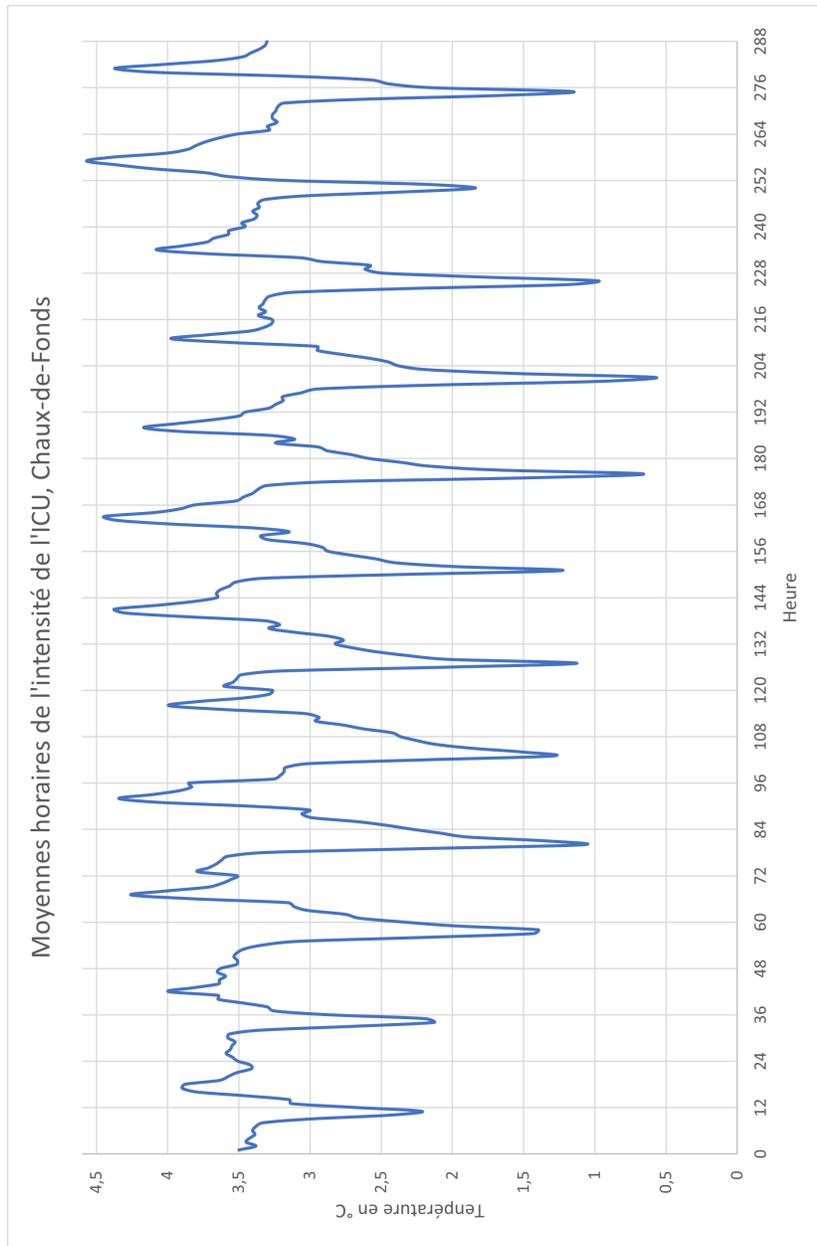


FIGURE 21 – Moyennes horaires de l'ampleur de l'ICU, période 2013-2019, Chaux-de-Fonds

Les variations moyennes de l'amplitude pour un mois sont représentées sur cette figure par un cycle de 24 heures. De ce fait, sur l'axe des abscisses, 0 à 24 représente le mois de janvier, 25 à 48 le mois de février jusqu'au mois de décembre, de 265 à 288.

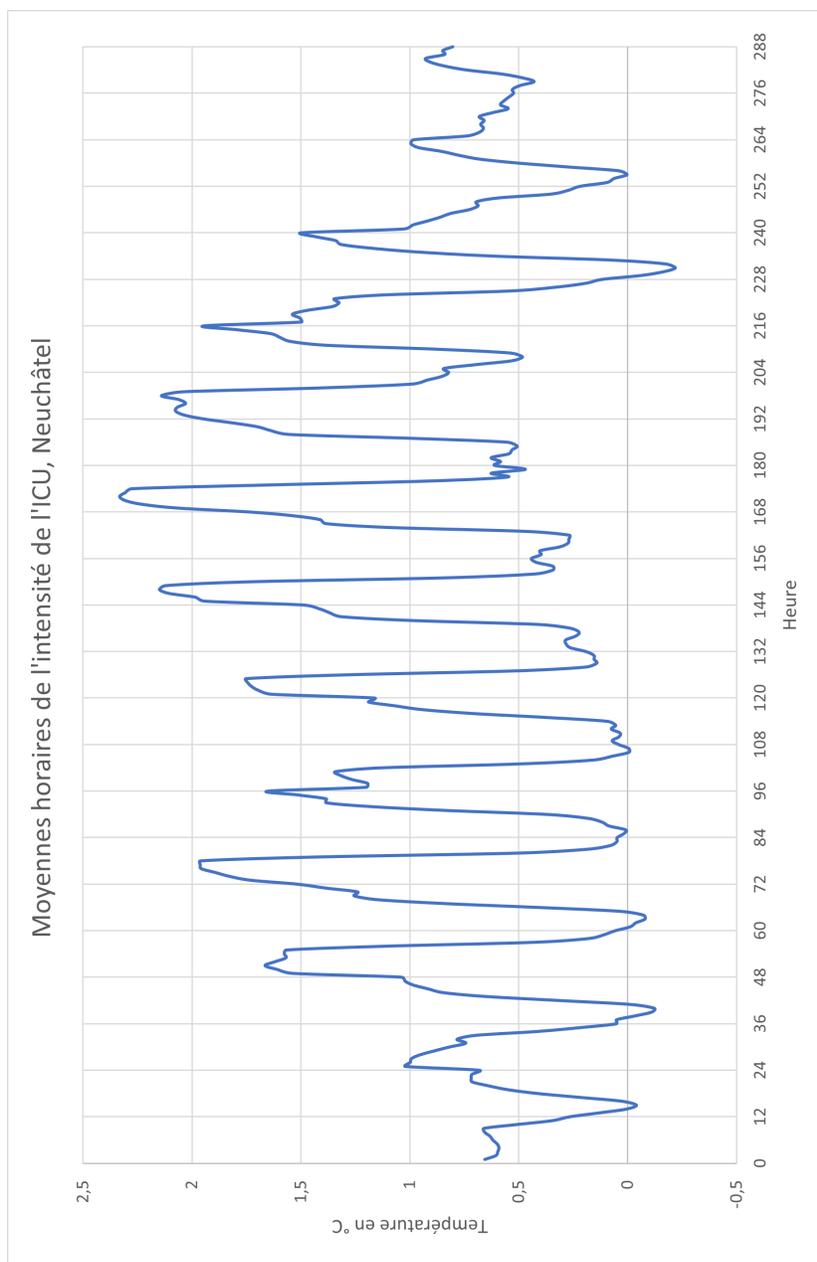


FIGURE 22 – Moyennes horaires de l'ampleur de l'ICU, période 2013-2019, Neuchâtel

Les variations moyennes de l'amplitude pour un mois sont représentées sur cette figure par un cycle de 24 heures. De ce fait, sur l'axe des abscisses, 0 à 24 représente le mois de janvier, 25 à 48 le mois de février jusqu'au mois de décembre, de 265 à 288. Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure de MétéoSuisse de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Cressier.

## 5.5 Évolution moyenne de l'intensité de l'ICU, par saison

Ce sous-chapitre présente les variations d'intensité des ICU par saison. Les saisons correspondent aux saisons climatologiques :

- Hiver : janvier, février, mars
- Printemps : avril, mai, juin
- Été : juillet, août, septembre
- Automne : octobre, novembre, décembre

Les *figures 23 à 26* présentent sur 24h la variation de l'ICU pour les 4 villes étudiées, afin de voir quelle saison possède les intensités les plus fortes et les amplitudes les plus grandes. Elles permettent également de voir à quel moment de la journée l'ICU est en moyenne le plus intense.

La *figure 23* présente les résultats pour la ville de Delémont. Il apparaît que les courbes d'été et du printemps sont similaires, de même que celles pour l'hiver et l'automne. Les pics d'intensité montrent que la saison qui possède l'ICU le plus important est le printemps plutôt que l'été. L'amplitude pour ces deux saisons est importante, avec un minimum en dessous de  $0.5^{\circ}\text{C}$  et un maximum supérieur à  $1.5^{\circ}\text{C}$ . La figure présente également le maximum et le minimum de l'intensité de l'ICU vu dans le *sous-chapitre 5.3*. La figure confirme également la présence d'ICU pour les saisons d'automne et d'hiver, bien que leurs intensités et amplitudes soient plus faibles que pour les deux autres saisons. De manière générale, il est visible que l'ICU est effectivement le plus intense en fin de journée lorsque le soleil se couche et au plus bas quelques heures après le lever du jour.

Sur la *figure 24* sont représentés les résultats de la ville de Porrentruy. À la différence de Delémont, les 4 courbes font preuve d'une forte similarité. L'été est la saison qui possède l'intensité et l'ampleur les plus importantes, bien que très proches du printemps et de l'automne. Une différence notable est l'intensité minimale entre les saisons d'été et du printemps et celles de l'hiver et de l'automne. En effet, l'intensité descend à  $-2^{\circ}\text{C}$  pour l'été et le printemps, mais ne dépasse pas  $-1.5^{\circ}\text{C}$  pour les deux autres saisons. L'uniformité des résultats démontre, cependant, que l'ICU est présent de manière plus ou moins équivalente toute l'année sans de grandes différences entre les saisons. L'heure de l'intensité maximale et minimale diffère, mais cela correspond au lever et au coucher du soleil des saisons.

Les résultats de la ville de La Chaux-de-Fonds sont visibles sur la *figure 25*. Comme pour Porrentruy, les courbes ont une forte similitude. La différence principale réside dans l'heure des maxima et minima comme cela a déjà été décrit dans le *sous-chapitre 5.3*. Il apparaît également que la saison avec l'intensité moyenne la plus importante est l'automne, même si les valeurs sont très proches des autres saisons. L'amplitude est également importante, mais cela a déjà été exposé dans le *sous-chapitre 5.4*. Ce que la figure démontre, comme pour les 2 villes précédentes, est que le temps nécessaire pour atteindre l'intensité maximale est plus important en été et au printemps que pour les deux autres saisons. Cette figure confirme également que l'ICU est présent tout le temps et durant toutes les saisons.

Comme il a été décidé de présenter les figures de ce sous-chapitre de minuit à minuit, la *figure 26* qui présente les résultats de Neuchâtel est différente des trois autres villes parce que les intensités maximales et minimales ne se produisent pas à la même heure. Cela révèle ce qui avait déjà été observé dans le sous-chapitre des heures des maxima et minima, à savoir que Neuchâtel possède des intensités maximales plusieurs heures après le coucher du soleil, au milieu de la nuit. Ce qui est également visible est que l'été possède les intensités les plus fortes devant le printemps. Les deux autres saisons ont des résultats très proches. Les courbes montrent également que les ICU sont les plus faibles vers midi et jusqu'en début d'après-midi avant que l'air ne se réchauffe. Mais l'intensité ne descend jamais en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . Le retard dans l'établissement de l'ICU à Neuchâtel par rapport aux 3 autres villes étudiées pourrait résulter d'un effet du lac qui retarde le réchauffement des températures à Neuchâtel par rapport à la station de Cressier située à une certaine distance du lac.

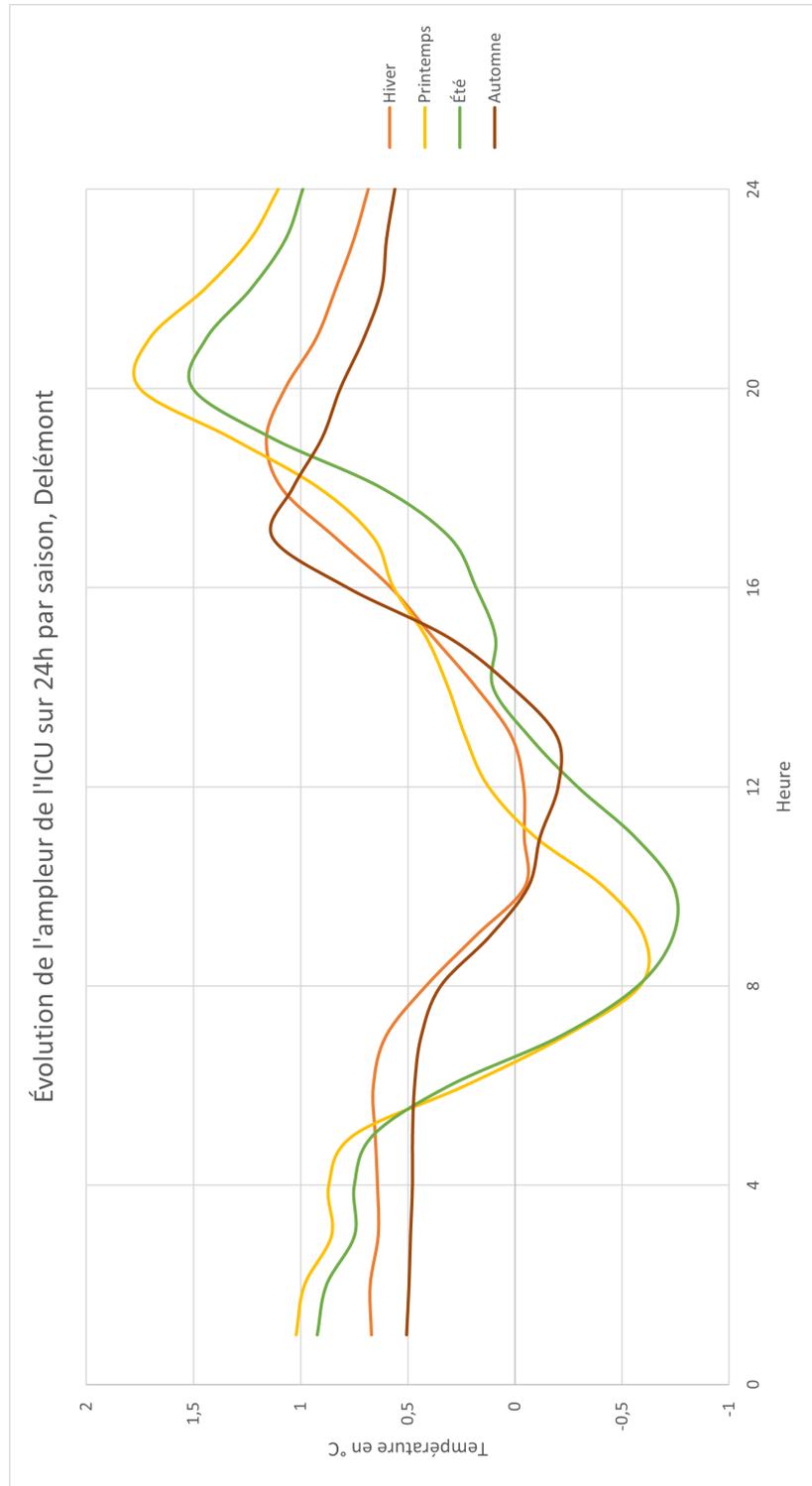


FIGURE 23 – Évolution de l'ampleur de l'ICU sur 24h, moyenne par saison, Delémont

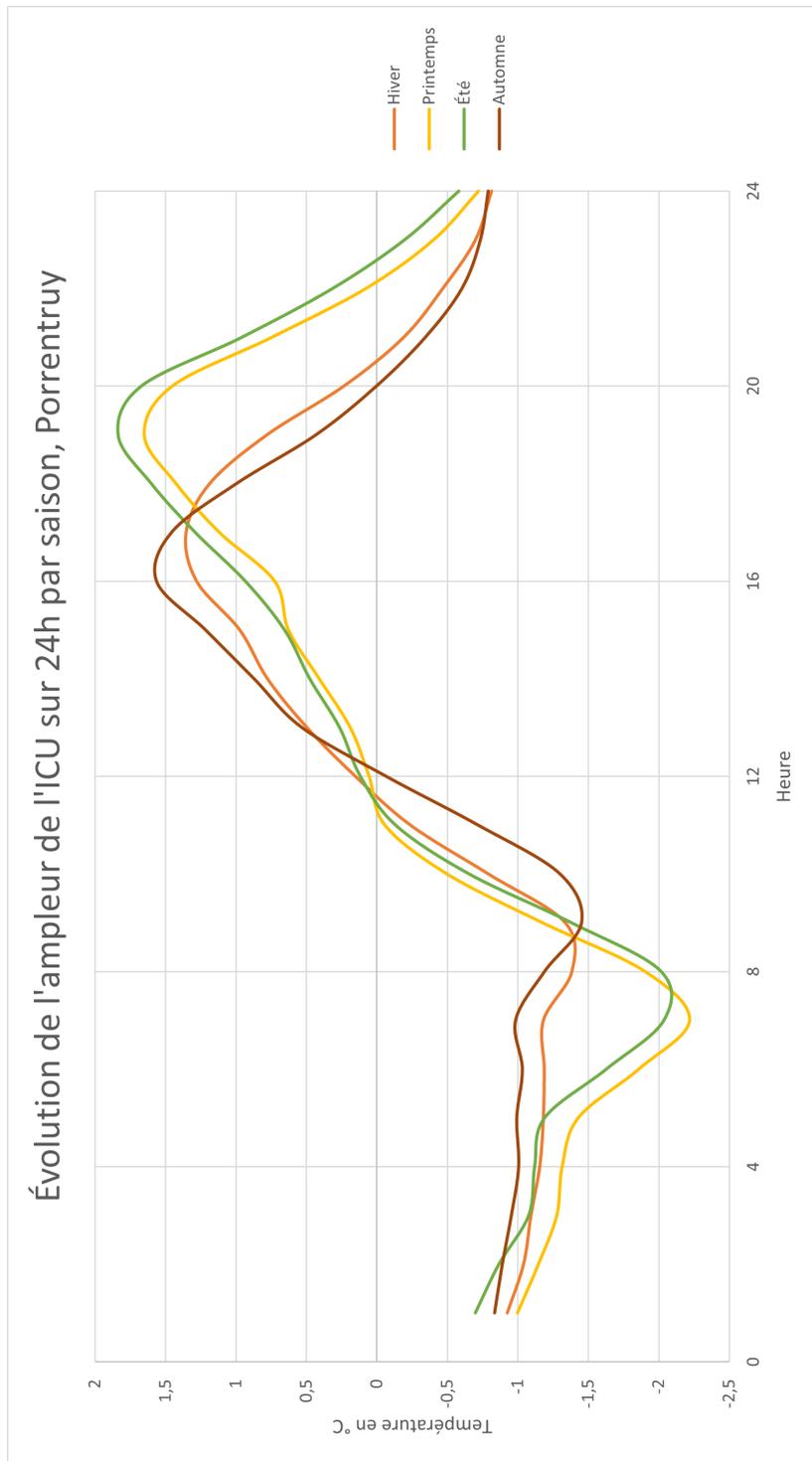


FIGURE 24 – Évolution de l’ampleur de l’ICU sur 24h, moyenne par saison, Porrentruy

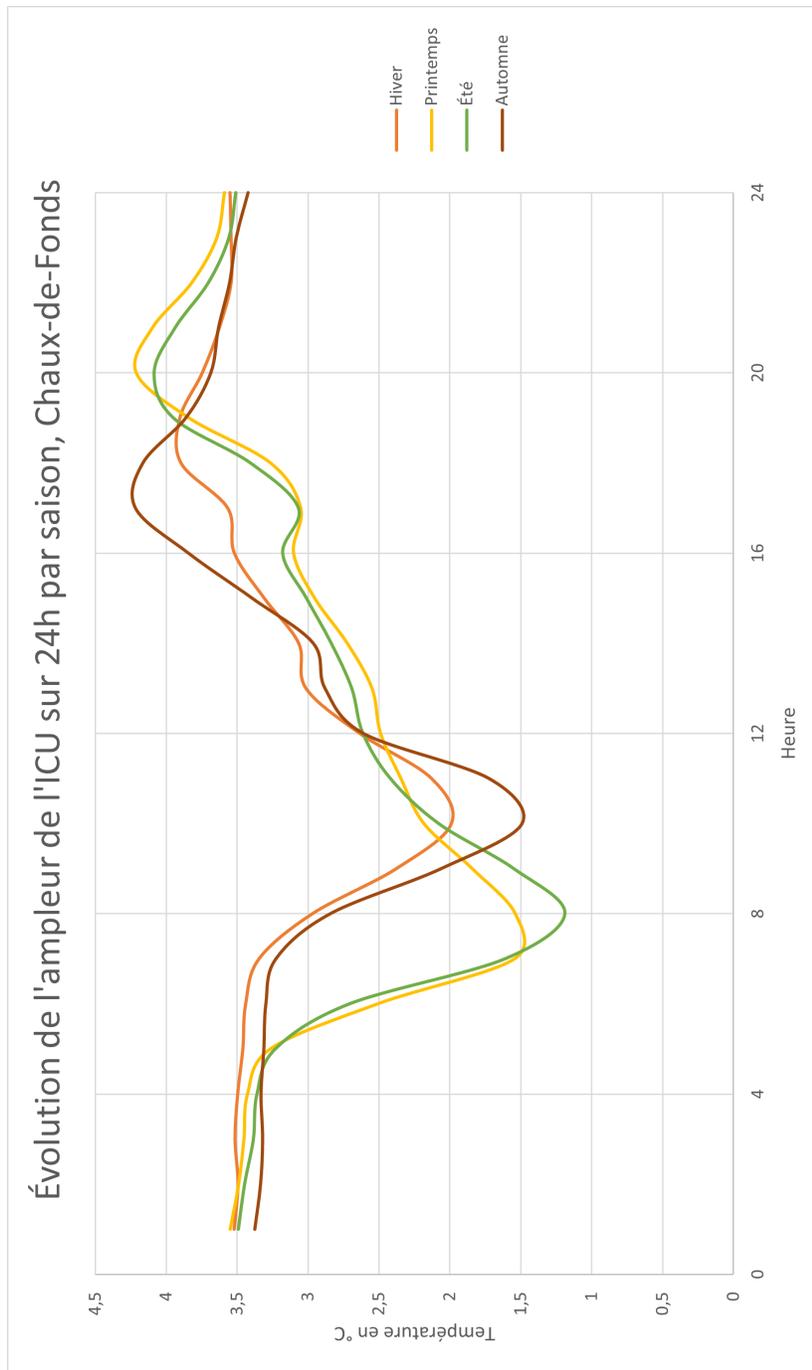


FIGURE 25 – Évolution de l'ampleur de l'ICU sur 24h, moyenne par saison, Chaux-de-Fonds

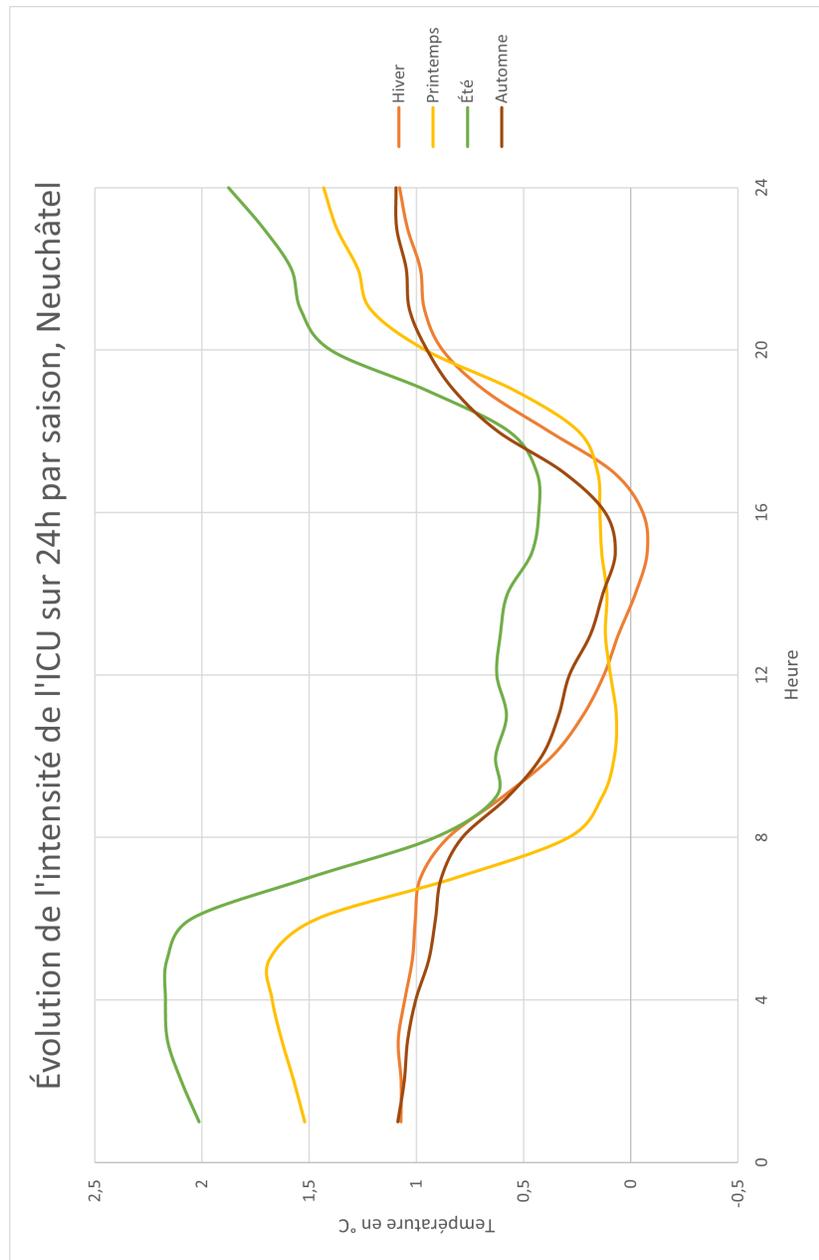


FIGURE 26 – Évolution de l'ampleur de l'ICU sur 24h, moyenne par saison, Neuchâtel

Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure de MétéoSuisse de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Cressier.

## 5.6 Les 20 ICU ponctuels les plus intenses

Ce sous-chapitre présente les 20 valeurs horaires les plus élevées des ICU mesurées dans chaque ville comme cela a été expliqué dans le chapitre *Méthodologie*.

Le *tableau 3* présente les 20 valeurs horaires les plus élevées de l'ICU de la ville de Delémont. L'intensité la plus élevée atteinte est de 3.544°C et a eu lieu à 17h. La plupart des valeurs de l'ICU les plus élevées dans ce tableau se rencontrent en fin de journée et en début de soirée, ce qui coïncide avec les heures des maxima de l'ICU observées précédemment pour cette ville (cf. chapitre 7.3). Outre 3 entrées, le vent est inférieur à 10 km/h, ce qui correspond à celui mesuré lors de situation anticyclonique.

TABLEAU 3 – Les 20 ICU les plus intenses de la période 2013-2019, Delémont

| Date et heure  | Ampleur ICU °C | T°C centre ville | T°C périphérie | Vent (km/h) |
|----------------|----------------|------------------|----------------|-------------|
| 20.01.17 à 17h | 3.544          | -4.056           | -7.6           | 1.1         |
| 29.08.17 à 17h | 3.543          | 30.343           | 26.8           | 2.2         |
| 09.07.15 à 20h | 3.535          | 19.435           | 15.9           | 2.2         |
| 14.03.17 à 17h | 3.535          | 15.535           | 12             | 1.8         |
| 08.05.16 à 19h | 3.530          | 18.33            | 14.8           | 2.5         |
| 06.05.16 à 20h | 3.529          | 14.329           | 10.8           | 1.8         |
| 28.06.16 à 20h | 3.528          | 21.328           | 17.8           | 3.6         |
| 28.06.18 à 4h  | 3.528          | 22.328           | 18.8           | 3.6         |
| 25.05.17 à 20h | 3.526          | 25.326           | 21.8           | 9.4         |
| 07.04.15 à 17h | 3.524          | 12.424           | 8.9            | 12.2        |
| 27.06.18 à 22h | 3.524          | 18.724           | 15.2           | 3.6         |
| 29.01.19 à 14h | 3.523          | 6.423            | 2.9            | 5.8         |
| 12.12.17 à 05h | 3.522          | 6.022            | 2.5            | 10.1        |
| 22.05.17 à 18h | 3.521          | 25.621           | 22.1           | 5.4         |
| 14.01.14 à 06h | 3.520          | 6.52             | 3              | 1.4         |
| 28.01.15 à 14h | 3.519          | 7.419            | 3.9            | 13.0        |
| 17.10.15 à 01h | 3.519          | 6.319            | 2.8            | 2.2         |
| 23.08.17 à 17h | 3.518          | 31.118           | 27.6           | 4.0         |
| 03.09.13 à 17h | 3.518          | 26.318           | 22.8           | 9.0         |
| 26.08.17 à 18h | 3.513          | 29.213           | 25.7           | 3.6         |

Sur le *tableau 4*, les résultats de la ville de Porrentruy sont présentés. L'ICU le plus intense est légèrement supérieur à Delémont, à 3.96°C. Les heures correspondent, elles aussi, pour la plupart, à la fin de journée, juste après le coucher du soleil. Le vent est également faible, à part pour deux entrées. Les situations météorologiques sont aussi anticycloniques pour les valeurs mesurées.

TABLEAU 4 – Les 20 ICU les plus intenses de la période 2013-2019, Porrentruy

| <b>Date et heure</b> | <b>Ampleur ICU °C</b> | <b>T°C centre ville</b> | <b>T°C périphérie</b> | <b>Vent (km/h)</b> |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|
| 11.06.14 à 19h       | 3.96                  | 25.86                   | 21.9                  | 6.5                |
| 02.07.15 à 17h       | 3.96                  | 34.66                   | 30.7                  | 5.8                |
| 19.09.15 à 12h       | 3.96                  | 17.06                   | 13.1                  | 10.8               |
| 24.08.17 à 13h       | 3.96                  | 25.86                   | 21.9                  | 18.0               |
| 04.09.15 à 18h       | 3.96                  | 17.96                   | 14                    | 7.2                |
| 10.07.13 à 19h       | 3.95                  | 24.35                   | 20.4                  | 4.3                |
| 05.06.14 à 20h       | 3.95                  | 15.15                   | 11.2                  | 3.2                |
| 12.06.14 à 17h       | 3.94                  | 27.54                   | 23.6                  | 9.4                |
| 24.06.14 à 18h       | 3.94                  | 23.04                   | 19.1                  | 4.0                |
| 30.06.14 à 19h       | 3.94                  | 17.44                   | 13.5                  | 1.4                |
| 07.01.13 à 14h       | 3.94                  | 6.54                    | 2.6                   | 2.4                |
| 12.12.13 à 14h       | 3.94                  | 10.14                   | 6.2                   | 3.7                |
| 14.04.15 à 18h       | 3.93                  | 19.93                   | 16                    | 4.7                |
| 31.12.15 à 19h       | 3.93                  | 9.63                    | 5.7                   | 0.7                |
| 10.04.17 à 00h       | 3.93                  | 16.33                   | 12.4                  | 8.6                |
| 18.11.17 à 15h       | 3.93                  | 6.13                    | 2.2                   | 9.8                |
| 19.10.17 à 02h       | 3.92                  | 15.62                   | 11.7                  | 5.0                |
| 12.01.18 à 13h       | 3.92                  | 6.72                    | 2.8                   | 1.1                |
| 13.11.13 à 14h       | 3.92                  | 7.12                    | 3.2                   | 7.4                |
| 06.11.16 à 16h       | 3.92                  | 5.92                    | 2                     | 6.3                |

Les résultats de La Chaux-de-Fonds présentés sur le *tableau 5* montrent des intensités de l'ICU bien supérieures aux deux villes précédentes. Il apparait que les ICU les plus intenses ne se produisent pas tous en fin de journée ou en soirée, mais qu'ils peuvent être mesurés à n'importe quel moment de la journée. Pour le vent, à part deux entrées, les valeurs sont inférieures à 10 km/h.

TABLEAU 5 – Les 20 ICU les plus intenses de la période 2013-2019, La Chaux-de-Fonds

| Date et Heure  | Ampleur ICU °C | T°C centre ville | T°C périphérie | Vent (km/h) |
|----------------|----------------|------------------|----------------|-------------|
| 09.09.13 à 13h | 5.25           | 19.15            | 13.9           | 7.6         |
| 31.01.13 à 03h | 5.25           | 9.55             | 4.3            | 3.2         |
| 24.09.13 à 23h | 5.25           | 13.65            | 8.4            | 1.8         |
| 01.07.16 à 19h | 5.2            | 22.7             | 17.5           | 1.8         |
| 12.09.16 à 16  | 5.2            | 24.3             | 19.1           | 9.0         |
| 16.01.15 à 01h | 5.2            | 9                | 3.8            | 12.6        |
| 21.01.17 à 12h | 5.15           | 6.75             | 1.6            | 0.0         |
| 27.11.16 à 02h | 5.15           | 4.95             | -0.2           | 1.8         |
| 01.12.16 à 03h | 5.15           | -0.75            | -5.9           | 0.4         |
| 06.01.13 à 13h | 5.1            | 7.9              | 2.8            | 5.4         |
| 20.01.14 à 00h | 5.1            | 5.3              | 0.2            | 2.9         |
| 11.02.14 à 23h | 5.1            | 2.7              | -2.4           | 2.9         |
| 16.08.19 à 19h | 5              | 20               | 15             | 2.5         |
| 02.06.19 à 23h | 5              | 17.7             | 12.7           | 0.7         |
| 28.05.17 à 01h | 5              | 17.6             | 12.6           | 0.0         |
| 12.12.18 à 03h | 5              | -4.2             | -9.2           | 2.9         |
| 10.01.13 à 02h | 5              | 5.8              | 0.8            | 1.7         |
| 08.12.13 à 10h | 4.9            | 1.8              | -3.1           | 2.2         |
| 20.06.14 à 16h | 4.9            | 20.6             | 15.7           | 9.0         |
| 07.07.15 à 16h | 4.85           | 33.2             | 28.3           | 14.0        |

Pour terminer le chapitre *Résultats*, le *tableau 6* présente les résultats de Neuchâtel. Les valeurs sont entre celles de Delémont et Porrentruy avec un ICU maximal de 3.8°C. Les moments où à laquelle les ICU les plus intenses ont été mesurés se situent plusieurs heures après le coucher du soleil, ce qui coïncide avec les heures des maxima de l'ICU décrits dans le *chapitre 7.3*. De nouveau, à part deux entrées, le vent mesuré est inférieur à 10 km/h.

TABLEAU 6 – Les 20 ICU les plus intenses de la période 2013-2019, Neuchâtel

| Date et heure  | Ampleur ICU °C | T°C centre ville | T°C périphérie | Vent (km/h) |
|----------------|----------------|------------------|----------------|-------------|
| 01.11.17 à 19h | 3.8            | 8.3              | 4.5            | 2.9         |
| 01.04.19 à 22h | 3.8            | 11.4             | 7.6            | 2.4         |
| 15.04.15 à 19h | 3.8            | 16.7             | 12.9           | 3.1         |
| 17.03.14 à 19h | 3.7            | 21.2             | 17.5           | 2.1         |
| 08.07.16 à 01h | 3.7            | 17.6             | 13.9           | 12.3        |
| 26.10.17 à 18h | 3.6            | 14.1             | 10.5           | 4.5         |
| 26.08.18 à 21h | 3.6            | 14               | 10.4           | 7.1         |
| 29.09.16 à 19h | 3.6            | 19.4             | 15.8           | 8.3         |
| 24.07.19 à 05h | 3.6            | 20.9             | 17.3           | 6.4         |
| 17.06.13 à 20h | 3.5            | 20.1             | 16.6           | 3.7         |
| 17.04.14 à 20h | 3.5            | 10.6             | 7.1            | 9.2         |
| 21.09.18 à 00h | 3.4            | 18.1             | 14.7           | 11.7        |
| 13.05.13 à 22h | 3.4            | 12.5             | 9.1            | 4.9         |
| 01.04.14 à 06h | 3.3            | 8.3              | 5              | 6.3         |
| 09.06.14 à 23h | 3.3            | 21.3             | 18             | 4.5         |
| 12.04.15 à 04h | 3.3            | 7.9              | 4.6            | 7.3         |
| 30.06.15 à 20h | 3.3            | 26.8             | 23.5           | 5.3         |
| 09.06.17 à 02h | 3.3            | 13.3             | 10             | 6.4         |
| 09.03.18 à 21h | 3.3            | 9.3              | 6              | 3.3         |
| 01.05.19 à 23h | 3.2            | 10.5             | 7.2            | 7.2         |

## 6 Discussion

Ce chapitre analyse en détails les résultats présentés dans le *chapitre 5* et répond aux hypothèses de la *Problématique*. Chaque ville est analysée séparément en comparant principalement les valeurs obtenues pour chacune avec celles des 5 grandes villes de Suisse. Bien que de manière très générale, les résultats de chaque ville se ressemblent, il y a quand même des disparités qui font que les réponses aux hypothèses ne sont pas toutes identiques. Comme cela a été dit au début de la *Problématique*, le postulat de départ, à savoir que toutes les villes possèdent un ICU (Deilami et al., 2018), est confirmé pour ces 4 villes. Il est donc vraisemblable que ce soit également le cas pour toutes les villes de Suisse.

### 6.1 Delémont

Les deux stations de mesures utilisées pour la ville de Delémont étant proches l'une de l'autre, avec des conditions similaires, mis à part le fait que le capteur de température de la station de MétéoSuisse soit ventilée, il apparaît sur les différentes figures que les résultats ne comportent pas de valeurs anormales ou inexplicables. De ce fait, la ville de Delémont est appropriée pour servir de comparaison aux trois autres villes en plus de celles du rapport de Gehrig et al (2018). Les intensités moyennes mensuelles de l'ICU de la ville de Delémont sont toutes inférieures à 1°C. En été, les moyennes se situent entre 0.5°C et 0.2°C. Les moyennes horaires montrent également que le pic d'intensité ne dépasse jamais les 2°C. De ce fait **l'hypothèse 1** est validée. Cette réponse s'explique principalement par le fait que Delémont est une ville plus petite et moins dense<sup>8</sup>. Les mois avec les intensités moyennes de l'ICU les plus élevées ce rencontrent au printemps, notamment le mois d'avril avec la moyenne la plus haute à 0.7°C. Mai et juin sont comparables à juillet et septembre, mais août est nettement inférieur. En regardant les moyennes horaires, il s'avère que mai possède le pic le plus intense, mais seulement 0.1°C plus haut qu'août et 0.2°C que juillet. De ce fait, **l'hypothèse 2** n'est pas validée. La *figure 23* confirme cela. En effet, il est visible que les intensités de l'ICU sont en moyenne plus élevées au printemps et pas en été. La *figure 15* montre que l'intensité maximale ne se produit pas la nuit, mais en fin de journée ou en soirée peu de temps après le coucher du soleil. De ce fait, **l'hypothèse 3** n'est pas validée, car les ICU ne sont pas plus intenses durant la nuit, au contraire des 5 grandes villes de Suisse. Les réponses aux hypothèses démontrent que Delémont possède des ICU aux comportements différents des 5 grandes villes de Suisse malgré certaines similitudes. Cela se confirme avec les 20 valeurs les plus intenses de l'ICU à Delémont présentée+s sur le *tableau 3*, dont la valeur mesurée maximale est de 3.544°C. Dans leur rapport, Gehrig et al (2018) font état de différences de températures pouvant atteindre 7°C. Cela signifie que la ville de Delémont emmagasine moins de chaleur durant la journée et la relâche plus tôt, pour former des ICU plus faibles en intensité.

---

8. <http://www.e6-consulting.fr/les-ilots-de-chaleur-urbains-point-de-vigilance-du-confort-dete/>

## 6.2 Porrentruy

En regardant les intensités moyennes mensuelles de l'ICU à Porrentruy, il est tout de suite visible qu'elles ne ressemblent en rien à celles de Delémont avec 9 mois avec des valeurs négatives. De plus, il n'est pas possible de distinguer une quelconque régularité entre les différents mois. Ces valeurs négatives font penser que l'ICU est faible et moins présent. La *figure 20* démontre pourtant bien que l'ICU existe avec des pics au mois de juin atteignant  $2.5^{\circ}\text{C}$ . Ces moyennes mensuelles négatives s'expliquent par la situation géographique de la station de Fahy présentée dans le chapitre *cadre géographique*. En effet, la station de MétéoSuisse n'étant pas à proximité de Porrentruy, mais sur un haut plateau, les deux lieux ne sont pas sujets aux mêmes influences météorologiques. Porrentruy est plus exposée à des accumulations d'air froid que Fahy. De ce fait, les températures de Fahy peuvent être supérieures à celles de Porrentruy, bien qu'étant à la campagne. L'utilisation de la *figure 12* est de ce fait moins pertinente à utiliser pour répondre aux hypothèses. En revanche, la *figure 20* illustre des pics d'intensité de  $1^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $2.5^{\circ}\text{C}$ . Par conséquent, **l'hypothèse 1** est validée. Les ICU de Porrentruy sont moins intenses que ceux des 5 grandes villes de Suisse. Le *tableau 4* confirme cette analyse. En effet, bien que les ICU les plus intenses mesurés avoisinent  $4^{\circ}\text{C}$ , ils n'atteignent pas les  $7^{\circ}\text{C}$  des 5 grandes villes de Suisse. Encore une fois, la raison principale est la taille et la densité de la ville. Sur la *figure 22*, il est visible qu'en moyenne, l'été est le mois avec les ICU les plus intenses. Ainsi, **l'hypothèse 2** est validée. Cependant, cette différence n'est pas nette et il apparaît que l'intensité du printemps est très proche de celle de l'été. De plus, bien que l'hiver et l'automne possèdent des courbes décalées en terme d'heure des maxima et minima, les intensités atteignent pratiquement les valeurs de l'été. Cette figure montre que les ICU de Porrentruy sont présents de manière plus ou moins équivalente durant toute l'année. Enfin et cela de manière similaire à Delémont, la *figure 14* présente les maxima de l'intensité des ICU qui surviennent en fin de journée, une fois le soleil couché. **L'hypothèse 3** n'est pas validée, car les intensités maximales n'ont pas lieu durant la nuit. Bien que les moyennes mensuelles ne donnent pas de résultats cohérents aux premiers abords, il est visible que les autres figures permettent de répondre pertinemment aux autres hypothèses. Pour terminer, les 20 valeurs des ICU les plus intenses du *tableau 3* montrent également que les pics n'atteignent pas les valeurs des 5 grande villes de Suisse. De manière comparable à Delémont, Porrentruy possède des ICU moins intenses que les grandes villes de Suisse.

### 6.3 La Chaux-de-Fonds

Les moyennes mensuelles de l'intensité de l'ICU de la ville de La Chaux-de-Fonds présentent des valeurs toutes positives en approchant ou dépassant les  $3.0^{\circ}\text{C}$ . Elles sont, de ce fait, significativement plus élevées que celles de Delémont. Il en va de même pour les moyennes horaires visibles sur la *figure 19*. Plusieurs facteurs expliquent cette différence. Tout d'abord, La Chaux-de-Fonds est une ville plus grande que Delémont avec une population plus élevée. De plus, la densité de La Chaux-de-Fonds est de 682 habitants par  $m^2$  contre seulement 557 pour Delémont. Mais il y a également le fait que la station de mesure du SENE se trouve sur une plaque métallique. Comme ceci a été expliqué dans le chapitre *Cadre géographique*, le métal possède un flux de chaleur sensible plus élevé que celui de l'herbe, sur laquelle sont posées les stations de MétéoSuisse, qui ont, en outre des capteurs de température ventilées. Ces deux différences font que l'air du sol se réchauffe davantage durant la journée au soleil à la station du SENE qu'à celle de MétéoSuisse à la Chaux-de-Fonds, ce qui accentue l'OC entre ces 2 stations.

Les intensités des moyennes mensuelles de l'ICU à La Chaux-de-Fonds visibles sur la *figure 13* sont similaires à celles observées pour les 5 grandes villes de Suisse. D'après ces intensités et celles de la *figure 21*, l'**hypothèse 1** n'est pas validée. Cependant, en prenant en compte les spécificités de la station de mesure du SENE, il demeure pertinent de ne pas affirmer que La Chaux-de-Fonds se comporte d'une manière identique à ces villes car les intensités sont amplifiées. De plus, le *tableau 5* montre que les pics d'intensité des ICU dépassent légèrement les  $5^{\circ}\text{C}$  et n'atteignent de ce fait pas les  $7^{\circ}\text{C}$  observés pour les 5 grandes villes de Suisse. C'est pourquoi, plutôt que de valider ou invalider cette hypothèse, la ville de la Chaux-de-Fonds se situe dans un entre-deux en tant que "ville moyenne". Elle possède des ICU plus intenses que Delémont, mais moins que les 5 grandes villes étudiées dans le rapport de Gehrig et al (2018). La *figure 21* démontre que les pics d'intensité sont atteints en mars, avril, juin, juillet et novembre. La *figure 13* confirme plus ou moins cette observation. Pour finir, la *figure 25* corrobore que les pics les plus élevés sont mesurés en automne et au printemps, bien qu'en été ils ne soient que de quelques dixièmes de degrés plus faibles. Avec ceci, l'**hypothèse 2** est invalidée. Il est à noter que, comme pour les deux autres villes, il n'y a pas de saisons significativement plus intenses. Enfin, comme pour Delémont et Porrentruy, la *figure 19* permet de voir que les intensités maximales sont atteintes après le coucher du soleil, en fin de journée et en soirée, et non durant la nuit. De ce fait, l'**hypothèse 3** est invalidée.

La Chaux-de-Fonds est un bon exemple pour démontrer que lorsque la ville grandit et se densifie, les températures mesurées augmentent. Les valeurs tronquées par la station du SENE empêchent toutefois d'avoir une analyse extrêmement précise, mais il est peu probable que les valeurs auraient été identiques à celles de Delémont si la station n'était pas posée sur une plaque métallique. Le *tableau 5* confirme cela, car les ICU les plus intenses sont environ  $2.5^{\circ}\text{C}$  plus élevés que ceux de Delémont ou de Porrentruy.

## 6.4 Neuchâtel

Neuchâtel est dans une configuration différente des trois autres villes étudiées. En effet, comme cela a été mentionné dans le chapitre *cadre géographique*, deux stations de mesures MétéoSuisse ont été utilisées pour effectuer les calculs. De ce fait, les mesures prises pour Neuchâtel ne sont pas au centre ville, mais en périphérie. Il est donc probable que les résultats présentent des ICU trop faibles par rapport à la réalité. Cependant, de manière similaire à La Chaux-de-Fonds, il est possible d'effectuer certaines conclusions et d'analyser la tendance de la ville. Neuchâtel est une ville avec une densité de 1850 habitants par  $m^2$ , donc très supérieure aux trois autres villes. Malgré cela, au regard de la *figure 14*, il apparaît que les moyennes mensuelles des intensités de l'ICU sont un peu plus élevées que celles de Delémont. Le facteur des stations de mesures influence ces résultats. Pour autant, Cressier est sujette à des accumulations d'air froid, contrairement à la station de Neuchâtel située sur un versant à une cinquantaine de mètres au-dessus du lac. Ceci devrait amplifier les valeurs des ICU. Il semblerait que le fait de ne pas avoir une station au centre-ville influence grandement les résultats. Les calculs avec la station du SENE ont été effectués et, malgré les anomalies qui les ont rendu inutilisables pour ce travail, il est possible d'observer des valeurs moyennes mensuelles de plus de  $3^{\circ}\text{C}$  et des pics d'intensités à près de  $5^{\circ}\text{C}$ . Ces résultats sont disponibles dans l'annexe *Résultats non présentés*. Mais cela conforte l'hypothèse que les résultats présentés pour la ville de Neuchâtel dans le *chapitre 7* ont des températures trop basses par rapport à la réalité.

La *figure 14* ainsi que la *figure 22* montrent des pics d'intensité inférieurs à ce qui est visible pour les 5 grandes villes de Suisse. Même en partant du principe que ces valeurs doivent être amplifiées, il ne paraît pas pertinent de penser qu'elles seraient de l'ordre de grandeur de ces villes. C'est pourquoi **L'hypothèse 1** est validée. Les grandes villes de Suisse atteignent des pics d'intensité de  $7^{\circ}\text{C}$  et les ICU de Neuchâtel les plus intenses mesurés sont inférieurs à  $4^{\circ}\text{C}$  comme cela est visible sur le *tableau 6*. Cela confirme que 4 villes étudiées ont des ICU moins intenses que les grandes villes de Suisse. En regardant la *figure 14*, il apparaît que les 3 mois avec les intensités de l'ICU les plus élevées sont juillet, août et septembre. La *figure 26* le confirme. L'été est bien la saison avec les intensités les plus fortes. Le pic surpasse celui du printemps d'environ  $0.5^{\circ}\text{C}$ . **L'hypothèse 2** est validée et pour la première fois, cela apparaît clairement. Pour terminer, il est nécessaire d'analyser la *figure 18* afin de déterminer à quel moment les ICU sont le plus intense. Pour la première fois également, le graphique est différent des autres villes. En effet, la courbe des maxima commencent à 23h pour le mois de janvier puis avance progressivement dans la nuit pour atteindre 5h du matin pour les mois d'avril, mai et juin. Pour les autres mois, excepté décembre, cette situation se situe entre minuit et 1h du matin. Cela montre que les maxima se produisent durant la nuit et non après le coucher du soleil comme pour les autres villes. **L'hypothèse 3** est ainsi validée. Bien que les températures calculées soient inférieures à la réalité, le comportement des ICU ressemble à celui des 5 grandes villes. Neuchâtel est tout de même la 21<sup>e</sup> plus grande ville de Suisse. De par ces analyses, il apparaît que les intensités d'une ville de taille moyenne sont plus faibles que celles d'une grande ville, mais que leurs comportements sont similaires comme cela a été le cas pour La Chaux-de-Fonds.

## 6.5 Discussion générale

Les différents résultats présentés ainsi que leurs analyses ont permis de répondre à la problématique. Les ICU des villes de Delémont, Porrentruy, La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel se comportent différemment de ceux des 5 grandes villes de Suisse. Bien que certaines similitudes spécifiques soient observées, de manière générale, les ICU de ces petites et moyennes villes sont moins intenses, ont leur pic d'intensité plus tôt dans la journée et les ICU les plus intenses ne sont pas nécessairement mesurés en été. Comme démontré dans le chapitre *Problématique*, les études sur les ICU sont souvent associées aux grandes villes, ou en tout cas à des villes avec une population supérieure à celles des 4 villes étudiées dans ce mémoire. C'est pourquoi il était pertinent d'effectuer ces analyses sur des villes de petite et moyenne taille afin de montrer l'existence d'ICU, mais surtout leur intensité. En effet, le postulat de base selon lequel chaque ville possède un ICU (Deilami et al., 2018) est confirmé. Les intensités des ICU, notamment les pics observés, montrent que les températures au centre-ville ont un impact important sur la santé et la qualité de vie, même dans des villes de cette taille. Lors de vague de chaleur importante, l'effet des ICU est amplifié et "Les personnes âgées, les nourrissons et les jeunes enfants, les femmes à partir de 45 ans (selon certaines études), ainsi que les personnes atteintes de maladies chroniques et de troubles psychiatriques figurent parmi les citoyens les plus exposés aux phénomènes de stress thermique, d'insolation, de déshydratation ou d'hyperthermie"<sup>9</sup>. Les ICU amènent un inconfort général, mais aussi des nuits blanches, de l'épuisement voire un décès lorsque la chaleur impacte les systèmes respiratoires et cardiovasculaires. En Suisse et en Europe, cela s'est traduit par une augmentation du nombre de morts lors des vagues de chaleur de 2003, 2015 et 2016. En Suisse, il y a eu une augmentation du taux de mortalité de 6.9% en 2003 et de 5.9% en 2015, soit respectivement 975 et 804 décès supplémentaires. En Europe, pendant l'été 2003, ce sont 70'000 décès de plus qui ont été signalés.<sup>10</sup> Le fait d'avoir trouvé des pics d'intensités des ICU à environ 4°C voire plus pour les 4 villes étudiées montre qu'il est nécessaire d'agir afin de réduire leur impact sur le quotidien des habitants et que cela peut avoir des conséquences importantes sur leur santé. Le fait d'avoir démontré que ces villes possèdent des ICU avec des intensités et saisonnalités variées permet de tenir compte de ces phénomènes lors des décisions prises pour les municipalités concernées afin que ces effets soient atténués. Le prochain chapitre est dédiée à diverses solutions possibles.

---

9. [https://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2020/06/25/la-lutte-contre-les-ilots-de-chaleur-urbains-est-loin-d-etre-gagnee\\_0441624811534.html](https://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2020/06/25/la-lutte-contre-les-ilots-de-chaleur-urbains-est-loin-d-etre-gagnee_0441624811534.html)

10. <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiqués.msg-id-67588.html>

Il est évident que ces analyses comportent des limites. Tout d'abord, le fait que le choix des stations de mesures soit limité et leur emplacement déterminé réduit en partie la qualité des calculs effectués. Idéalement, il aurait fallu avoir des stations au centre-ville dont le rôle principal est la mesure de la température et une autre en périphérie avec une situation géographique identique. Cela n'a pas été le cas pour les 4 villes étudiées. De plus, 30 ans sont nécessaires afin de caractériser une période moyenne de climat alors que pour ce travail, l'analyse s'est faite sur une période de 7 ans. Il est donc important de prendre du recul par rapport aux résultats obtenus. Cependant, les graphiques présentés, notamment ceux des moyennes horaires, démontrent une certaine constance. Il est, de ce fait, impossible de nier que les ICU existent. Si l'on compare les résultats à des images satellites, comme cela a été présenté par l'école polytechnique fédérale de Zürich, il est évident qu'ils manquent de précision.<sup>11</sup> Il aurait également été intéressant et pertinent de comparer les résultats à d'autres villes de taille similaire dans le monde afin d'observer si les résultats sont d'un ordre de grandeur identique ou non. Mais l'objectif principal d'une comparaison entre ces résultats et ceux des 5 grandes villes de Suisse est atteint. De plus, avec les données obtenues, il est possible d'alerter les autorités des 4 villes étudiées dans ce mémoire afin de les avertir de la présence d'ICU.

---

11. <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2017/07/hitzewelle-in-der-stadt.html>

## 7 Solutions

Afin de lutter contre les effets d'îlots de chaleur urbains, une stratégie régulièrement mise en avant et utilisée est celle de la végétalisation. La végétation influence le climat urbain et rend les villes moins vulnérables à la chaleur (Gagot et al., 2013). De plus, la végétalisation contribue à l'amélioration de la qualité de l'air ainsi que de la santé des habitants citadins (Escobedo et al., 2011). En 2018, l'Office fédéral de l'environnement a publié un rapport *Quand la ville surchauffe*<sup>12</sup> afin d'aider les villes à s'adapter aux changements climatiques. Ce rapport propose plusieurs principes de planification et d'urbanisme dans le but de réguler les ICU et de réduire leurs impacts. La Suisse étant un pays fédéraliste, il appartient aux cantons et aux communes de mettre en place ces stratégies.

**Principes de planification :** "Les principes de planification formulent des lignes directrices générales sur la réduction de la concentration de chaleur"<sup>13</sup>. Ce chapitre du rapport propose à la fois des méthodes ou des attitudes à mettre en place, mais aussi des thématiques concrètes.

- 1 Développer une structure urbaine et des espaces ouverts en réseau en fonction du climat : afin d'offrir un environnement de qualité aux habitants d'une ville, il est nécessaire de prendre en compte les potentielles fortes chaleurs dans la planification du bâti et du non bâti. Une bonne mise en réseau des espaces ouverts est un élément essentiel de cette problématique.
- 2 Les espaces verts sont des *cool spots* : les espaces verts sont essentiels pour rafraîchir un lieu. À partir d'un hectare, ces espaces verts ont un "effet à distance" et atteignent leur impact positif. Cependant, même des petits *cool spots* sont très précieux comme endroit de détente et de séjour pour les habitants. De plus, les personnes peu mobiles et qui souffrent en particulier de la forte chaleur ont besoin d'un accès proche et facile à ces espaces de rafraîchissement.

---

12. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/quand-la-ville-surchauffe.html>

13. *Ibid*

- 3 Les arbres en milieu urbain induisent de grands effets : "Quiconque se tient sous un arbre en cas de forte chaleur ressent l'effet bienfaisant de l'ombre et du refroidissement par évaporation, précisément en comparaison avec d'autres sources d'ombre" (OFEV, 2018). Les arbres sont essentiels pour réduire les fortes chaleur dans un espace urbain. Le journal le Monde a publié un article qui explique que de plus en plus de "villes-forêt" émergent car les grandes "métropoles développent des projets de végétalisation, pour rafraîchir les villes." <sup>14</sup> Dans cet article, Anaïs Prével, architecte paysagiste affirme "qu'un arbre, c'est 5 climatiseurs". En plus du rafraîchissement, les arbres ont de multiples fonctions comme absorber le  $CO_2$  et les particules fines, retenir l'eau de pluie et limiter les glissements de terrain. Les arbres en ville ont donc de multiples avantages. Cependant, cet article met aussi en lumière des aspects néfastes lorsque la végétalisation n'est pas faite uniquement pour l'aspect écologique, mais que d'autres facteurs, par exemple économiques ou esthétiques, entrent en jeu. Le résultat n'est alors pas celui attendu. Caroline Mollie, architecte paysagiste s'insurge en expliquant que "sous prétexte de végétaliser la ville, de faire baisser la température, on plante n'importe quoi, n'importe où, n'importe comment. Mais planter des oliviers en pot ne résoudra pas les canicules urbaines, c'est une arnaque".
- 4 L'ombre favorise le confort thermique : elle permet de rafraîchir efficacement un espace urbain. Bien que celle des arbres soit précieuse, l'ombre des bâtiments ou d'autres structures similaires peut également réduire la concentration de la chaleur. Il est, de ce fait, nécessaire d'intégrer l'ombre comme facteur de confort thermique et d'augmenter la part de l'espace urbain qui est ombragé.
- 5 La désimperméabilisation apporte de la fraîcheur : l'accumulation de chaleur dans le sous-sol peut être réduite par de la verdure, des matériaux naturels ou encore une grande perméabilité du sol. Un échange hydrique entraîne un effet de refroidissement et est accru par des sols imperméabilisés. De ce fait, toute forme de désimperméabilisation est bénéfique dans les zones de forte chaleur.
- 6 L'eau est précieuse : la régulation thermique est fortement influencée par les plans d'eau. Ces derniers ont un effet bénéfique sur le climat et le bien-être des habitants d'une ville. Combinée avec par exemple des *cool spots*, l'eau offre le plus grand bénéfice à une ville ou un espace urbain. De plus, les eaux qui s'écoulent lors de fortes précipitations ont la possibilité d'être retenues afin d'irriguer les espaces verts ou les arbres et ainsi créer une valeur ajoutée.

---

14. [https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/11/14/urbanisme-la-poussee-des-villes-forets-divise-les-architectes-paysagistes\\_6059724\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/11/14/urbanisme-la-poussee-des-villes-forets-divise-les-architectes-paysagistes_6059724_3234.html)

**Principes d'Urbanisme** : ils portent sur des règles concrètes et des propositions d'action pour le développement urbain et des espaces ouverts.

- 1 Développer un système optimal de circulation de l'air frais : cela amène des bienfaits sur le climat urbain, mais également d'importantes synergies pour un confort thermique élevé, la biodiversité ou encore l'hygiène de l'air. Afin de mettre tous ces éléments en place, il est important d'éviter les barrières pour les échanges d'air et d'encourager les fonctions mixtes des surfaces afin qu'elles puissent remplir leur rôle dans le système d'écoulement des brises thermiques. Il est également conseillé, lors de nouvelles constructions, de garantir l'apport d'air frais dans les pentes grâce à l'orientation des bâtiments.
- 2 Optimiser la position et la typologie des bâtiments sous l'angle climatique : la hauteur, la longueur et la position des bâtiments influencent le climat extérieur, positivement ou négativement selon les choix. Le plus important est de prendre en compte la régulation thermique dans la planification des structures architecturales dès le début de la planification de la construction. Il est vital de laisser des couloirs de ventilation et de prévoir des bâtiments comme zone d'ombre. De plus, les surfaces fortement exposées au soleil (notamment les routes ou les toits) devraient être prévues avec des matériaux qui absorbent peu la chaleur. Des bâtiments construits en hauteur et élancés avec de généreux espaces ouverts présentent climatiquement de gros avantages par rapport aux complexes de bâtiments larges et plats. De plus, les structures ouvertes permettent une meilleure circulation de l'air et confèrent un lien fonctionnel entre les espaces verts intérieurs et extérieurs. Pour avoir un apport d'air optimal, il est préférable de construire en longueur par rapport à la direction de la ventilation principale.
- 3 Considérer la densification comme une opportunité d'optimisation climatique : mettre en avant le principe du *découplage* qui incite à séparer en grande partie les mesures de construction des effets négatifs sur le climat urbain. Il est possible, en optimisant l'orientation des nouveaux bâtiments, d'améliorer une position défavorable sur le plan climatique. La densification est également un point central, car il a été vu qu'elle était un facteur dominant de l'intensité des ICU. Il est important d'examiner dès le début de la construction si elle est compatible avec la chaleur. Il est important de favoriser les éléments de verdure et d'eau à l'extérieur et sur les bâtiments, car cela contribue grandement à la régulation thermique.
- 4 Optimiser l'interaction des bâtiments et des espaces ouverts : prendre en considération lors des planifications générales le lien étroit entre les bâtiments et les espaces ouverts afin d'optimiser le système de ventilation. Il est possible de développer une synergie importante entre les bâtiments et les espaces ouverts à grande ou petite échelle. Pour optimiser ces interactions, il est possible de désimperméabiliser les surfaces (extérieures ou intérieures), de végétaliser la zone bâtie et d'augmenter l'ombrage par les arbres, d'intégrer l'installation d'irrigation et de rétention d'eau, de limiter la construction souterraine dans les espaces verts ou encore d'utiliser des matériaux de surface avec une forte réflectance et de faibles propriétés de stockage de la chaleur.

Dans son rapport, l'OFEV propose également des exemples concrets de certaines de ces mises en œuvre. C'est le cas, par exemple à Los Angeles, avec le projet *Cool Pavement* où les rues sont repeintes avec un enduit réfléchissant afin de réduire la chaleur que le sol restitue. À Sion, le projet *Acclimatisation* désimperméabilise des surfaces en béton et met en place des zones vertes. Zürich ou encore Bad Polzin en Pologne font preuve de créativité en été afin de créer des zones d'ombre avec des parasols ou des voiles accrochés dans les rues. Pourtant, ces exemples n'aident pas forcément sur le long terme, au contraire des espaces verts et de la (re)végétalisation d'une ville. Sur l'effet des ICU, les arbres agissent principalement par le biais de la création de zones d'ombre et par l'évapotranspiration. Le rayonnement solaire atteignant le sol est réduit par les feuilles et les branches d'arbre à travers la photosynthèse et des mécanisme de réflexion. De plus, les flux d'eau en milieu végétal réduisent également la chaleur, car le passage d'un état liquide à l'état de vapeur nécessite une certaine absorption de chaleur dans l'air (chaleur latente)(Pascal et al., 2019). Dans une revue de littérature de 2013, il est suggéré que l'évapotranspiration végétale et celle de l'agriculture peuvent réduire les températures urbaines de 0.5 à 4°C. Les toits verts, mais aussi les plans d'eau, sont également très efficaces pour réduire la température urbaine. Les effets de refroidissement sur la chaleur ambiante peuvent être de 0.24 à 4.0°C (Qiu et al., 2013).

Les solutions existent, autant pour de nouvelles constructions que pour le réaménagement d'un territoire. Afin de les mettre en place, il est tout d'abord important d'être conscient de la problématique. Avec le nombre toujours croissant d'études sur les îlots de chaleur urbains, il devient toutefois impossible d'ignorer leur existence et leur impact sur la santé et la qualité de vie dans les villes touchées par leurs effets.

## 8 Conclusion

Dans leur rapport de 2018, Gehrig et al (2018) ont analysé les intensités et les moments d'occurrence des îlots de chaleur urbains des 5 grandes villes de Suisse. En partant du postulat que toute ville subit un effet d'ICU (Deilami et al., 2018), la problématique de ce mémoire est d'analyser l'intensité et le comportement des ICU de 4 villes de Suisse de petite et moyenne taille, Delémont, Porrentruy, La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel, afin de voir s'ils sont similaires ou non aux 5 grandes villes de Suisse. Tout d'abord, les résultats ont montré que ces 4 villes subissent des ICU, et ce, durant toute la période étudiée de janvier 2013 à décembre 2019. Les 4 villes possèdent une population, une densité, une localisation géographique et une topographie différente l'une de l'autre ce qui permet d'avoir un échantillon le plus varié possible pour effectuer les analyses sur les ICU. Il n'est pas possible d'affirmer que les phénomènes s'appliquent à toutes les villes de Suisse en ayant analysé ces 4 villes en plus du rapport de Gehrig et al (2018) et d'autres publications scientifiques qui traitent du sujet comme cela a été vu dans le chapitre *Problématique*. Cependant, la littérature tend à prouver que ces effets s'appliquent à toutes les villes et que le postulat de Deilami et al (2018) est correct. De ce fait, affiner les analyses en regardant le comportement des ICU plutôt que leur simple existence est pertinent. Cela permet de se rendre compte de leur intensité, mais également du moment de la journée où la chaleur est la plus forte. Enfin, les ICU sont influencés par diverses caractéristiques, mais la taille de la ville et sa densité sont les plus importantes. C'est pourquoi le choix s'est porté sur des villes de tailles et de densités différentes.

Les réponses à **l'hypothèse 1** sont toutes positives (en prenant compte des anomalies notamment de la ville de La Chaux-de-Fonds par rapport à l'une de ses stations de mesures) et montrent que les ICU des 4 villes analysées dans ce mémoire sont moins intenses que ceux des 5 grandes villes de Suisse. Cependant, bien que plus faibles, les pics d'intensité des ICU peuvent approcher les 4°C dans certaines villes. Cela confirme que par forte chaleur, ces effets sont forts et potentiellement dangereux pour la santé et la viabilité de la ville. Bien que les *figures 21, 22, 23 et 24* présentent les moyennes de l'intensité des ICU par saison, les réponses n'étaient pas uniformes et de ce fait il n'est pas possible d'affirmer ou d'infirmer de manière générale **l'hypothèse 2**, car les réponses varient selon les villes. Pour les 5 grandes villes de Suisse, l'été est la saison avec les intensités les plus fortes. C'est également le cas pour Neuchâtel et Porrentruy. Pour Delémont c'est le printemps et l'automne pour la Chaux-de-Fonds. Cependant, les variations entre les saisons ne sont pas significatives pour les 3 dernières villes. Enfin, les ICU des 5 grandes villes de Suisse atteignent leur pic d'intensité durant la nuit, après que la chaleur se soit accumulée durant la journée. Pensant que ce phénomène serait identique pour les autres villes, **l'hypothèse 3** montre en partie le contraire. Neuchâtel a ses pics d'intensité durant la nuit, mais en moyenne quelques heures avant les villes du rapport de Gehrig et al (2018). En revanche, pour les 3 autres villes, les pics sont atteints en fin de journée, lorsque le soleil se couche. Neuchâtel étant la ville la plus dense et la plus peuplée des villes analysées dans ce mémoire, il apparaît que plus la ville grandit et se densifie, plus l'heure à laquelle le pic des intensités de l'ICU est atteint avance dans la journée.

Comme cela a déjà été mentionné, ce travail comprend des limites. Avec des données provenant d'endroits plus adéquats et précis, il est certain que les résultats seraient meilleurs. Pour rester sur les données, le travail ci-présent a été réalisé en utilisant la température et la vitesse du vent. Afin d'obtenir de meilleurs résultats, il serait possible de combiner ceux obtenus dans le cadre de ce mémoire avec des données plus précises des villes. En effet, comme les facteurs citadins influencent fortement les ICU, en connaissant plus précisément la densité exacte des villes, leur agencement et d'autres types de données urbaines, il serait possible d'obtenir des résultats plus fins et plus précis. Par exemple, en effectuant des images satellites, il serait possible d'observer si l'îlot de chaleur urbain affecte tout le centre ville ou bien des quartiers spécifiques comme cela a été fait pour la ville de Zürich<sup>15</sup>. Le mémoire de master de Coline Bovay (2020) a aussi caractérisé la structure de l'îlot de chaleur urbain dans la ville de Lausanne à partir d'image satellites Landsat. L'ampleur de l'ICU varie fortement d'un quartier à l'autre en fonction de la nature du sol et de la couverture végétale. En décrivant l'existence et les comportements des ICU pour ces villes, cela démontre un danger de viabilité pour leurs habitants, la faune et la flore. Cela permet donc de mettre en exergue le manque de durabilité de ces villes en l'état actuel des choses. En effet, si le réchauffement climatique continue de progresser selon les rapports du GIEC, il est possible que, ces prochaines décennies, ces villes deviennent difficilement habitables.

Ces considérations permettent de faire la transition sur le dernier point de ce mémoire, à savoir comment utiliser les résultats trouvés dans le cadre de ce travail. Le plus pertinent se trouve en amont de ces résultats. En effet, en ayant connaissance du comportement des ICU dans ces villes, il est important de les prendre en considération dans les décisions politiques et les aménagements futurs. De ce fait, il serait très intéressant de présenter ce travail aux personnes responsables de ces villes afin qu'elles puissent entreprendre des mesures en vue d'atténuer les effets néfastes de ces îlots de chaleur urbains. Certaines solutions possibles ont été énoncées dans le chapitre *Solutions*, mais il est évident que des possibilités d'approfondissement sont très nombreuses. De plus, comme en Suisse les décisions de ce type se font par l'approbation des outils institutionnels, plus les mesures sont entreprises tôt, plus elles ont de chance d'aboutir. Elles doivent être appuyées par des données afin de légitimer ces mesures, et ce travail entre tout à fait dans ce cadre.

---

15. <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2017/07/hitzewelle-in-der-stadt.html>

## 9 Bibliographie

### Ouvrages et Articles

- [1] Anquez P. et Herlem A. (2011). *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions*. Chaire de responsabilité sociale et de développement durable, UQAM.
- [2] Azevedo J.A. (2016). *Urban heat and energy demand : application of an urban meteorological network*. University of Birmingham, School of geography Earth and Environmental Science, College of life and environmental sciences, Great Britain.
- [3] Bacci P. and Maugeri, M. (1992). The urban heat island of Milan. *Nuovo Cimento*, vol 15, C 4, pp. 417–424.
- [4] Balkestahl L., Monteiro A., Gois J., Taesler R. and Quenol H. (2006). The influence of weather types on the urban heat island’s magnitude and patterns at Paranhos, Oporto – a case study from November 2003 to January 2005, *Proceedings of the International Conference on Urban Climatology*, Göteborg, 2006.
- [5] Beranova R. and Huth R. (2005). Long-term changes in the heat island of Prague under different synoptic conditions. *Theoretical Applied Climatology*, vol 82, pp. 113–118.
- [6] Blazejczyk K., Bakowska M. and Wieclaw M. (2006). Urban heat island in large and small cities, *Proceedings of 6th International Conference on Urban Climate*, Göteborg, Sweden.
- [7] Bonacquisti V., Casale G. R., Palmieri S. and Siani A. M. (2006). A canopy layer model and its application to Rome. *Science of the Total Environment*, vol 364, pp. 1–13.
- [8] Bouët M. (1985). *Climat et météorologie de la suisse-romande*. Lausanne, Payot, 170 p.
- [9] Bovay C. (2020). *Ilots de chaleur urbains & végétation : Diagnostics et potentiels de réversibilité. Le cas de Lausanne (mémoire de master non publié)*. Université de Lausanne, Institut de géographie et durabilité, Suisse, 145 p.
- [10] Branea A., Danciu M.I., Keller A.I., Bădescu Ș., Găman M.S., Pașcu G. (2016). *Urban heat island - state of the art review*. Politehnica University of Timisoara, Faculty of Architecture and Urban Planning, Traian Lalescu str, nr. 2/A, 300223, Timisoara, Romania.
- [11] Cantat O. et Follin A. (2020). Les singularités thermiques d’un espace périurbain dans une agglomération de dimension moyenne : le cas de Caen durant l’hiver 2018/2019. *Climatologie*, 17, 3.
- [12] Colacino M. and Lavagnini A. (1982). Evidence of the urban heat island in Rome by climatological analyses. *ArchIVES. Meteorology. Geophysics. Bioklimatology.*, Series B, vol 31, pp. 87–97.
- [13] Deilami K., Kamruzzaman M. and Liu, Y. (2018). Urban heat island effect : A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 67, 30-42.
- [14] Doick KJ., Peace A. and Hutchings TR. (2014). The role of one large greenspace in mitigating London’s nocturnal urban heat island. *Sci Total Environ.* 493 : 662-71.
- [15] Dubreuil V., Foissard X., Nabucet J., Thomas A. et Quénel H. (2020). Fréquence et intensité des îlots de chaleur à Rennes : bilan de 16 années d’observations (2004-2019). *Climatologie*, 17, 6.

- [16] Escobedo F.J., Kroeger T. and Wagner J.E. (2011). Urban forests and pollution mitigation : Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159, pp. 2078-2087.
- [17] Fallois J.-M. (2020). Climatologie, Uni Lausanne, IGD, Matériaux pour les cours et séminaires n° 56A (polycopié), 128 p.
- [18] Gago E.J., Roldan J., Pacheco-Torres R. and Ordóñez J. (2013). The City and Urban Heat Islands : A Review of Strategies to Mitigate Adverse Effects. *Renewable & sustainable energy reviews* 25 : 749–758. Web.
- [19] Gehrig R., König N. und Scherrer S. (2018). Städtische Wärmeinseln in der Schweiz - klimatologische Studie mit Messdaten in fünf Städten. *Fachbericht MeteoSchweiz*, 273p.
- [20] Hassani N. et Drogue G. (2020). Mesure et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'aire urbaine de Metz Métropole : premiers résultats de la campagne de mesure 2019. *Climatologie*, 17, 8.
- [21] Lemonsu A., Vigiú V., Daniel M. and Masson, V. (2015). Vulnerability to heat waves : impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Climate*, 14, 586–605.
- [22] Mills G. (2008). Luke Howard and *The Climate of London*. *Weather*, 63 : 153-157.
- [23] NCCS. (2018). CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse. *National Centre for Climate Services*, Zurich. 24 pages. Numéro ISBN 978-3-9525031-1-9.
- [24] OFEV. (2018). Quand la ville surchauffe : bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques. *Office fédéral de l'environnement*, Berne. Connaissance de l'environnement, No 1812 : 109 S.
- [25] Oke T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7, 769-779.
- [26] Pascal M., Laaidi K. et Beaudeau P. (2019). Intérêt des espaces verts et ombragés dans la prévention des impacts sanitaires de la chaleur et de la pollution de l'air en zones urbaines. *Santé Publique*, 2019/HS1 (S1), p. 197-205
- [27] Petralli M., Morabito M., Bartolini G., Torrigiani T., Cecchi L. and Orlandini, S. (2006). Air temperature distribution at pedestrian level in Florence, Italy, through fixed and mobile sensor measurements, *Proceedings of 6th International Conference on Urban Climate*, Göteborg, Sweden.
- [28] Pinho O.S. and Orgaz M.D. (2000). The urban heat island in a small city in coastal Portugal, *International Journal of Biometeorology*, vol 44, pp. 198–203.
- [29] Pongracz R., Bartholy J. and Dezso Z. (2006). Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis, *Advances in Space Research*, vol 13, no 12, pp. 2191–2196.
- [30] Qiu G.Y., Li H.Y., Zhang Q.T., Chen W., Liang X.J. and Li X.Z. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(8), pp. 1307-1315.
- [31] Renard F. et Alonso L. (2020). Editorial du numéro thématique "Climat urbain". *Climatologie*, 17, 1.
- [32] Ruffieux D. (1986). L'agglomération de Fribourg et son influence sur la ventilation. *Editions universitaires Fribourg*, Suisse, 134 p.

- [33] Santamouris M. (2007). *Heat Island Research in Europe : The State of the Art, Advances in Building Energy Research*, 1 :1, 123-150.
- [34] Wanner H. and Hertig J.-A. (1984). Studies of Urban Climates and Air Pollution in Switzerland. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 23, N°12, pp. 1614-1625.
- [35] Watkins J., Palmer J., Kolokotroni M. and Littlefair P. (2002). The London heat island : Results from summer time monitoring, *Building Services Engineering Research and Technology*, vol 23, no 2, pp. 97-106.
- [36] Yaggie C., Zurita E. and Martinez A. (1991). Statistical analysis of the Madrid urban heat island, *Atmospheric Environment*, vol 25B, no 3, pp. 325-332.
- [37] Zanella G. (1976). Il clima urbano di Parm, *Rivista Meteorologia Aeronautica*, vol 36, pp. 125-146.

## Sites internet

- [1] Bibliothèque Pandas :<https://pypi.org/project/pandas/> [Consulté le 16.03.2021]
- [2] Des «îlots de chaleur» dans les villes - Les villes subissent les températures les plus élevées pendant les vagues de chaleur :  
<https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-67588.html>[consulté le 9.04.2021]
- [3] ETH-News : Asphalt hat einen gewichtigen Nachteil  
<https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2017/07/hitzewelle-in-der-stadt.html>[consulté le 11.04.2021]
- [4] Évolution de la température et des précipitations en Suisse :  
<https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse/evolution-de-la-temperature-et-des-precipitations.html> [Consulté le 5.03.2021]
- [5] Journal le Monde : La lutte contre les îlots de chaleur urbains est loin d'être gagnée, Lucille Alonson et Florent Renard :  
[https://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2020/06/25/la-lutte-contre-les-ilots-de-chaleur-urbains-est-loin-d-etre-gagnee\\_6044162\\_4811534.html](https://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2020/06/25/la-lutte-contre-les-ilots-de-chaleur-urbains-est-loin-d-etre-gagnee_6044162_4811534.html) [consulté le 9.04.2021]
- [6] Journal Le Monde : la poussée des villes-forêts divise les architectes paysagistes :  
\$[https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/11/14/urbanisme-la-pousse-e-des-villes-forets-divise-les-architectes-paysagistes\\_6059724\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/11/14/urbanisme-la-pousse-e-des-villes-forets-divise-les-architectes-paysagistes_6059724_3234.html) \$[consulté le 13.04.2021]
- [7] Le réseau de stations de MétéoSuisse :  
<https://www.meteosuisse.admin.ch/home/systemes-de-mesure-et-de-prevision/stations-au-sol/reseau-de-mesures-automatiques.html> [Consulté le 11.03.2021]
- [8] Office de l'environnement du canton du Jura :  
<https://www.jura.ch/env> [Consulté le 11.03.2021]

- [9] Papin A. (2019). Les îlots de chaleur urbains, point de vigilance du confort d'été :  
<http://www.e6-consulting.fr/les-ilots-de-chaleur-urbains-point-de-vigilance-du-confort-dete/> [Consulté le 10.03.2021]
- [10] Portail IDAWEB de MétéoSuisse :  
<https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do;idaweb=OphLTWMBTNWxHG75fhJCyM1NXX6JQM4vpvKKgkv3LypRfQpZxfXY!-1907983237?language=fr>[consulté le 11.03.2021]
- [11] Service de l'énergie et de l'environnement du canton de Neuchâtel :  
<https://www.ne.ch/autorites/DDTE/SENE/Pages/accueil.aspx> [consulté le 11.03.2021]

## 10 Annexes

### Méthodologie

```
stn;time;tre200h0  
DEM;2013010100;-1.8  
DEM;2013010101;-2.0  
DEM;2013010102;-1.8  
DEM;2013010103;-1.6  
DEM;2013010104;-1.5  
DEM;2013010105;-1.4  
DEM;2013010106;-0.9  
DEM;2013010107;-0.6  
DEM;2013010108;0.1  
DEM;2013010109;3.8
```

FIGURE 27 – Exemple de données au format csv

```

9 import pandas as pd
10
11 column_names = ["Station", "Date", "moyennes horaires de la température de l'air à 2m/sol"]
12 meteo = pd.read_csv("order_80440_data.txt", sep=";", index_col=1, header = 0, names = column_names, parse_dates=True, infer_datetime_format=True)
13
14 df = pd.DataFrame(meteo, columns = ["Station", "moyennes horaires de la température de l'air à 2m/sol"])
15
16 df.to_csv('Delemont.csv')
17

```

FIGURE 28 – Transformation du format csv en xlsx

|    | A          | B       | C   | D | E | F |
|----|------------|---------|---|---|---|---|
| 1  | date       | Station | moyennes horaires de la température de l'air à 2m/sol |   |   |   |
| 2  | 2013010100 | DEM     | -1.8  |   |   |   |
| 3  | 2013010101 | DEM     | -2  |   |   |   |
| 4  | 2013010102 | DEM     | -1.8  |   |   |   |
| 5  | 2013010103 | DEM     | -1.6  |   |   |   |
| 6  | 2013010104 | DEM     | -1.5  |   |   |   |
| 7  | 2013010105 | DEM     | -1.4  |   |   |   |
| 8  | 2013010106 | DEM     | -0.9  |   |   |   |
| 9  | 2013010107 | DEM     | -0.6  |   |   |   |
| 10 | 2013010108 | DEM     | 0.1   |   |   |   |

FIGURE 29 – Exemple de données au format xlsx

```

54 #####Janvier
55
56 #####Janvier 2013
57
58 resultatjanv2013 = []
59
60 for i in range(24):
61
62     sommejanv2013 = 0;
63
64     for j in range(31):
65
66
67         sommejanv2013 += sheet.cell_value((i+1)+(24*j),2);
68         resultatjanv2013 = sommejanv2013/31;
69
70     resultatjanv2013.append(resultatintjanv2013);
71
72
73
74 ###écrire dans le tableau excel
75
76
77
78 Deljanv.write(0,0,"Delemont MétéoSuisse, janvier 2013", cell_format);
79
80 Deljanv.write(1,0,"Heure");
81 Deljanv.write(1,1,"Station");
82 Deljanv.write(1,2,"Moyenne horaire de la température en °C de l'air à 2m/sol pour le mois de janvier 2013");
83
84
85
86 ###remplir le tableau avec les valeurs
87
88 for l in range(24):
89
90     Deljanv.write(l+2,0,heure[l]);
91     Deljanv.write(l+2,1,"DEM");
92     Deljanv.write(l+2,2,resultatjanv2013[l]);
93

```

FIGURE 30 – Exemple de calcul de moyennes horaires (janvier 2013, Delémont)

```

355 #####Moyenne Janvier MétéoSuisse
357
358 moyennejanv = []
359 MoyDelJanv = excel.sheet_by_index(0);
360
361 for i in range(24):
362
363     sommejanv = 0;
364     for j in range(7):
365
366         sommejanv += MoyDelJanv.cell_value(2+(j*27)+(i*1),2);
367     moyenneintjanv = sommejanv/7;
368
369
370
371 moyennejanv.append(moyenneintjanv);
372 MoyJanvA = np.around(moyennejanv,decimals = 3);
373
374
375 #####Écrire dans le tableau excel
376
377 DelJanv.write(0,13,"Delémont MétéoSuisse, Moyenne Janvier 2013-2019", cell_format);
378
379 DelJanv.write(1,13,"heure ");
380 DelJanv.write(1,14,"Station");
381 DelJanv.write(1,15,"Moyenne de la moyenne horaire de la température en °C de l'air à 2m/sol pour le mois de janvier de 2013 à 2019");
382
383 for k in range(24):
384
385     DelJanv.write(2+k,13,heure[k]);
386     DelJanv.write(2+k,14,"DEH");
387     DelJanv.write(2+k,15,MoyJanvA[k]);
388
389

```

FIGURE 31 – Exemple de code pour le calcul de la moyenne des moyennes (Janvier, Delémont)

| N  | O       | P  | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y |
|--|---------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <b>Delémont MétéoSuisse, Moyenne Janvier 2013-2019</b> |         |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| heure  | Station | Moyenne de la moyenne horaire de la température en °C de l'air à 2m/sol pour le mois de janvier de 2013 à 2019 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 00h01 à 01h00                                       | DEM     | 0.63   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 01h01 à 02h00                                       | DEM     | 0.469  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 02h01 à 03h00                                       | DEM     | 0.353  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 03h01 à 04h00                                       | DEM     | 0.197  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 04h01 à 05h00                                       | DEM     | 0.054  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 05h01 à 06h00                                       | DEM     | -0.049   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 06h01 à 07h00                                       | DEM     | -0.171   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 07h01 à 08h00                                       | DEM     | -0.215   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 08h01 à 09h00                                       | DEM     | -0.064   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 09h01 à 10h00                                       | DEM     | 0.499  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 10h01 à 11h00                                       | DEM     | 1.292  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 11h01 à 12h00                                       | DEM     | 2.119  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 12h01 à 13h00                                       | DEM     | 2.82   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 13h01 à 14h00                                       | DEM     | 3.36   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 14h01 à 15h00                                       | DEM     | 3.673  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 15h01 à 16h00                                       | DEM     | 3.571  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 16h01 à 17h00                                       | DEM     | 3  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 17h01 à 18h00                                       | DEM     | 2.459  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 18h01 à 19h00                                       | DEM     | 2.035  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 19h01 à 20h00                                       | DEM     | 1.739  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 20h01 à 21h00                                       | DEM     | 1.478  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 21h01 à 22h00                                       | DEM     | 1.255  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 22h01 à 23h00                                       | DEM     | 1.067  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 23h01 à 00h00                                       | DEM     | 0.907  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

FIGURE 32 – Exemple de résultat de la moyenne des moyennes (Janvier, Delémont)



```

56 #####Janvier 2013
57
58
59 sheet2013janv = workbook.sheet_by_index(0);
60
61
62 #####Calcul des moyennes
63
64 resultatjanv = [];
65
66 for i in range(24):
67
68     sommejanv = 0;
69
70     for j in range(31):
71
72         x = (sheet2013janv.cell_value(6+(j*48)+(i*2),1)+sheet2013janv.cell_value(7+(j*48)+(i*2),1))/2;
73         y = (sheet2013janv.cell_value(7+(j*48)+(i*2),1)+sheet2013janv.cell_value(8+(j*48)+(i*2),1))/2;
74         z = (x+y)/2;
75
76         sommejanv += z;
77
78
79
80     resultatint = sommejanv/31;
81
82     resultatjanv.append(resultatint);
83
84
85
86 #####écrire dans le tableau
87
88 Deljanv.write(0,0,"Delemont ENV, janvier 2013", cell_format);
89
90 Deljanv.write(1,0,"Heure");
91 Deljanv.write(1,1,"Station");
92 Deljanv.write(1,2,"Moyenne horaire de la température en °C de l'air à 2m/sol pour le mois de janvier 2013");
93
94 for l in range(24):
95
96     Deljanv.write(l+2,0,heure[l]);
97     Deljanv.write(l+2,1,"DEN");
98     Deljanv.write(l+2,2,resultatjanv[l]);
99
100

```

FIGURE 34 – Exemple de code pour le calcul des moyennes horaires

| N  | O       | P  | Q | R | S | T | U | V | W | X |
|--|---------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <b>Delémont ENV, Moyenne Janvier 2013-2019</b> |         |  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| heure  | Station | Moyenne de la moyenne horaire de la température en °C de l'air à 2m/sol pour le mois de janvier de 2013 à 2019 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 00h01 à DEM                                 | DEM     | 1.215  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 01h01 à DEM                                 | DEM     | 1.124  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 02h01 à DEM                                 | DEM     | 1.009  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 03h01 à DEM                                 | DEM     | 0.842  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 04h01 à DEM                                 | DEM     | 0.764  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 05h01 à DEM                                 | DEM     | 0.745  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 06h01 à DEM                                 | DEM     | 0.591  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 07h01 à DEM                                 | DEM     | 0.543  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 08h01 à DEM                                 | DEM     | 0.605  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 09h01 à DEM                                 | DEM     | 1.02   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 10h01 à DEM                                 | DEM     | 1.777  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 11h01 à DEM                                 | DEM     | 2.521  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 12h01 à DEM                                 | DEM     | 3.233  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 13h01 à DEM                                 | DEM     | 3.804  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 14h01 à DEM                                 | DEM     | 4.197  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 15h01 à DEM                                 | DEM     | 4.269  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 16h01 à DEM                                 | DEM     | 3.897  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 17h01 à DEM                                 | DEM     | 3.288  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 18h01 à DEM                                 | DEM     | 2.816  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 19h01 à DEM                                 | DEM     | 2.452  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 20h01 à DEM                                 | DEM     | 2.152  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 21h01 à DEM                                 | DEM     | 1.878  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 22h01 à DEM                                 | DEM     | 1.669  |   |   |   |   |   |   |   |   |
| de 23h01 à DEM                                 | DEM     | 1.49   |   |   |   |   |   |   |   |   |

FIGURE 35 – Exemple de résultat de la moyenne des moyennes (Janvier, Delémont)



## Gradients verticaux moyens de température de Bouët Delémont

|                           |        |
|---------------------------|--------|
| Altitude Delémont ENV (m) | 410    |
| Altitude Delémont MS (m)  | 439    |
| Différence                | 29     |
| <b>Gradient de Bouët</b>  |        |
| Janvier                   | 0,0696 |
| Février                   | 0,0957 |
| Mars                      | 0,145  |
| Avril                     | 0,1769 |
| Mai                       | 0,1827 |
| Juin                      | 0,1827 |
| Juillet                   | 0,1827 |
| Aout                      | 0,1769 |
| Septembre                 | 0,1421 |
| Octobre                   | 0,1131 |
| Novembre                  | 0,0957 |
| Décembre                  | 0,0754 |

FIGURE 37 – Calcul des gradients verticaux moyens de température de Bouët, Delémont

## Porrentruy

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| Altitude Porrentruy ENV (m) | 420    |
| Altitude Fahy MS (m)        | 596    |
| Différence                  | 176    |
| <b>Gradient de Bouët</b>    |        |
| Janvier                     | 0,4224 |
| Février                     | 0,5808 |
| Mars                        | 0,88   |
| Avril                       | 1,0736 |
| Mai                         | 1,1088 |
| Juin                        | 1,1088 |
| Juillet                     | 1,1088 |
| Aout                        | 1,0736 |
| Septembre                   | 0,8624 |
| Octobre                     | 0,6864 |
| Novembre                    | 0,5808 |
| Décembre                    | 0,4576 |

FIGURE 38 – Calcul des gradients verticaux moyens de température de Bouët, Porrentruy

## Chaux-de-Fonds

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| Altitude Chaux-de-Fonds SENE (m) | 997   |
| Altitude Chaux-de-Fonds MS (m)   | 1017  |
| Différence                       | 20    |
| <b>Gradient de Bouët</b>         |       |
| Janvier                          | 0,048 |
| Février                          | 0,066 |
| Mars                             | 0,1   |
| Avril                            | 0,122 |
| Mai                              | 0,126 |
| Juin                             | 0,126 |
| Juillet                          | 0,126 |
| Aout                             | 0,122 |
| Septembre                        | 0,098 |
| Octobre                          | 0,078 |
| Novembre                         | 0,066 |
| Décembre                         | 0,052 |

FIGURE 39 – Calcul des gradients verticaux moyens de température de Bouët, Chaux-de-Fonds

## Neuchâtel

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| Altitude Neuchatel MS (m) | 485     |
| Altitude Cressier MS (m)  | 430     |
| Différence                | -55     |
| <b>Gradient de Bouët</b>  |         |
| Janvier                   | -0,132  |
| Février                   | -0,1815 |
| Mars                      | -0,275  |
| Avril                     | -0,3355 |
| Mai                       | -0,3465 |
| Juin                      | -0,3465 |
| Juillet                   | -0,3465 |
| Aout                      | -0,3355 |
| Septembre                 | -0,2695 |
| Octobre                   | -0,2145 |
| Novembre                  | -0,1815 |
| Décembre                  | -0,143  |

FIGURE 40 – Calcul des gradients verticaux moyens de température de Bouët, Neuchâtel

## Résultats non présentés de Neuchâtel

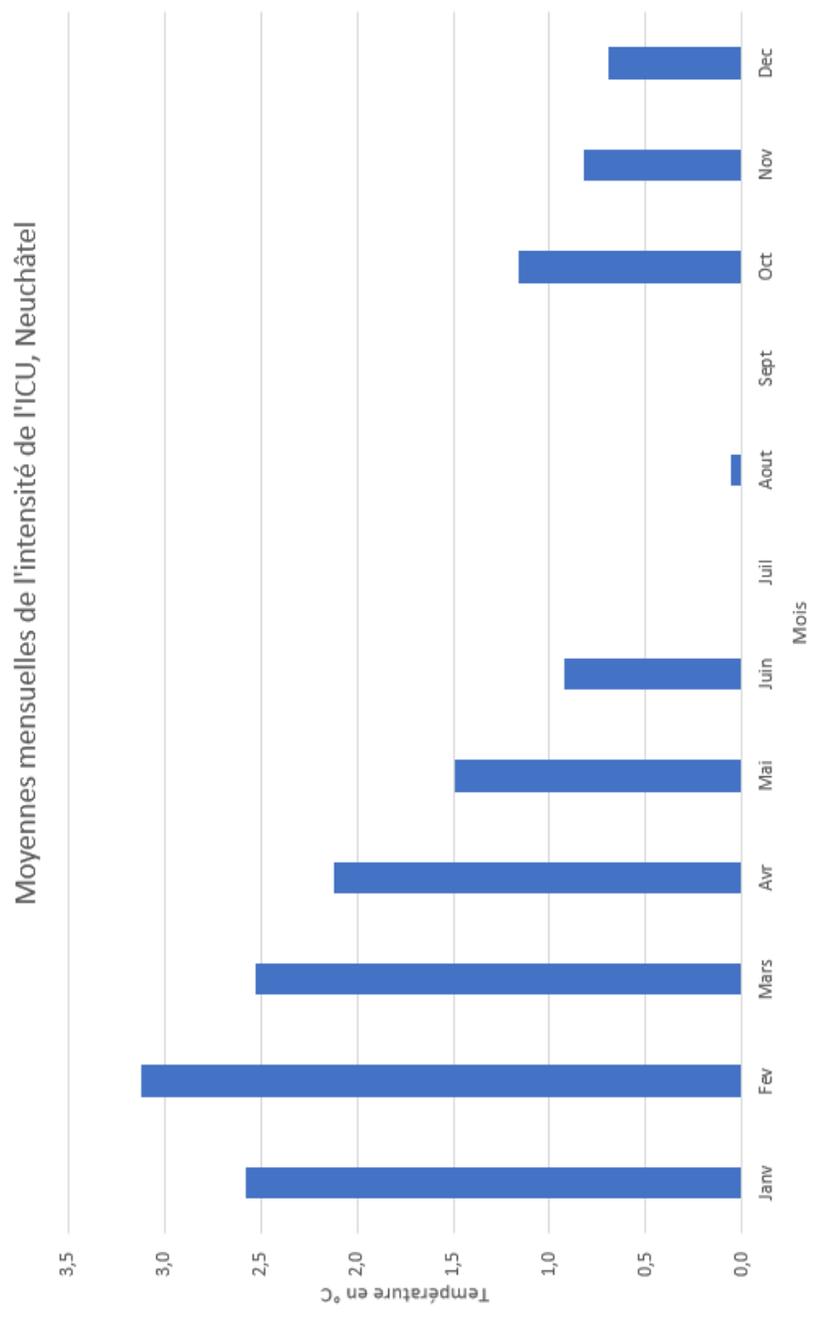


FIGURE 41 – Moyennes mensuelles de l'intensité de l'ICU sur la période 2013-2019, Neuchâtel

Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure du SENE de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Neuchâtel.

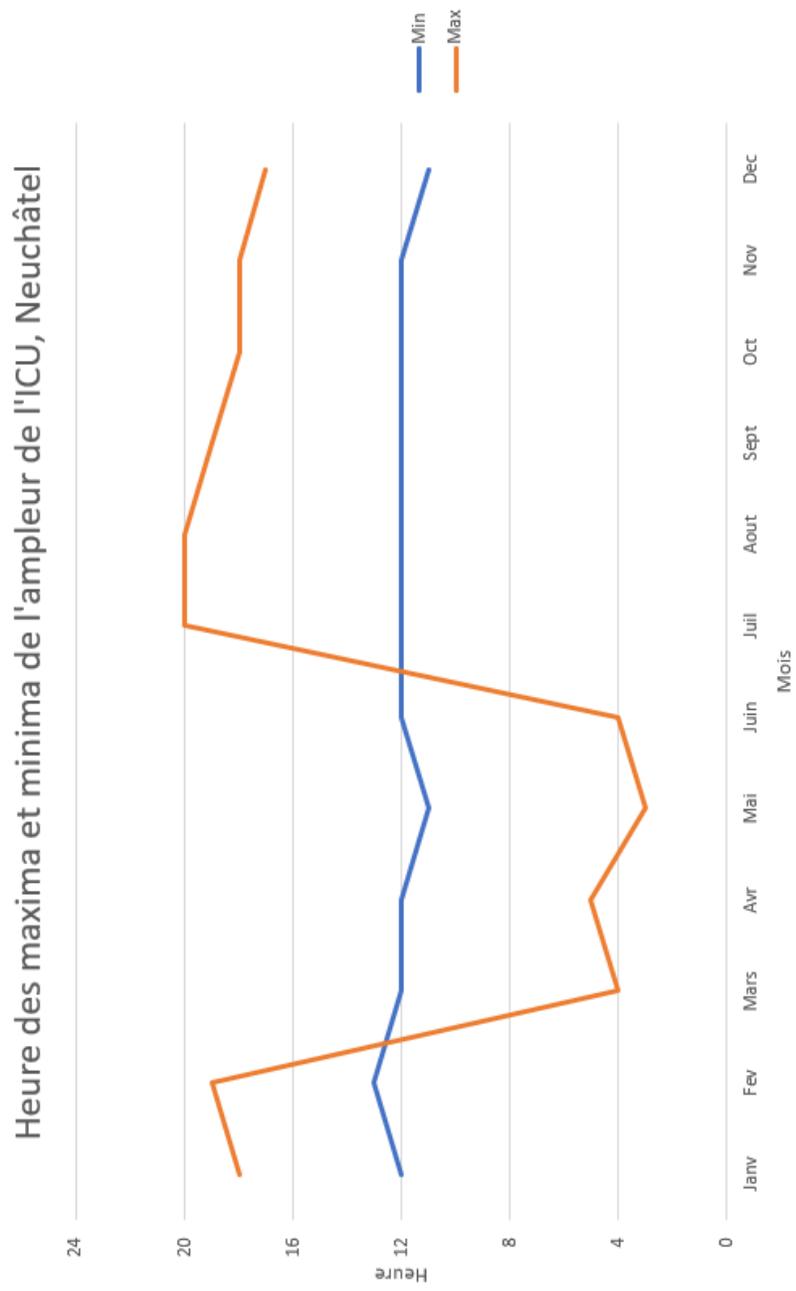


FIGURE 42 – Heure des maxima et minima de l’ampleur de l’ICU par mois, période 2013-2019, Neuchâtel

Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure du SENE de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Neuchâtel.

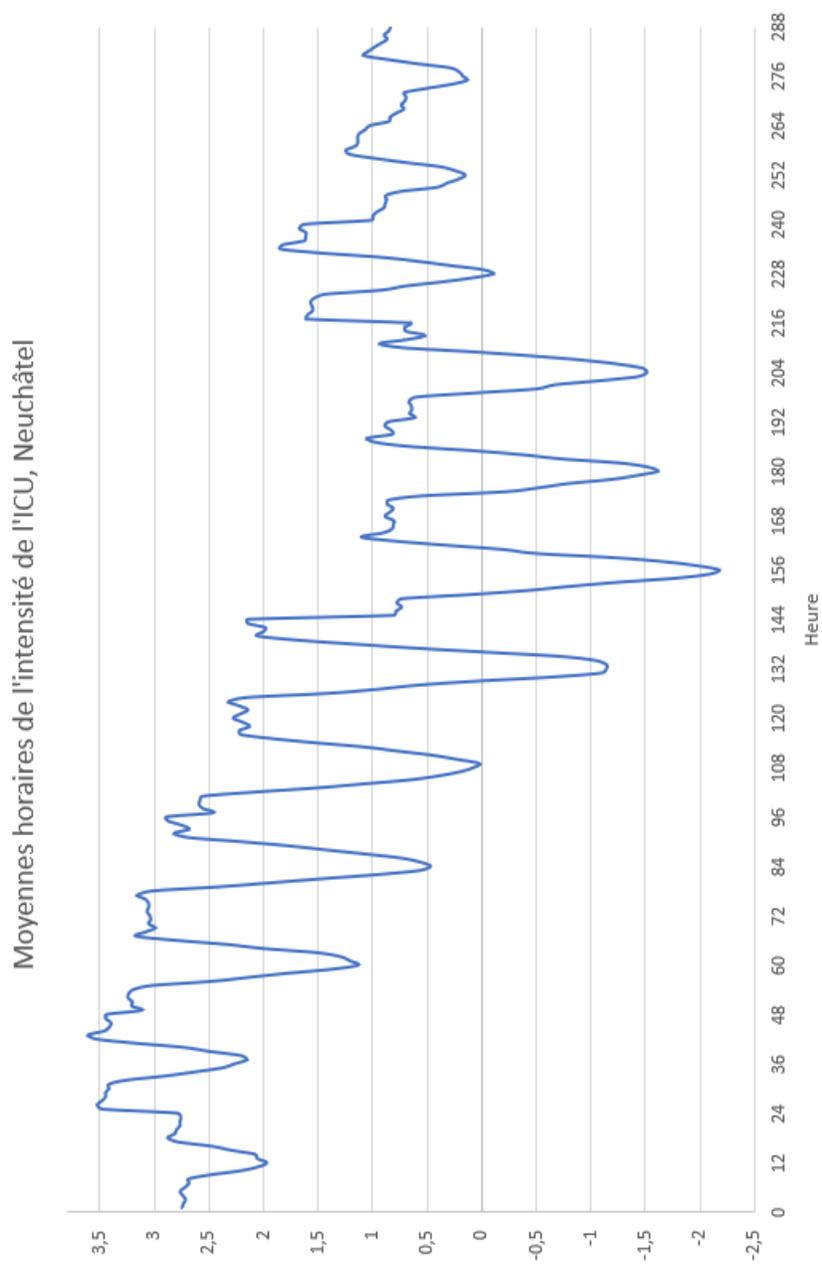


FIGURE 43 – Moyennes horaires de l’amplitude de l’ICU, période 2013-2019, Neuchâtel

Les variations moyennes de l’amplitude pour un mois sont représentées sur cette figure par un cycle de 24 heures. De ce fait, sur l’axe des abscisses, 0 à 24 représente le mois de janvier, 25 à 48 le mois de février jusqu’au mois de décembre, de 265 à 288. Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure du SENE de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Neuchâtel.

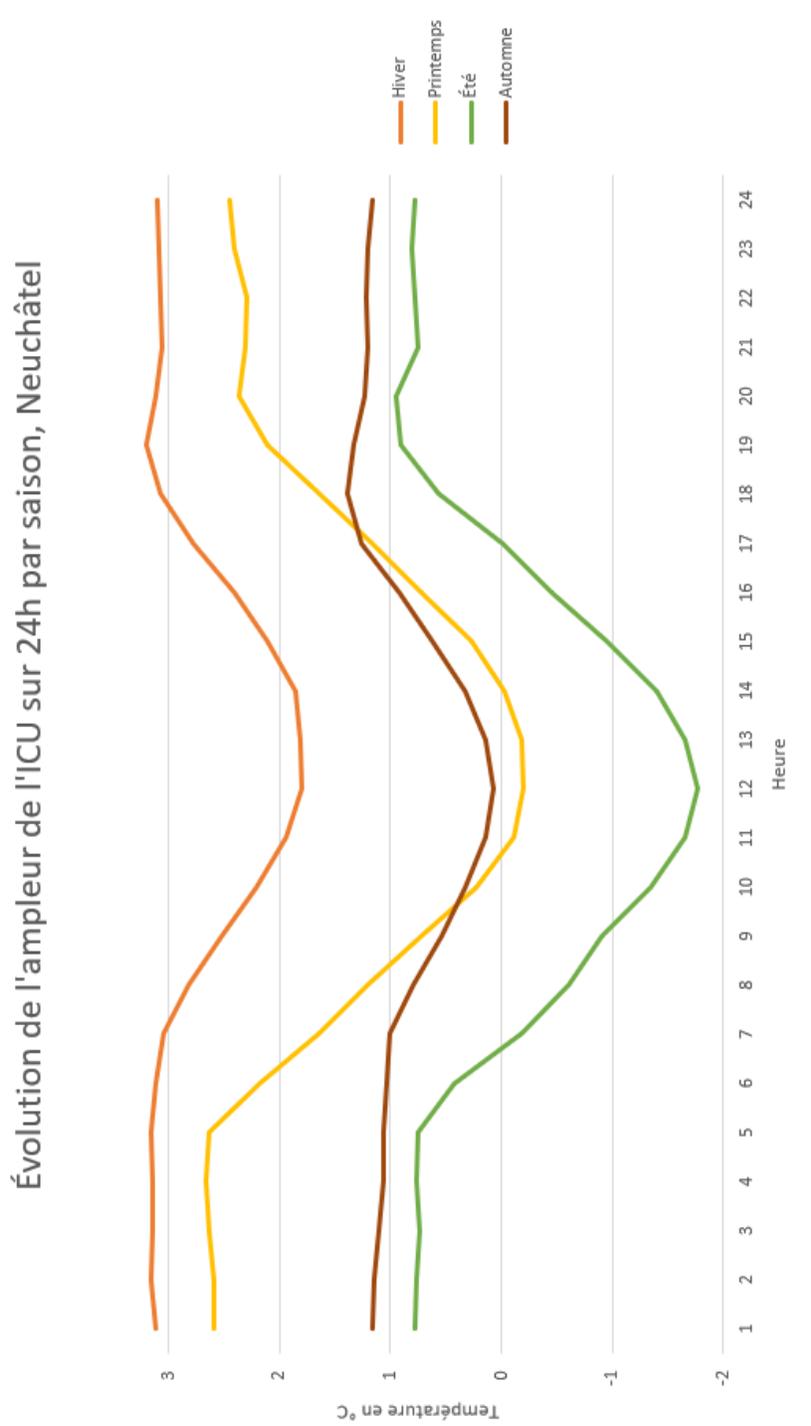


FIGURE 44 – Évolution de l'ampleur de l'ICU sur 24h, moyenne par saison, Neuchâtel

Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure du SENE de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Neuchâtel.

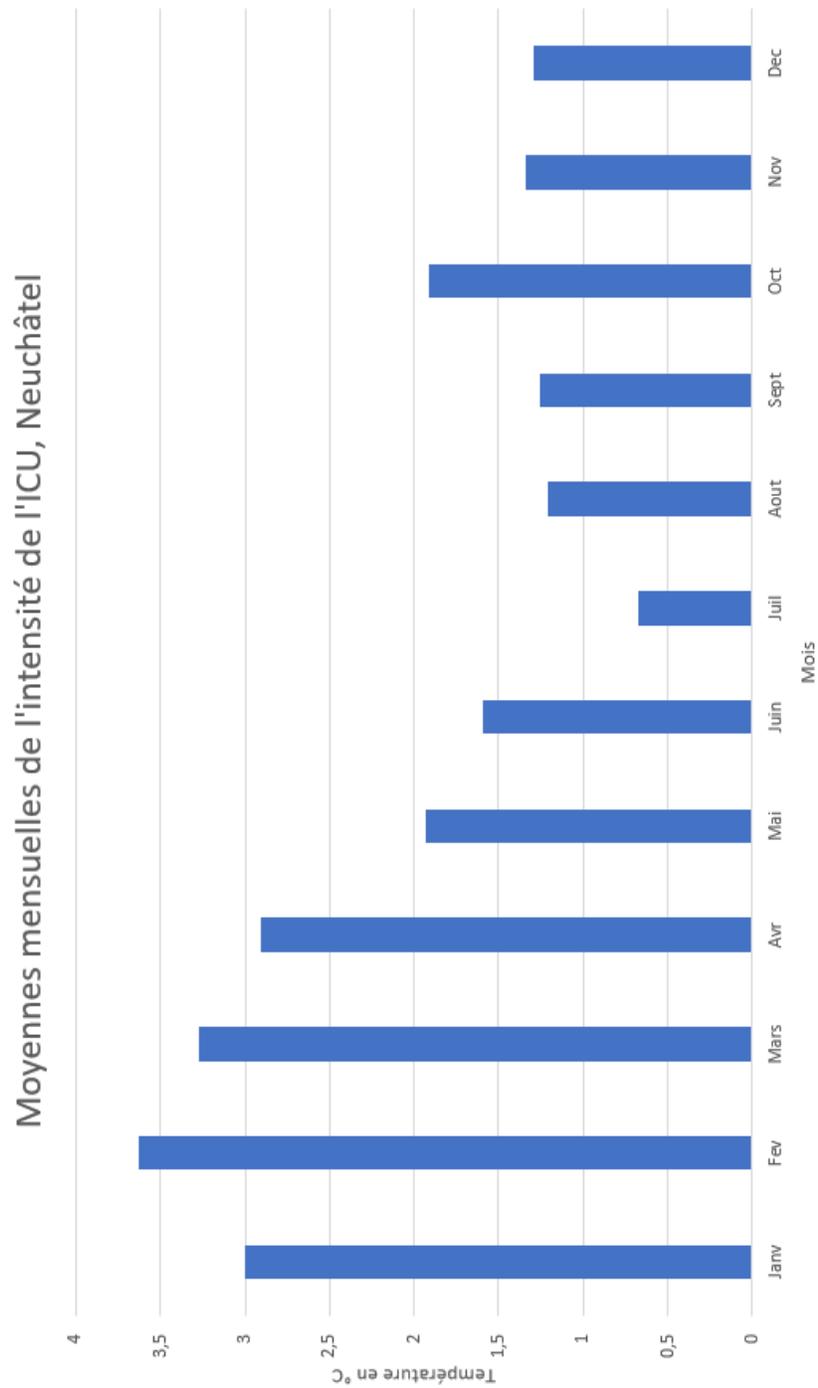


FIGURE 45 – Moyennes mensuelles de l'intensité de l'ICU sur la période 2013-2019, Neuchâtel

Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure du SENE de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Cressier.

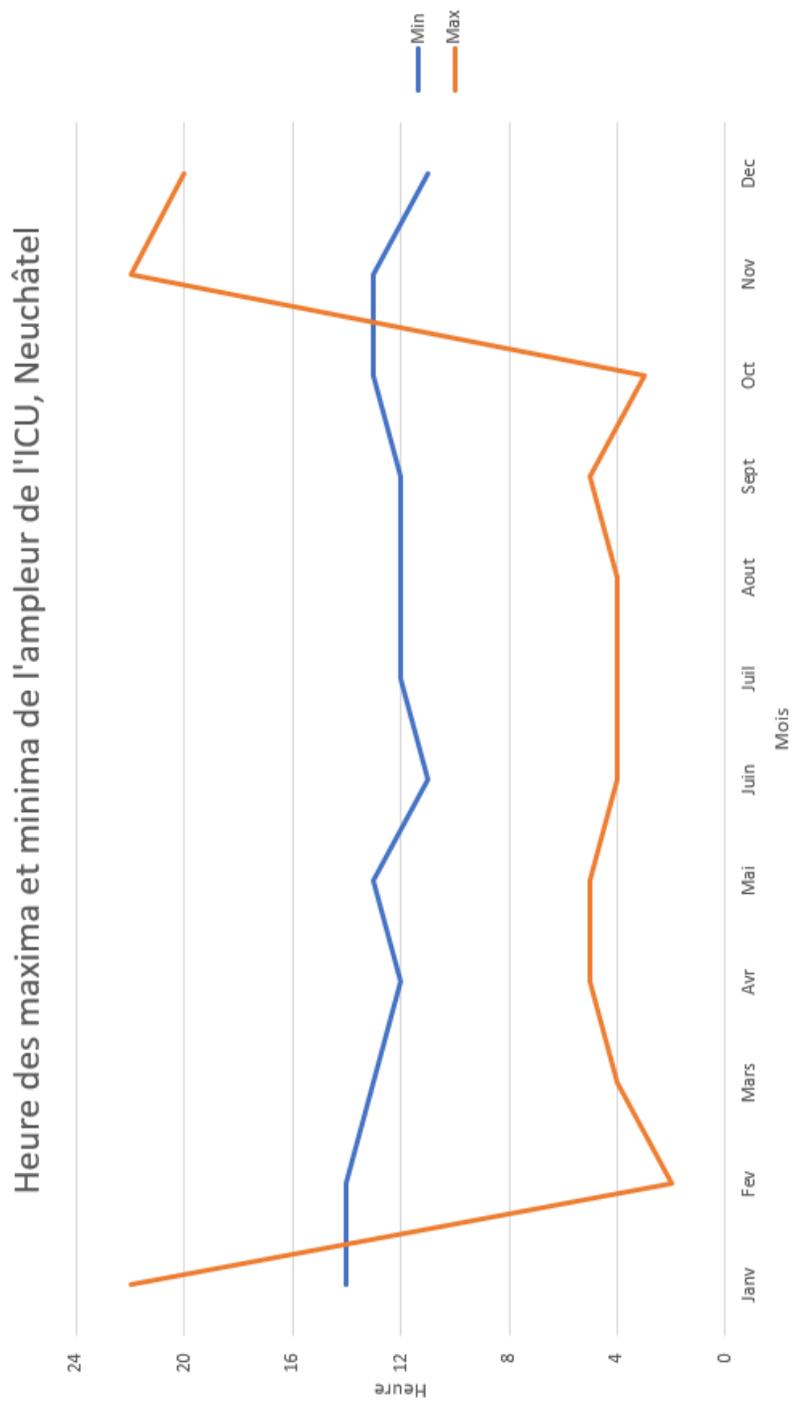


FIGURE 46 – Heure des maxima et minima de l'ampleur de l'ICU par mois, période 2013-2019, Neuchâtel

Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure du SENE de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Cressier.

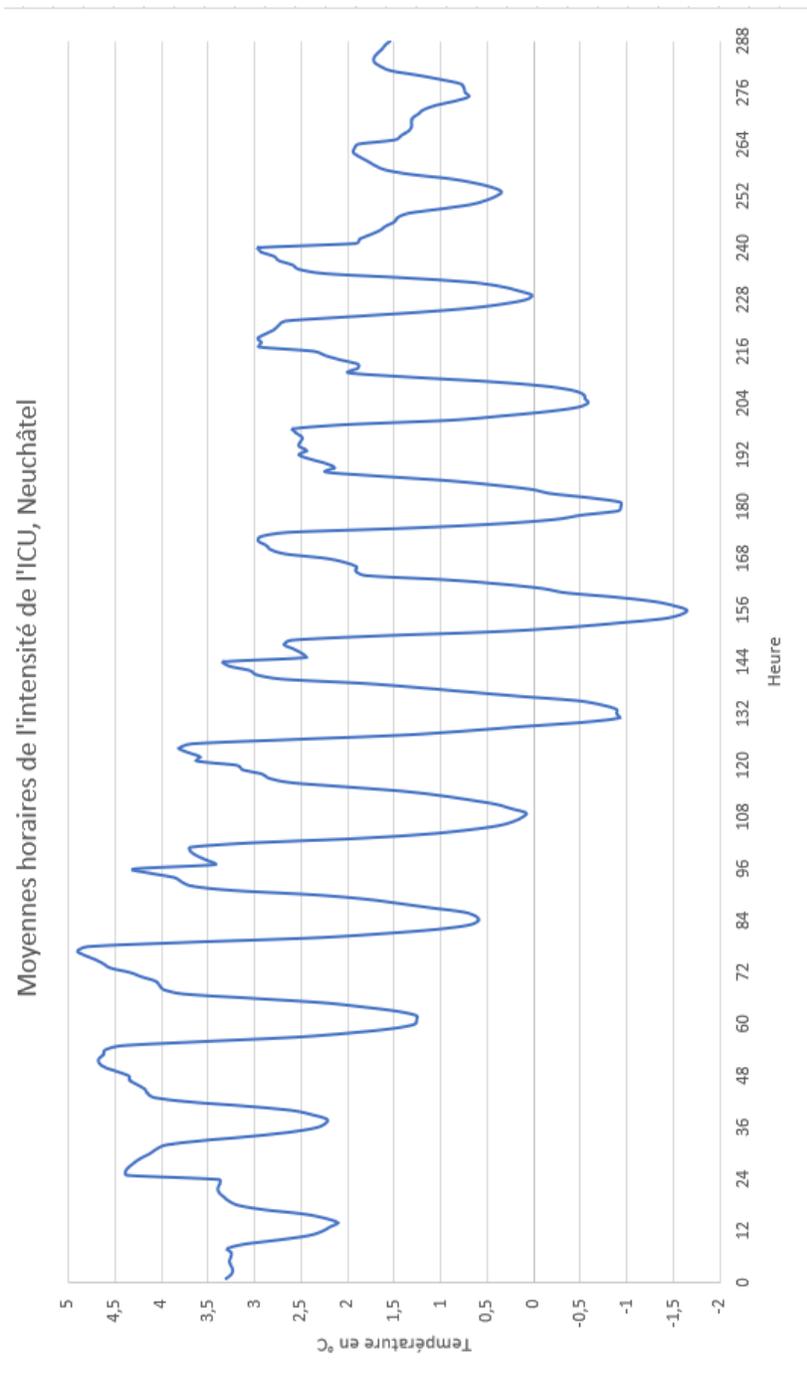


FIGURE 47 – Moyennes horaires de l’amplitude de l’ICU, période 2013-2019, Neuchâtel

Les variations moyennes de l’amplitude pour un mois sont représentées sur cette figure par un cycle de 24 heures. De ce fait, sur l’axe des abscisses, 0 à 24 représente le mois de janvier, 25 à 48 le mois de février jusqu’au mois de décembre, de 265 à 288. Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure du SENE de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Cressier.

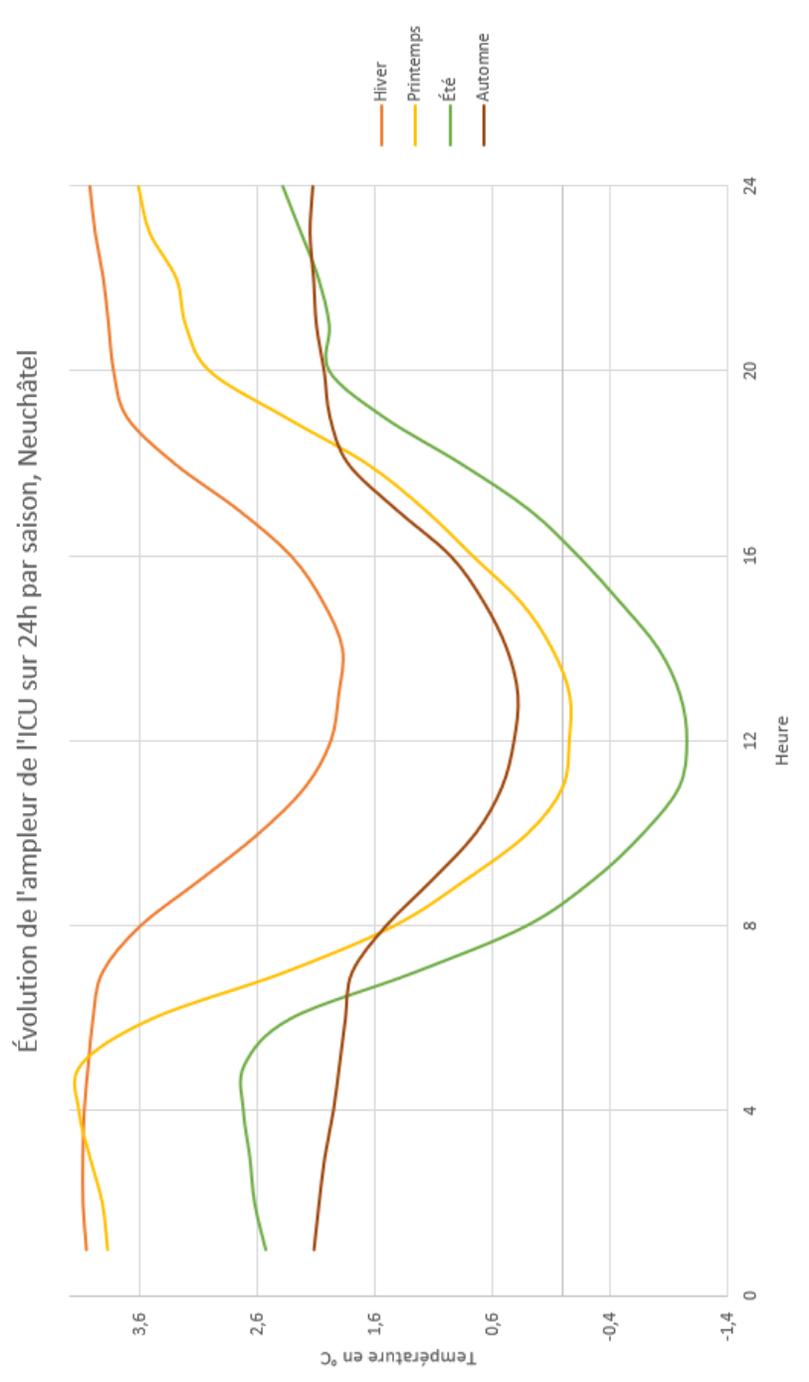


FIGURE 48 – Évolution de l’ampleur de l’ICU sur 24h, moyenne par saison, Neuchâtel

Cette figure est issue des résultats entre la station de mesure du SENE de Neuchâtel et la station de mesure de MétéoSuisse de Cressier.