

Analyse des températures estivales en ville de Neuchâtel

*Programme pilote de la Confédération Adaptation aux
changements climatiques*

Projet "Serrières, vers une fraîcheur de vivre"

Dr Constant Signarbieux et Prof. Dr Martine Rebetez

Avec des contributions de Léonard Schneider, Florian Rochat et
Valentin Comte

En collaboration avec Silvia Almeida et Pierre-Olivier Aragno

Novembre 2019

Table des matières

1. CONTEXTE.....	3
2. MESURES DES TEMPERATURES	4
3. ANALYSE DES TEMPERATURES MINIMALES ET MAXIMALES JOURNALIERES	8
3.1. ANALYSE DES ÉCARTS ENTRE LES TEMPÉRATURES DES STATIONS	8
3.2. ANALYSE PAR CATÉGORIES DE LOCALISATIONS	9
4. ANALYSE DES JOURS LES PLUS CHAUDS	11
4.1. COMPARAISON DES TEMPÉRATURES DES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE STATIONS DURANT LES DEUX JOURS LES PLUS CHAUDS DE L'ÉTÉ 2018.....	11
5. COMPARAISON DES TEMPERATURES ENTRE LES CATEGORIES DE STATIONS	14
5.1 COMPARAISON DES TEMPÉRATURES MOYENNES JOURNALIÈRES DES CATÉGORIES DE STATIONS	14
5.2 COMPARAISON DES TEMPÉRATURES MINIMALES ET MAXIMALES DES CATÉGORIES DE STATIONS	16
5.3 COMPARAISON DES TEMPÉRATURES MOYENNES JOURNALIÈRES POUR UNE STATION REPRÉSENTATIVE DE CHAQUE CATÉGORIE	16
5.4 COMPARAISON DES TEMPÉRATURES MINIMALES ET MAXIMALES POUR UNE STATION REPRÉSENTATIVE DE CHAQUE CATÉGORIE	18
6. RELATIONS ENTRE LA VITESSE DU VENT ET LES TEMPERATURES JOURNALIERES	20
7. MESURES DE L'ETE 2019.....	21
7.1. TEMPÉRATURES DES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE STATIONS EN 2019	21
7.2. TEMPÉRATURES DANS LE SECTEUR DE LA SORTIE DE LA GORGE DU SEYON	22
8. CONCLUSIONS.....	25

1. CONTEXTE

Dans le cadre du programme pilote de la Confédération Adaptation aux changements climatiques, le projet "Serrières, Vers une fraîcheur de vivre", prévoit d'appliquer toute une palette de mesures de lutte contre l'îlot de chaleur en situation caniculaire au quartier du Clos-de-Serrières en ville de Neuchâtel. Le quartier du Clos-de-Serrières se trouve dans une situation particulièrement exposée aux îlots de chaleur et fait l'objet d'un vaste programme de réaménagement et de développement.

Il s'agira par exemple de rechercher, analyser et appliquer des solutions pour limiter le stockage de chaleur en ville, intégrer des solutions de climatisation passive et étudier le potentiel des ressources naturelles locales de froid (Freecooling en lien avec la rivière la Serrière). Les solutions exemplaires mises en place sur le domaine public pourront par la suite être diffusées dans le domaine privé. En outre un plan de soutien pour les phases caniculaires sera mis en place en associant l'administration et les associations bénévoles.

Le monitoring de la température a été mis en place par l'Institut de géographie de l'Université de Neuchâtel en collaboration avec les services de la ville dans le but de mesurer l'écart existant entre les mesures standards de la station MétéoSuisse de Neuchâtel et celles des lieux typiques du quartier et de la ville, là où vivent réellement les habitants et les visiteurs. Le présent rapport concerne l'analyse des températures estivales en ville de Neuchâtel. Il présente les résultats des mesures effectuées durant l'été 2018 et des mesures complémentaires effectuées en été 2019.

Des capteurs de température de type HOBO protégés par un abri ad hoc à une hauteur de 2,5 m au-dessus du sol ont été installés en juin 2018. Ces stations ont été placées à différents endroits dans le quartier de Serrières et ailleurs en ville de Neuchâtel afin de représenter les différents types d'aménagements urbains (places, rues, parcs urbains, sous couvert végétal, etc.) et d'analyser leur influence sur les températures

En été 2019, après une première analyse des résultats des mesures de l'été 2018, quelques stations complémentaires ont été installées dans des sites susceptibles de nécessiter une meilleure documentation.

Les données de températures mesurées par ces installations seront désormais accessibles sur le site du SITN dans un délai de 6 à 12 mois après le moment des mesures, celles-ci n'étant pas accessibles en temps réel mais relevées périodiquement, une à deux fois par année par l'Institut de géographie de l'UNINE puis transmises au SITN après vérification de la qualité.

2. MESURES DES TEMPERATURES

L'installation de la première série de 18 stations de mesures de température a eu lieu au mois de juin 2018 et les données sont disponibles à partir du 28 juin 2018. La seconde série de 6 stations complémentaires a été installée en juin 2019 et ces données sont disponibles à partir du 27 juin 2019. Ces six stations supplémentaires ont été ajoutées dans le quartier de Serrières : une station dans la catégorie *Canyon*, deux stations dans la catégorie *Vegetation* et deux stations dans la catégorie *Lake*.

Les capteurs ont été installés sur des poteaux urbains existants, à 2,5 m de hauteur, protégés du rayonnement par un abri ad hoc et du rayonnement spécifique du poteau par une planche en bois peinte en blanc, comme le montre la Figure 1. La hauteur sur sol supérieure à la hauteur conventionnelle de 2 m a été choisie en accord avec le service de la voirie afin d'une part de permettre le travail des véhicules de voirie et d'autre part de réduire le risque de déprédations. Les stations ont été réparties dans la ville de manière à être représentatives de l'hétérogénéité de l'aménagement urbain du point de vue de ses impacts sur le micro-climat.



Figure 1 : Exemples de stations de mesure de la température installées en ville de Neuchâtel.

Les localisations des stations de mesures des températures sont listées dans le Tableau 1 et représentées sur la carte Swisstopo (Figure 2). Les stations ont été catégorisées selon les caractéristiques de leur environnement proche : rue ouverte (*Open*), parc urbain (*Vegetation*), rue fermée (*Canyon*) ou proximité du lac (*Lake*).

La station MétéoSuisse de Neuchâtel est une station complète de mesures météorologiques permanentes, dont les données remontent au début du 20^e siècle. Elle est localisée dans le parc de l'Observatoire cantonal de Neuchâtel, dans une prairie, avec de grands arbres au Sud-Est.

Station	Localisation	Catégorie
ST001	Serrières 1	<i>Canyon road</i>
ST002	Serrières 2	<i>Canyon road</i>
ST003	Serrières 3	<i>Open</i>
ST004	Collège de Vauseyon	<i>Open</i>
ST005	Rosière	<i>Open</i>
ST006	Gare (Nord)	<i>Open</i>
ST007	Gare (Place)	<i>Open</i>
ST008	Gare (Marronnier)	<i>Vegetation</i>
ST009	HE-Arc	<i>Canyon road</i>
ST010	OFS	<i>Canyon road</i>
ST011	Monruz	<i>Open</i>
ST012	Garage Senn	<i>Open</i>
ST013	Jardin anglais	<i>Vegetation</i>
ST014	Place AMP	<i>Open</i>
ST015	Collège Promenade	<i>Open</i>
ST016	Port	<i>Lake</i>
ST017	Jeunes-Rives	<i>Lake</i>
ST018	Place Pury	<i>Open</i>
ST019	Mille-Boilles	<i>Open</i>
ST020	Evole	<i>Vegetation</i>
ST021	Tivoli	<i>Canyon</i>
ST022	Denner Clos-de-Serrières	<i>Vegetation</i>
ST023	Débarcadère Serrières	<i>Lake</i>
ST024	Baie de l'Evole	<i>Lake</i>

Tableau 1 : Localisation des stations avec indication des catégories. Les stations 001 à 018 ont été installées en juin 2018, les stations complémentaires 019 à 024 en juin 2019.

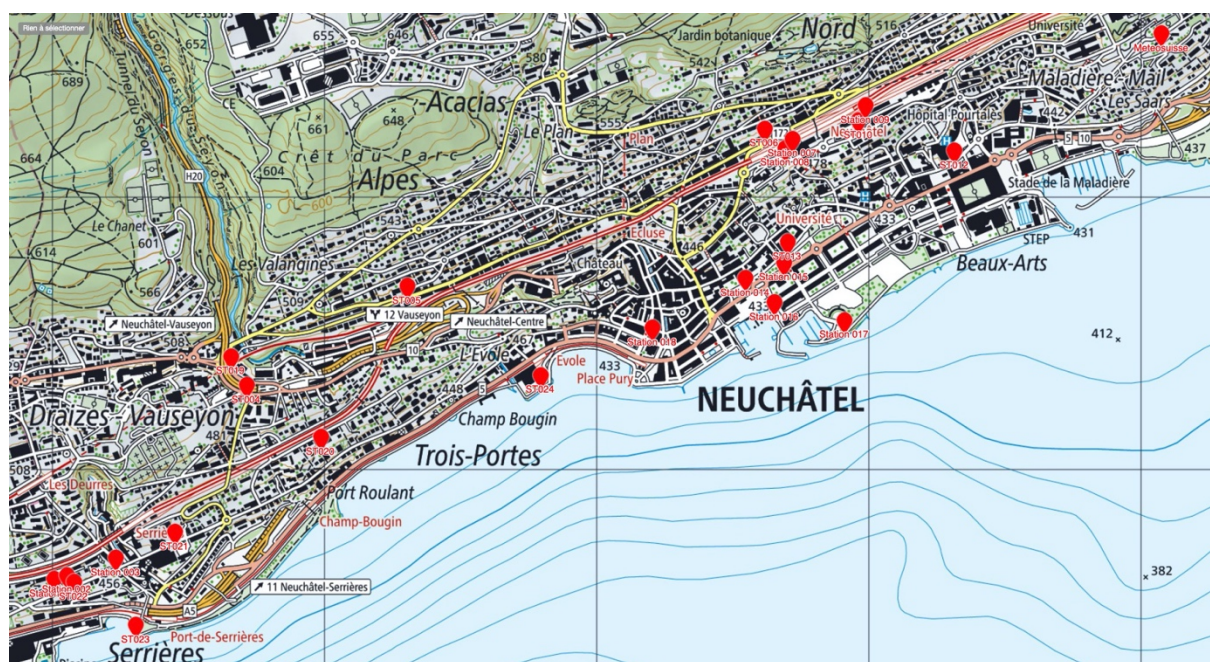


Figure 2: Localisation des stations sur la carte Swisstopo. (<https://s.geo.admin.ch/85df25b81a>).

La catégorie *Canyon* (Figure 3) signifie que la station se trouve dans une rue particulièrement longiligne, bordée de bâtiments et ouverte aux extrémités. La catégorie *Open* (Figure 4) signifie que la station est située dans un environnement plutôt ouvert, c'est à dire sans grande influence de bâtiments ou de végétation dans son environnement proche. La catégorie *Vegetation* (Figure 5) signifie que la station est influencée par de la végétation dans son proche environnement, notamment pour des stations qui se retrouvent sous la canopée d'un ou plusieurs arbres. La catégorie *Lake* (Figure 6) signifie que la station se trouve à proximité immédiate du lac de Neuchâtel.

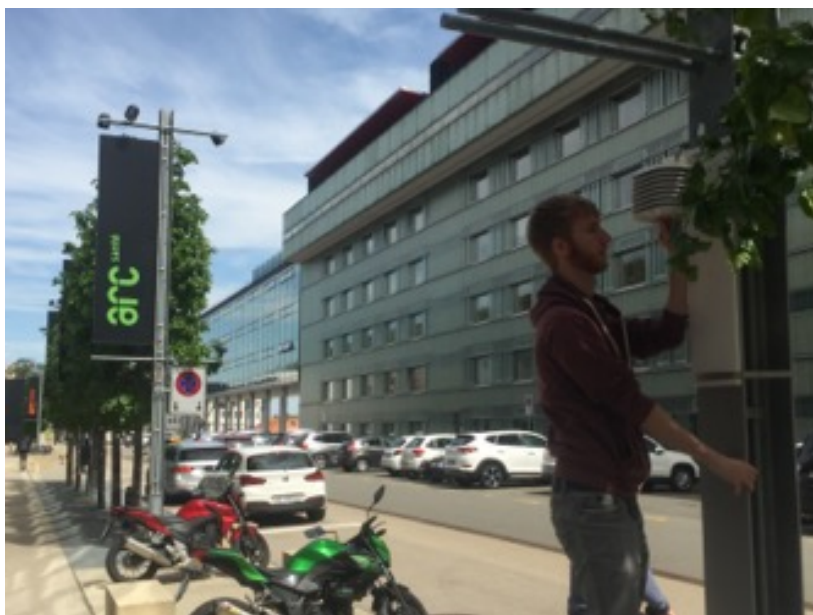


Figure 3 : Exemple de station catégorisée *Canyon*.



Figure 4 : Exemple de station catégorisée *Open*.



Figure 5 : Exemple de station catégorisée *Vegetation*.



Figure 6 : Exemple de station catégorisée *Lake*.

3. ANALYSE DES TEMPERATURES MINIMALES ET MAXIMALES JOURNALIERES

Cette partie de l'analyse porte sur les températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) de chaque jour (période de 24 heures) de l'été 2018, soit des mois de juin, juillet et août 2018. Elle consiste à évaluer les écarts apparaissant entre les températures des stations. A moins d'une advection de nouvelle masse d'air durant la période de 24 heures, les Tmin sont généralement mesurées en fin de nuit et les Tmax dans l'après-midi.

3.1. Analyse des écarts entre les températures des stations

L'analyse d'interaction (interaction plot) permet de visualiser les écarts entre les stations, pour Tmin et Tmax, pour chaque jour de l'été 2018 (Figures 7 et 8).

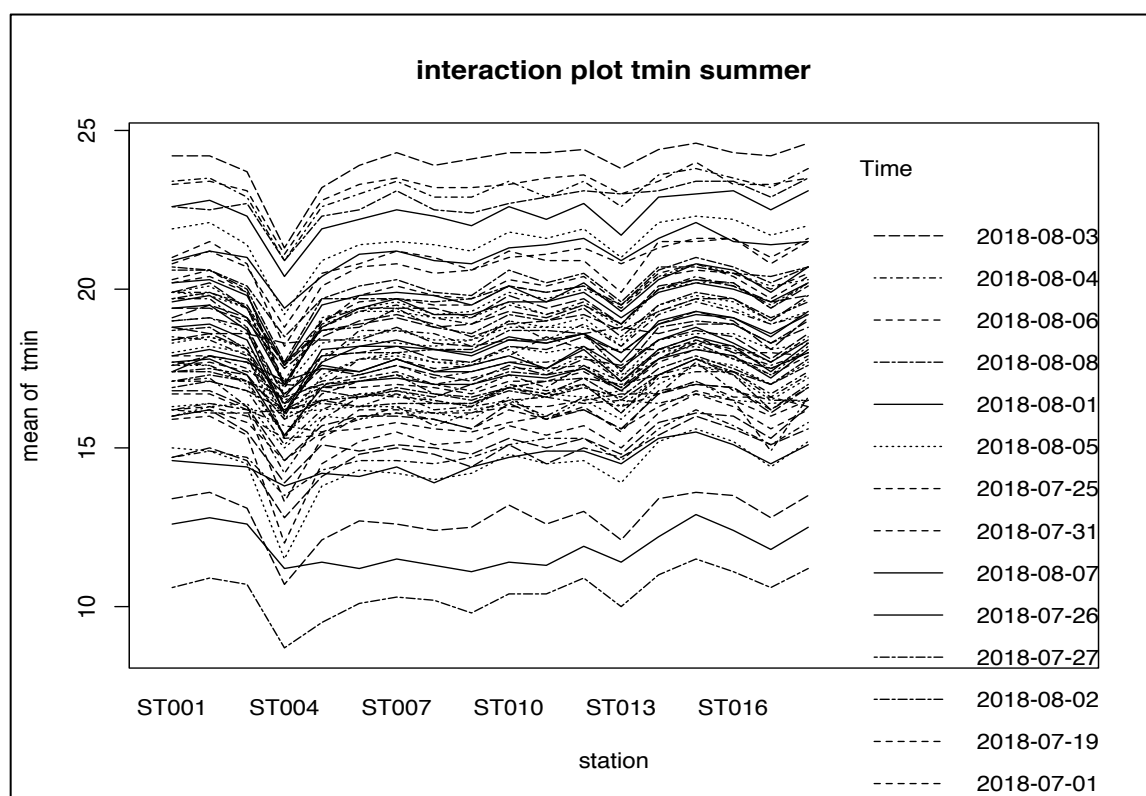


Figure 7 : Interaction plot des Tmin pour l'été 2018 pour les 18 stations.

La figure 7 présente les valeurs de températures minimales (Tmin), soit pour chaque jour les valeurs au moment sur 24 heures où la température est la plus basse. Elle permet de voir que certaines stations ont mesuré des Tmin systématiquement inférieures aux autres. Il s'agit des stations 004, 013 et 017, avec les valeurs systématiquement les plus basses à la station 004.

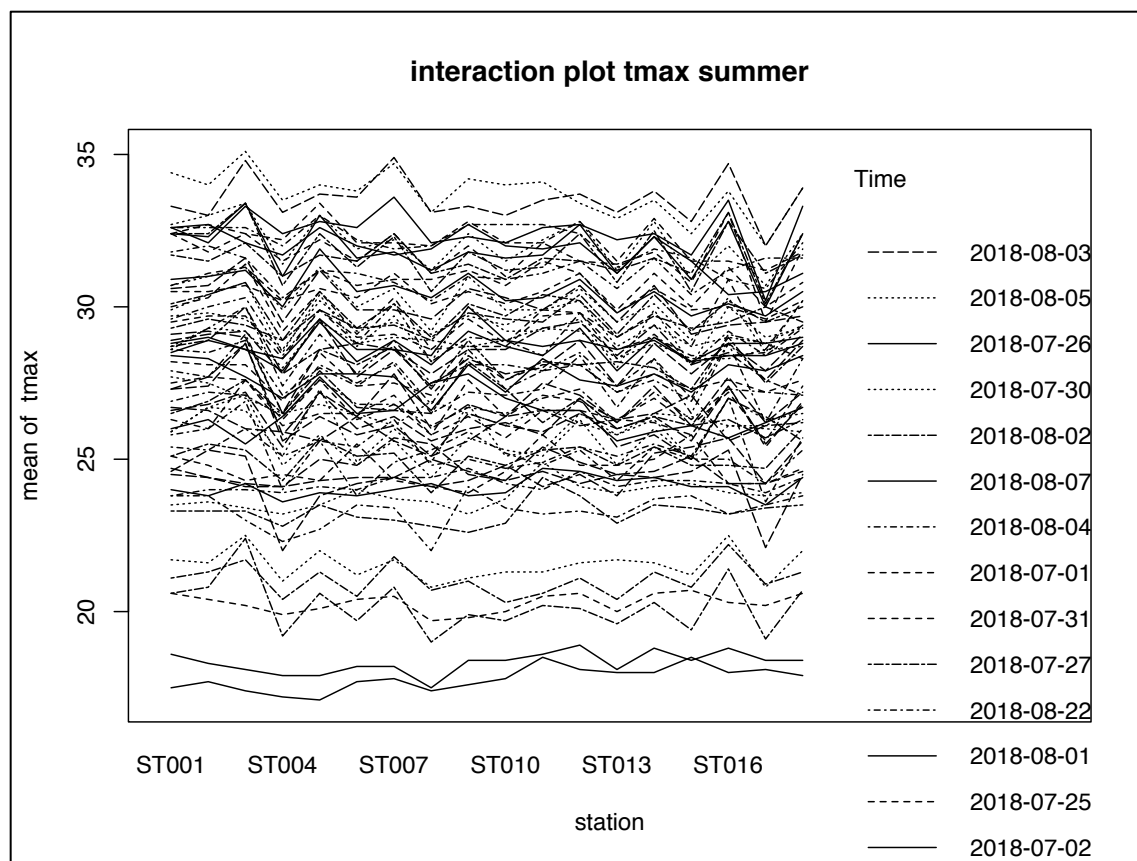


Figure 8 : Interaction plot des Tmax pour l'été 2018 pour les 18 stations.

La figure 8 présente les valeurs de températures maximales (Tmax), soit pour chaque jour les valeurs au moment sur 24 heures où la température est la plus élevée. Les tendances sont moins claires que pour les Tmin. Toutefois certaines stations se démarquent, comme à nouveau la station 004, ainsi que les stations 013 et 017, mais aussi dans ce cas les stations 006, 008 et 015.

3.2. Analyse par catégories de localisations

Les moyennes des Tmin et Tmax par catégories sur la période estivale 2018 sont présentées au tableau 2.

	Moyenne Tmin des Catégories	Moyenne Tmax des Catégories
<i>Canyon road</i> :	18.1°C	27.6°C
<i>Open</i> :	17.9°C	27.5°C
<i>Vegetation</i> :	17.6°C	26.9°C
<i>Lake</i> :	18.3°C	27.2°C

Tableau 2 : valeurs moyennes des Tmin et Tmax par catégorie

On note des écarts entre les catégories pour les Tmin et pour les Tmax. Les stations *Open* et *Vegetation* mesurent les températures les plus fraîches pour les températures minimales par rapport aux stations *Canyon* et *Lake*. En ce qui concerne les Tmax, les stations *Canyon* et *Open* mesurent des températures plus élevées que les stations *Lake* et *Vegetation*. Pour les Tmin, on a mesuré en moyenne un écart de 0.7°C entre les localisations de type *Vegetation*, les plus fraîches, et les localisations de type *Lake* dont les températures étaient les plus élevées. Pour les Tmax, on a mesuré en moyenne un écart de 0.6°C entre les localisations de type *Vegetation*, à nouveau les plus fraîches, et les localisations de type *Canyon*, dont les températures étaient les plus élevées.

L'exemple de l'évolution durant l'été des Tmax d'une station *Open* comparées à celles d'une station *Vegetation* est illustré à la Figure 9. L'écart entre les deux stations peut aller jusqu'à 4°C , les températures de la station *Vegetation* restant toujours les plus fraîches.

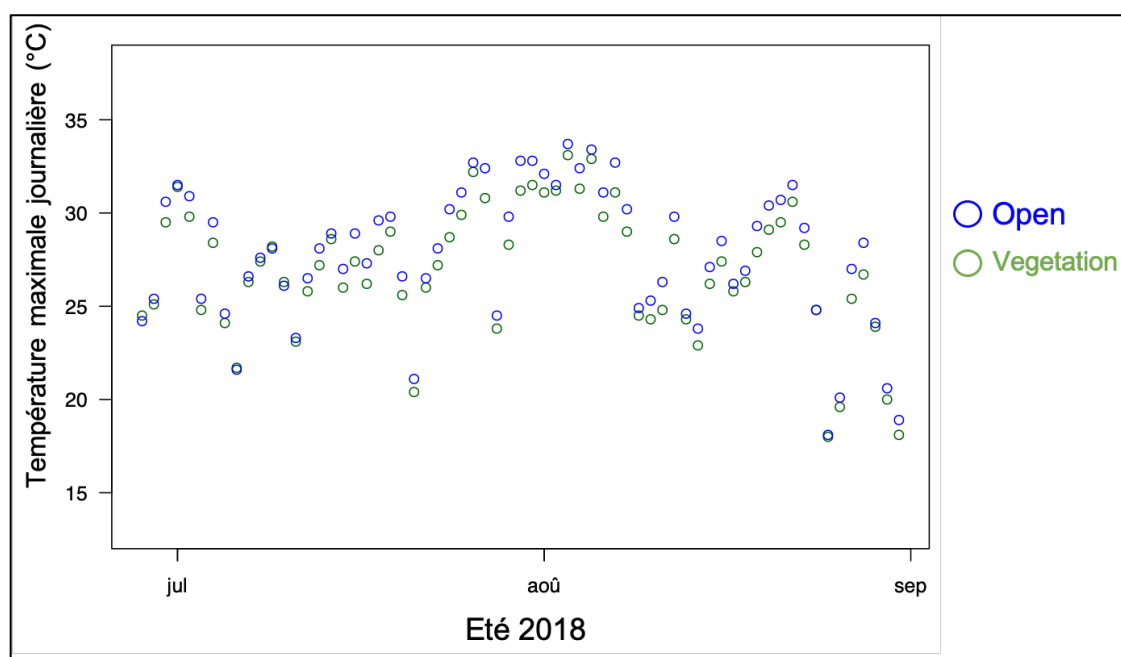


Figure 9 : Comparaison des Tmax entre une station *Open* (012, Garage Senn) et une station *Vegetation* (013, Jardin anglais).

4. ANALYSE DES JOURS LES PLUS CHAUDS

On qualifie généralement de journées caniculaires celles où les températures dépassent 30°C. Comme les températures en ville de Neuchâtel en journée sont approximativement 2°C supérieures à celles de la station de MétéoSuisse, nous avons fixé un seuil à 28°C pour sélectionner les jours les plus chauds sur la base des mesures à la station MétéoSuisse (Figure 10). 24 jours sur 65 disponibles ont dépassé ce seuil en été 2018, avec un maximum de 34,4°C mesuré le 05 août 2018.

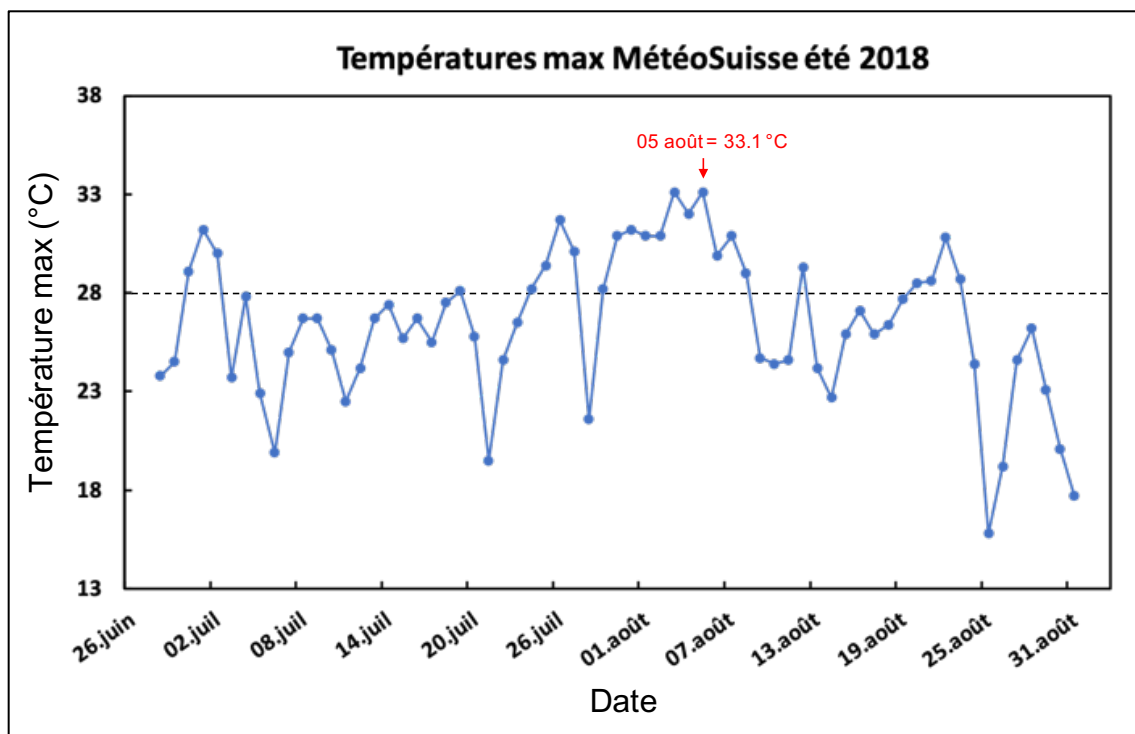


Figure10 : Mesures de Tmax de la station MétéoSuisse de Neuchâtel du 28 juin au 31 août 2018.

4.1. Comparaison des températures des différentes catégories de stations durant les deux jours les plus chauds de l'été 2018

La Figure 11 montre l'évolution des températures sur 24h pour le jour le plus chaud de l'été 2018, le 5 août.

Elle illustre les écarts entre les températures atteintes aux stations les plus représentatives de chaque catégorie, soit la station 003 (Serrières 3) pour la catégorie *Open*, la station 017 (Jeunes Rives) pour la catégorie *Lake*, la station 002 (Serrières 2) pour la catégorie *Canyon*, et la station 013 (Jardin Anglais) pour la catégorie *Vegetation*, ainsi que la station MétéoSuisse de Neuchâtel pour référence.

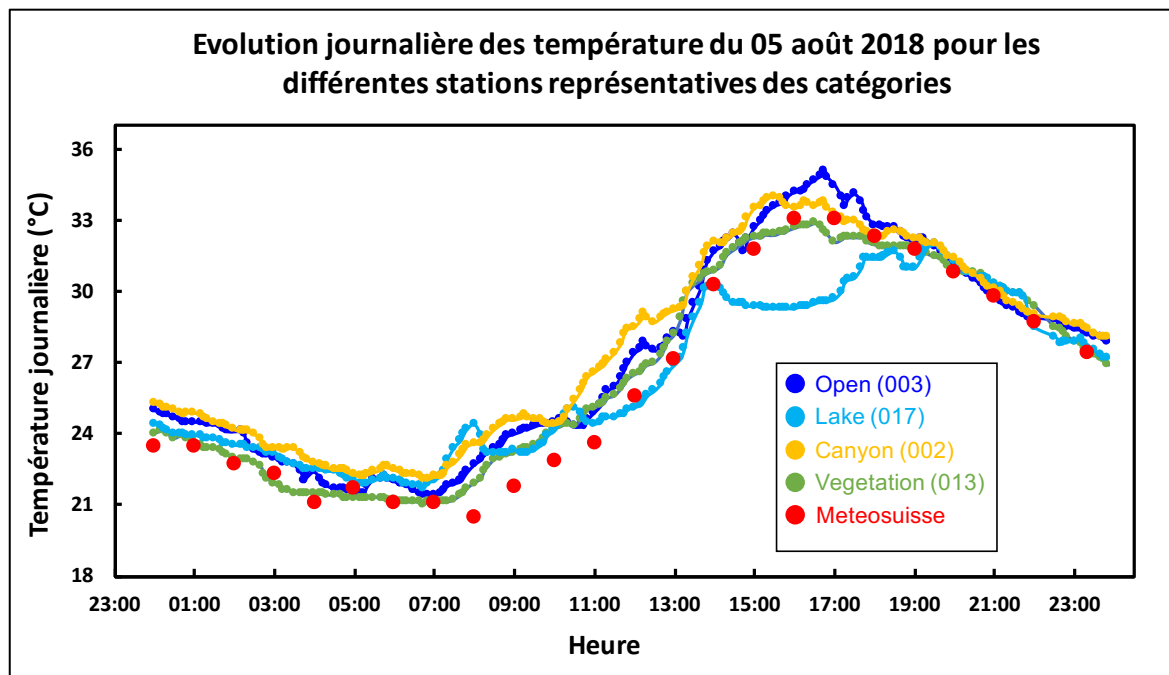


Figure 11 : Évolution de la température de l'air le **5 août 2018** de minuit à minuit pour les quatre catégories de stations (*Open*, *Lake*, *Canyon*, *Vegetation*) et la station MétéoSuisse.

Pour cette période de 24h, les températures diminuent à toutes les stations jusqu'à 7h du matin. Les stations *Vegetation* et MétéoSuisse mesurent les températures les moins élevées pour cette période nocturne avec 1 à 1,5°C de moins que les trois autres stations.

A partir de 7 h, les températures augmentent partout jusqu'aux environs de 15h, sauf pour la station *Lake*, puis elles restent relativement stables jusqu'en fin de journée, à part pour la station *Open*, où la température continue d'augmenter jusqu'aux environs de 16h avec un pic à 35,3°C.

La station *Lake* présente un profil particulier, avec des températures qui atteignent un seuil vers 14h, se stabilisent jusqu'en fin de journée, montrant des températures jusqu'à 6°C inférieures aux autres stations, avant d'augmenter à nouveau entre 17 et 19 h.

Parmi les trois autres stations, durant la période la plus chaude de la journée, de 15h à 18h, la station *Vegetation* présente les températures les plus faibles, la station *Open* les températures les plus élevées et la station *Canyon* des températures intermédiaires.

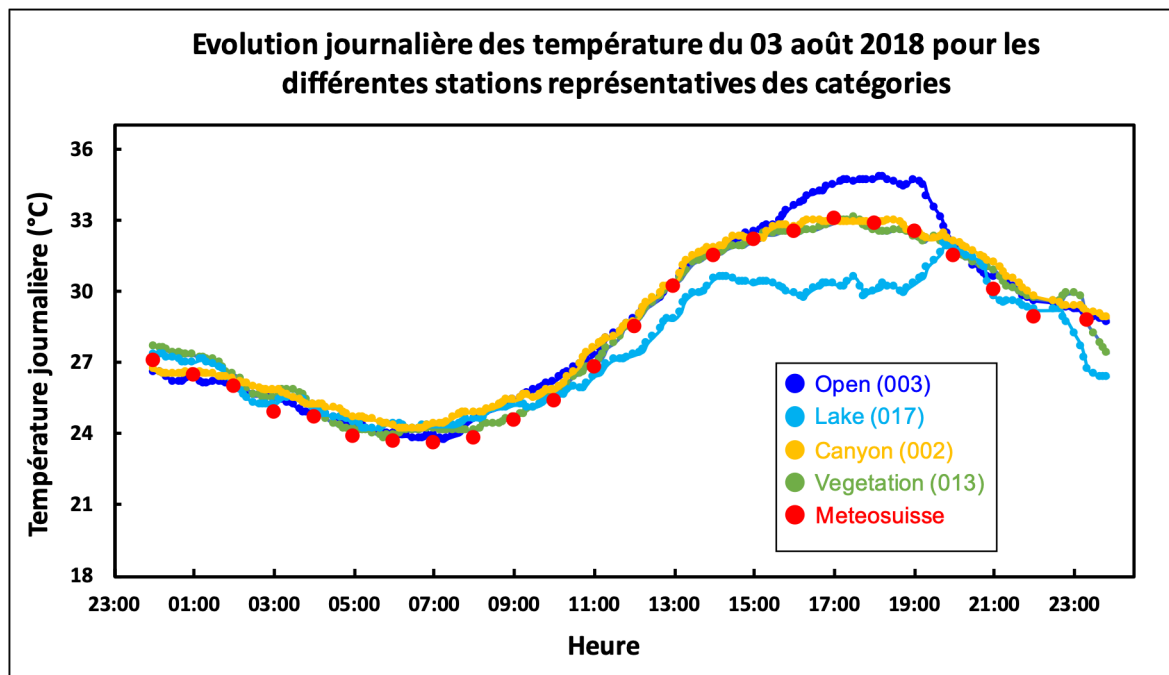


Figure 12 : Évolution de la température de l'air le **3 août 2018** de minuit à minuit pour les quatre catégories de stations (*Open*, *Lake*, *Canyon*, *Vegetation*) et la station MétéoSuisse.

La Figure 12 illustre l'évolution des températures sur 24h pour le 2^e jour le plus chaud de l'été, le 3 août 2018. On observe une baisse identique des températures durant la nuit jusque vers 7 h.

Puis elles commencent à augmenter à toutes les stations mais les différences entre les deux stations extrêmes sont plus marquées que le 5 août : la station *Open* montre à nouveau les valeurs les plus élevées et la station *Lake* les plus fraîches, avec une différence de 4 à 6°C entre 15h et 19h. Les autres stations évoluent avec des valeurs très proches les unes des autres.

5. COMPARAISON DES TEMPERATURES ENTRE LES CATEGORIES DE STATIONS

Les températures ont été analysées par catégories de stations afin d'évaluer l'impact des différents types d'environnement urbain. Ces comparaisons ont été faites en distinguant plusieurs seuils de températures.

D'une part avec l'ensemble des jours, indépendamment des valeurs des températures mesurées, et également en ne retenant que les jours durant lesquels la température a dépassé quatre seuils, soit 26°C, 28°C, 30°C et 32°C, ces seuils étant mesurés à la station de MétéoSuisse.

5.1 Comparaison des températures moyennes journalières des catégories de stations

Cette analyse concerne les potentielles analogies ou différences de comportements des températures moyennes journalières entre les quatre catégories de stations ainsi que MétéoSuisse. La Figure 13 illustre les températures moyennes journalières mesurées aux différentes catégories de stations pour l'ensemble des jours d'une part et d'autre part pour les jours les plus chauds seulement, soit ceux ayant dépassé chacun des quatre seuils indiqués. Elle permet de voir les différences de comportements entre les catégories de stations.

En prenant en compte l'ensemble des jours de la période estivale (Figure 13a), les catégories apparaissent significativement différentes. Toutes les catégories de stations (*Canyon*, *Open*, *Lake* et *Vegetation*) mesurent une température moyenne plus élevée que la station MétéoSuisse, avec des écarts d'environ 1,5°C.

La catégorie *Canyon* mesure des températures plus élevées que les catégories *Open*, *Lake* et *Vegetation*. Cette analyse met bien en évidence l'écart existant entre les températures mesurées en milieu urbain et celles mesurées dans les conditions beaucoup moins urbanisées du parc de l'Observatoire cantonal où se trouve la station de MétéoSuisse, en milieu ouvert au milieu d'une petite prairie.

En sélectionnant seulement les jours durant lesquels la température de la station MétéoSuisse a dépassé les seuils de 26 et 28°C (Figure 13 b et 13c), deux groupes de catégories d'environnements urbains se distinguent, les catégories *Canyon* et *Open* mesurant des températures significativement plus élevées que les catégories *Lake* et *Vegetation*, ainsi que MétéoSuisse.

En se focalisant sur les jours durant lesquels la température de la station MétéoSuisse, a dépassé les seuils de 30 et 32°C (Figure 13 d et 13e), les écarts s'atténuent. Pour le seuil 32°C, la catégorie *Lake* est celle qui a mesuré les températures les plus élevées (Figure 13 e) suivie par la catégorie *Open*. Les autres catégories ne montrent plus de différences significatives entre elles.

Il est à noter que même si les écarts entre ces températures moyennes journalières sont significatives, ils restent relativement faibles, de l'ordre de quelques dixièmes de degrés.

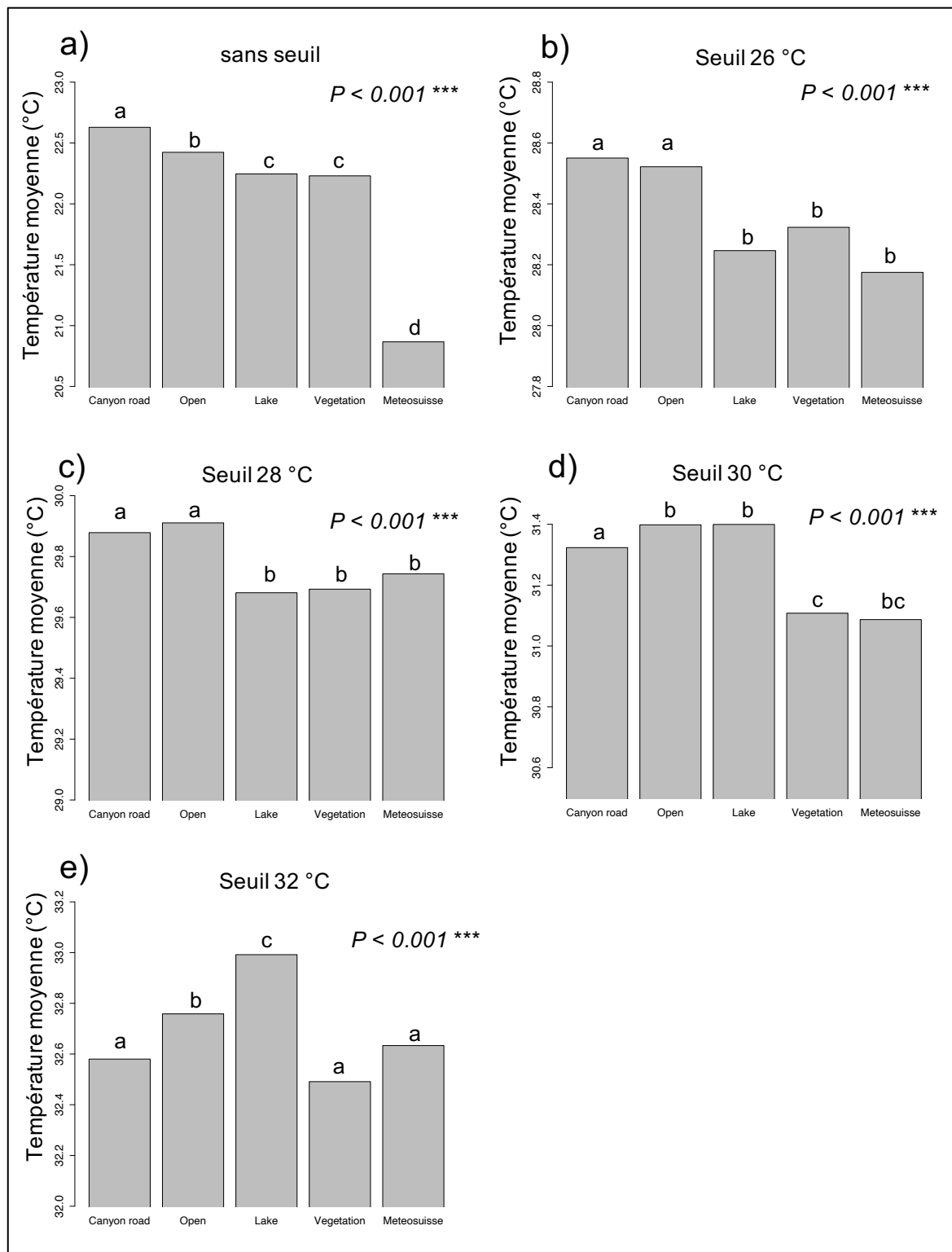


Figure 13 : Comparaison des températures moyennes journalières mesurées aux stations des différentes catégories pour l'ensemble des jours (a), pour les jours où les températures dépassent 26°C (b), 28°C (c), 30°C (d) et 32°C (e). La valeur de la probabilité du test statistique (P) d'analyse de variance est indiquée avec sa significativité (***). La valeur du test post-hoc Tuckey est indiquée par une lettre au-dessus de chaque catégorie. Ces lettres indiquent des écarts significatifs entre les catégories lorsqu'elles sont différentes les unes des autres.

5.2 Comparaison des températures minimales et maximales des catégories de stations

L'analyse des Tmin et Tmax journalières en fonction des différentes catégories (Figure 14a, 14b) montre dans les deux cas une répartition significative en deux groupes avec les températures urbaines d'un côté et la station MétéoSuisse de l'autre.

Les mesures des stations des quatre catégories urbaines montrent des températures toujours plus élevées que celles de la station MétéoSuisse, que ce soit pour les Tmax ou pour les Tmin.

Les catégories urbaines ne montrent pas de différences significatives entre-elles même si la catégorie *Vegetation* mesure des températures un peu inférieures aux trois autres. Les différences sont de l'ordre de 2°C entre les températures de la station MétéoSuisse et celles des stations urbaines.

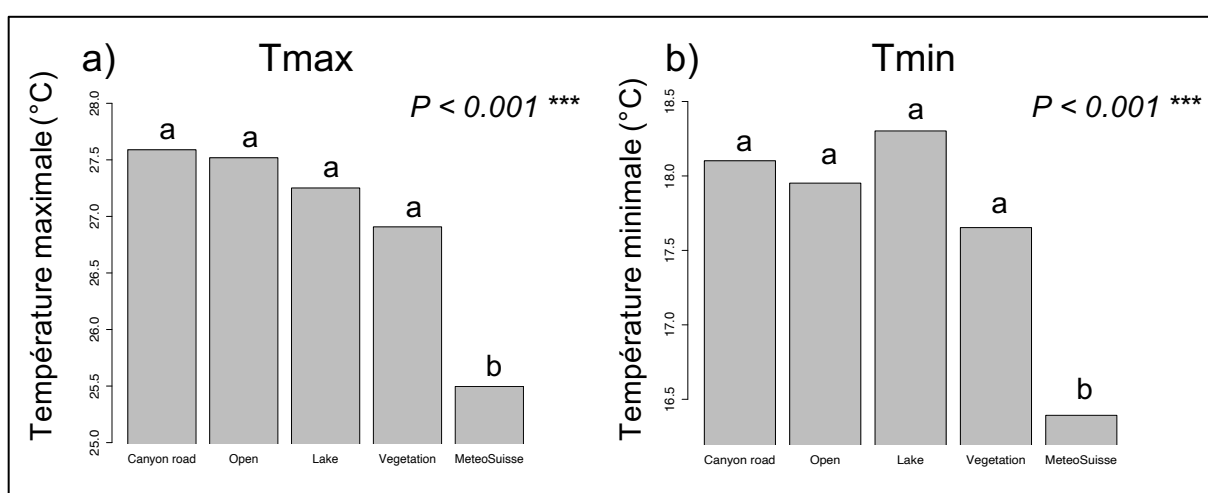


Figure 14 : Comparaison des moyennes des Tmax et des Tmin mesurées aux stations des différentes catégories. La valeur de la probabilité du test statistique (P) d'analyse de variance est indiquée avec sa significativité (***). La valeur du test post-hoc Tuckey est indiquée par une lettre au-dessus de chaque catégorie. Ces lettres indiquent des écarts significatifs entre les catégories lorsqu'elles sont différentes les unes des autres.

5.3 Comparaison des températures moyennes journalières pour une station représentative de chaque catégorie

Chaque station urbaine ayant été classée dans l'une des quatre catégories sur la base de son environnement, toutes les stations ne sont inévitablement pas parfaitement représentatives de leurs catégories. Pour mieux mettre en évidence l'effet de certains environnements typiques des stations, nous avons comparé à nouveau les températures moyennes journalières en ne prenant cette fois en compte qu'une seule station par catégorie, choisie comme la plus représentative de ce type d'environnement urbain. Ces stations sont les suivantes :

- a) Station *Canyon* : 002 "Serrières 2"
- b) Station *Open* : 003 "Serrières 3"
- c) Station *Lake* : 017 "Jeunes rives"

d) Station *Vegetation* : 013 "Jardin anglais"

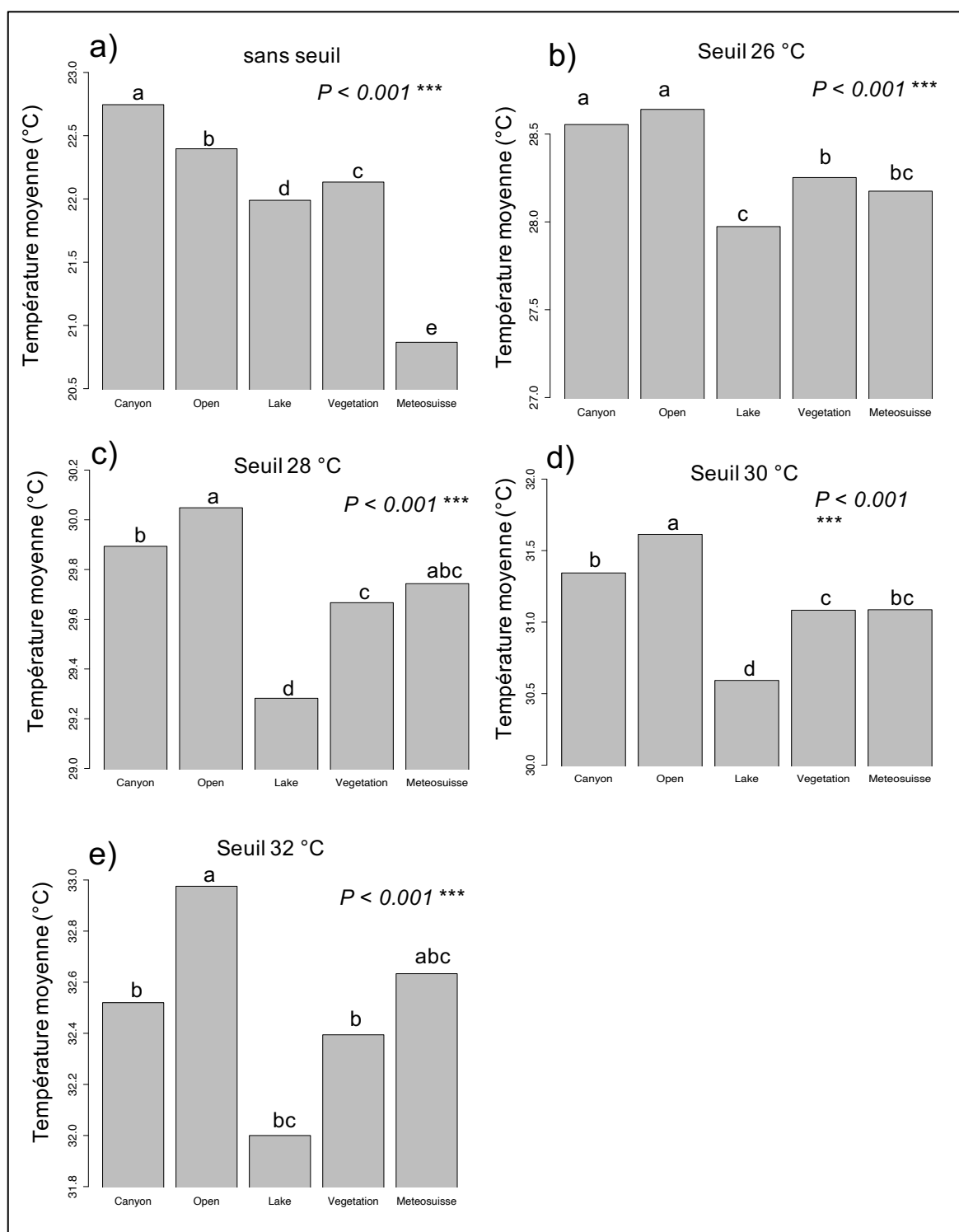


Figure 15 : Comparaison des températures moyennes journalières mesurées à une seule station représentative par catégorie, pour l'ensemble des jours (a), pour les jours où les températures dépassent 26°C (b), 28°C (c), 30°C (d) et 32°C (e). La valeur de la probabilité du test statistique (P) d'analyse de variance est indiquée avec sa significativité (***). La valeur du test post-hoc Tuckey est indiquée par une lettre au-dessus de chaque catégorie. Ces lettres indiquent des écarts significatifs entre les catégories lorsqu'elles sont différentes les unes des autres.

Sur l'ensemble de la période, toutes les localisations urbaines mesurent en moyenne des températures significativement plus élevées que la station MétéoSuisse (Figure 15a), dans le parc de l'Observatoire de Neuchâtel.

Lorsque l'on sélectionne seulement les jours les plus chauds, à partir de 26°C mais plus nettement encore pour les seuils plus élevés, la station *Lake* possède les températures les plus basses (Figure 15b, 15c, 15d, 15e), inférieures même aux valeurs mesurées à la station de MétéoSuisse et à celles de la station *Vegetation*.

Cela s'explique par les températures du lac, qui possèdent une plus grande inertie au cours de l'année et de la journée que celles des surfaces minérales ou végétales. Les températures estivales du lac ne dépassent guère 24°C.

Ainsi lorsque les températures atmosphériques sont plus élevées que celles du lac, comme c'est le cas en journée pour les différents seuils choisis, la présence du lac rafraîchit les secteurs situés à proximité.

La température de la station *Vegetation* est proche de celle de la station MétéoSuisse (Figure 15b, 15c, 15d) et devient plus fraîche que celle-ci lors des jours les plus chauds au-delà du seuil de 32°C (Figure 15e). Cela montre que le couvert de la canopée a un effet particulièrement important lorsque les températures sont les plus élevées.

5.4 Comparaison des températures minimales et maximales pour une station représentative de chaque catégorie

Nous avons aussi comparé à nouveau les Tmin et Tmax journalières en ne prenant en compte qu'une seule station par catégorie, la plus représentative de ce type d'environnement urbain. Les résultats (Figure 16), montrent une différenciation plus fine des catégories urbaines pour la Tmax (Figure 16a), par rapport à la Figure 14a, où toutes les stations sont prises en compte.

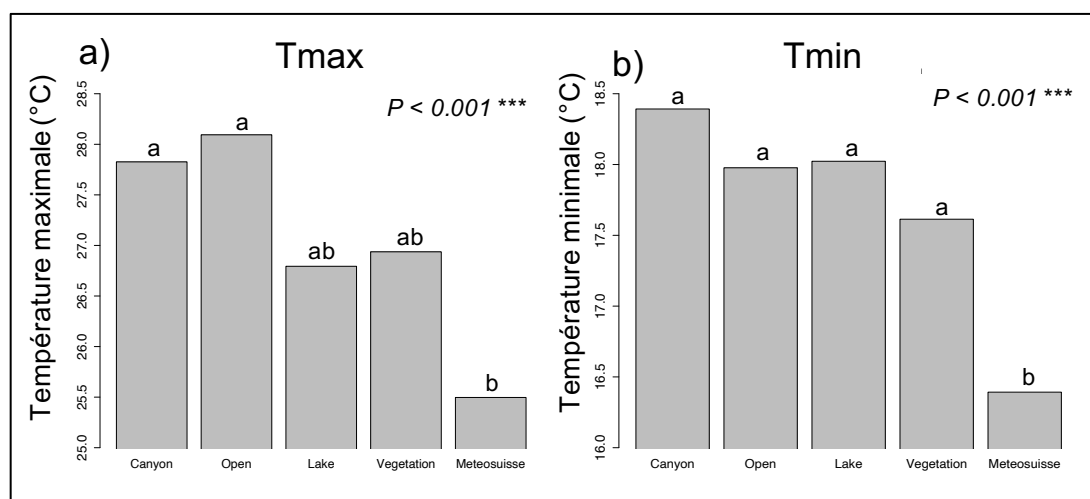


Figure 16 : Comparaison des Tmin et Tmax journalières mesurées à une seule station représentative par catégorie, pour l'ensemble des jours (a), pour les jours où les températures dépassent 26°C (18b), 28°C (18c), 30°C (18d) et 32°C (18e). La valeur de la probabilité du test statistique (P) d'analyse de variance est indiquée avec sa significativité (***). La valeur du test post-hoc Tuckey est indiquée par une lettre au-dessus de chaque catégorie. Ces lettres indiquent des écarts significatifs entre les catégories lorsqu'elles sont différentes les unes des autres.

Parmi les stations urbaines, on observe en effet clairement deux groupes distincts, avec d'un côté les stations *Canyon* et *Open* dont les températures sont les plus élevées, et de l'autre côté *Lake* et *Vegetation* dont les températures sont plus basses et se rapprochent de celles de la station MétéoSuisse qui reste la station la plus fraîche des catégories.

Les T_{min} (Figure 16b) au contraire ne montrent pas de différences significatives entre les températures des stations urbaines. Elles restent significativement plus élevées que la station MétéoSuisse, avec une différence d'environ 2°C.

6. RELATIONS ENTRE LA VITESSE DU VENT ET LES TEMPERATURES JOURNALIERES

La vitesse du vent mesurée à la station MétéoSuisse et les températures moyennes journalières en ville de Neuchâtel ne laissent pas apparaître de relation particulière (Figure 17). Les deux paramètres varient de manière indépendante.

On voit que la température moyenne des stations peut varier de plusieurs degrés pour une vitesse de vent équivalente et on peut mesurer des températures du même ordre avec une vitesse de vent faible ou forte, y compris pour la vitesse la plus élevée mesurée durant la période, soit 31.5 Km/h.

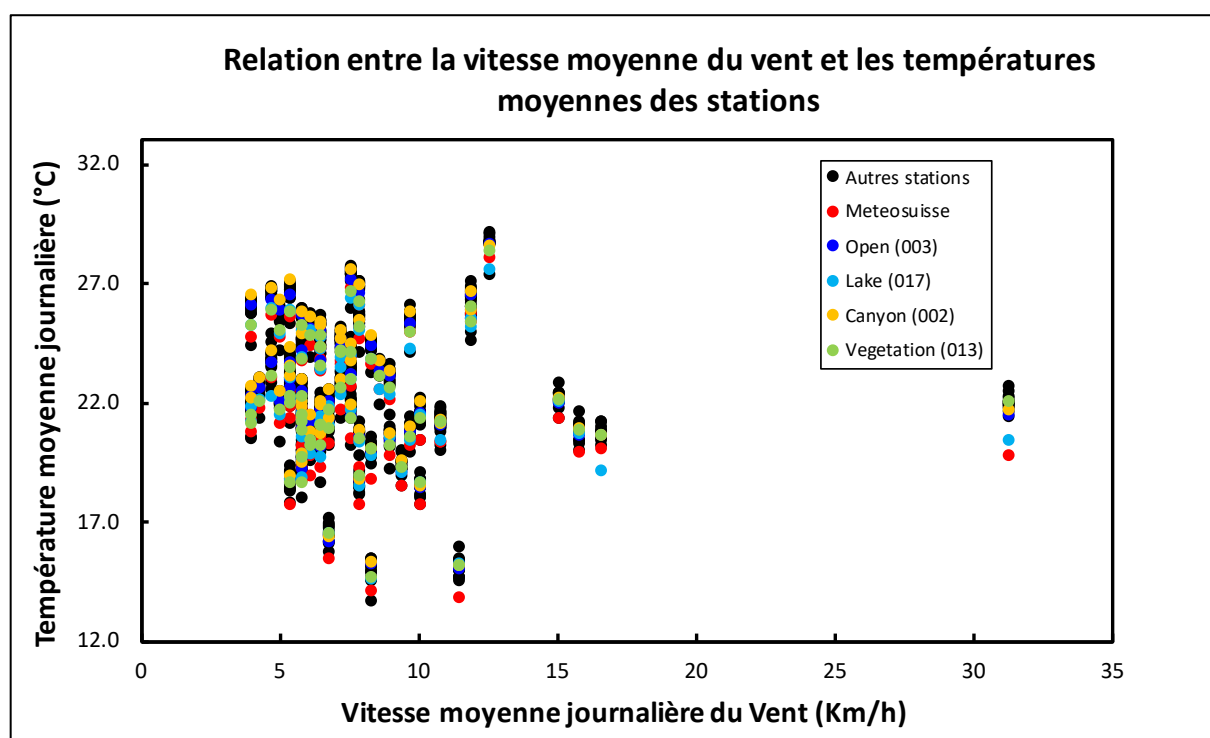


Figure 17 : Température moyenne journalières des stations en fonction de la valeur moyenne journalière du vent mesuré à la station MétéoSuisse de Neuchâtel pendant la période estivale. Les différentes couleurs représentent les stations représentatives de leur catégorie, les autres stations toutes confondues ainsi que la station MétéoSuisse.

7. MESURES DE L'ÉTÉ 2019.

L'été 2019 a été dans l'ensemble moins chaud que celui de 2018. On a relevé deux périodes caniculaires de quelques jours, la première à la fin du mois de juin et la seconde à la fin du mois de juillet (Figure 18). Les températures sont par ailleurs montées à plusieurs reprises au-dessus de 28°C durant des journées isolées. A deux reprises un afflux d'air froid a fait descendre les Tmax autour de 18°C, avec des contrastes d'une quinzaine de degrés en 48 h.

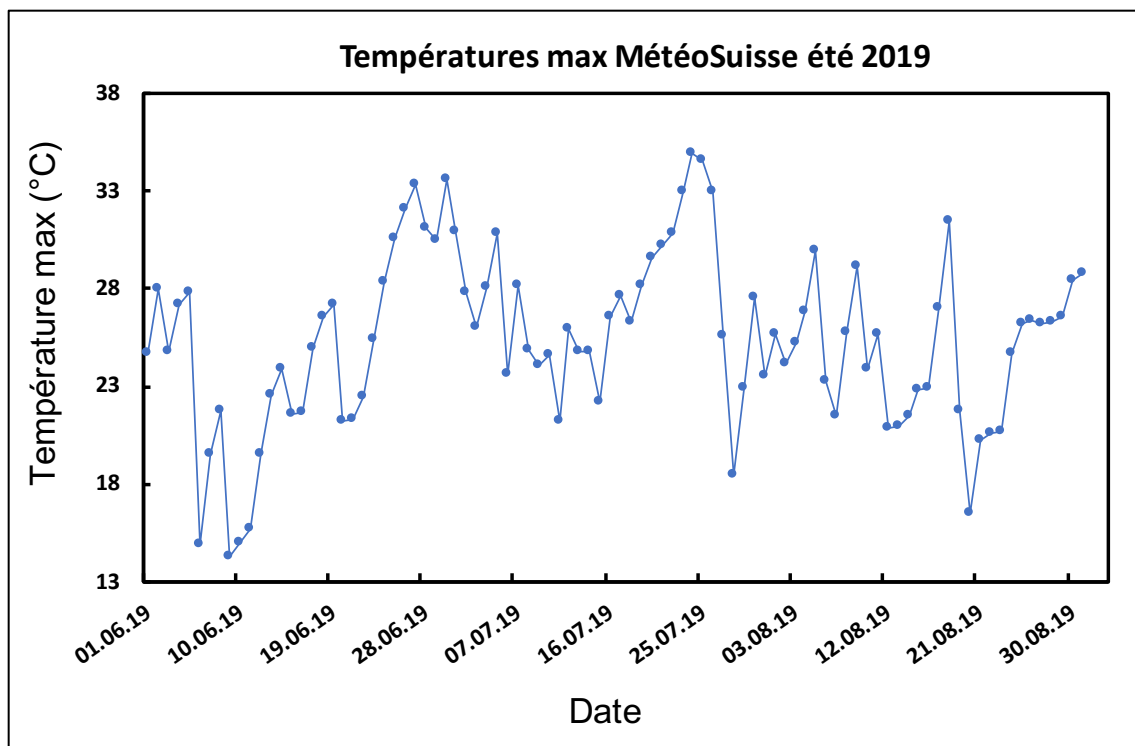


Figure 18 : Mesures de Tmax de la station MétéoSuisse de Neuchâtel du 01 juin au 31 août 2019.

7.1. Températures des différentes catégories de stations en 2019

La Figure 19 compare les températures moyennes des différentes catégories de stations pour l'été 2018 (Figure 19a) et pour l'été 2019 (Figure 19b). Elle montre que les valeurs moyennes sont plus basses en 2019 qu'en 2018, dans l'ensemble et également individuellement pour chaque catégorie.

La station MétéoSuisse possède les températures les plus basses et la catégorie *Canyon* les températures les plus élevées durant les deux étés. Les écarts entre les catégories urbaines restent relativement faibles, de 0.5 à 1°C pour ces valeurs moyennes.

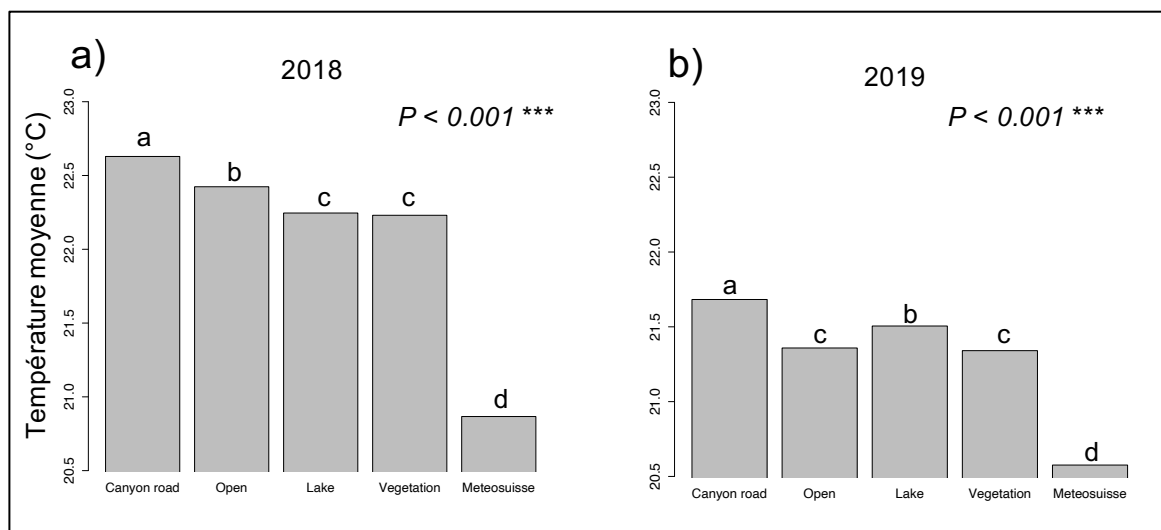


Figure 19 : Comparaison des températures moyennes pour la période estivale des différentes catégories pour l'été 2018 (a) et pour l'été 2019 (b). La valeur de la probabilité du test statistique (P) d'analyse de variance est indiquée pour chaque situation, nous indiquant s'il existe une différence significative entre les catégories (***). La valeur du test post-hoc Tuckey est indiquée par une lettre au-dessus de chaque catégorie, nous montrant les différences significatives entre les catégories si les lettres sont différentes. L'axe des abscisses pour les deux graphes est à la même échelle, permettant une meilleure comparaison.

7.2. Températures dans le secteur de la sortie de la Gorge du Seyon

Lors de la première analyse des données de l'été 2018, il est apparu que les températures de la station 004 (Collège de Vauseyon) se comportaient différemment de celles des autres stations, avec des valeurs inférieures, en particulier pour les températures nocturnes (Figure 7), ce que l'aménagement urbain de type *Open* ne laissait pas présager.

La comparaison des T_{min} sur l'ensemble de la saison estivale 2018 (Figure 20), entre la station 004 (Collège de Vauseyon) et la station *Canyon* 001 (Serrières 1) confirme que les valeurs mesurées sont systématiquement inférieures à la station 004.

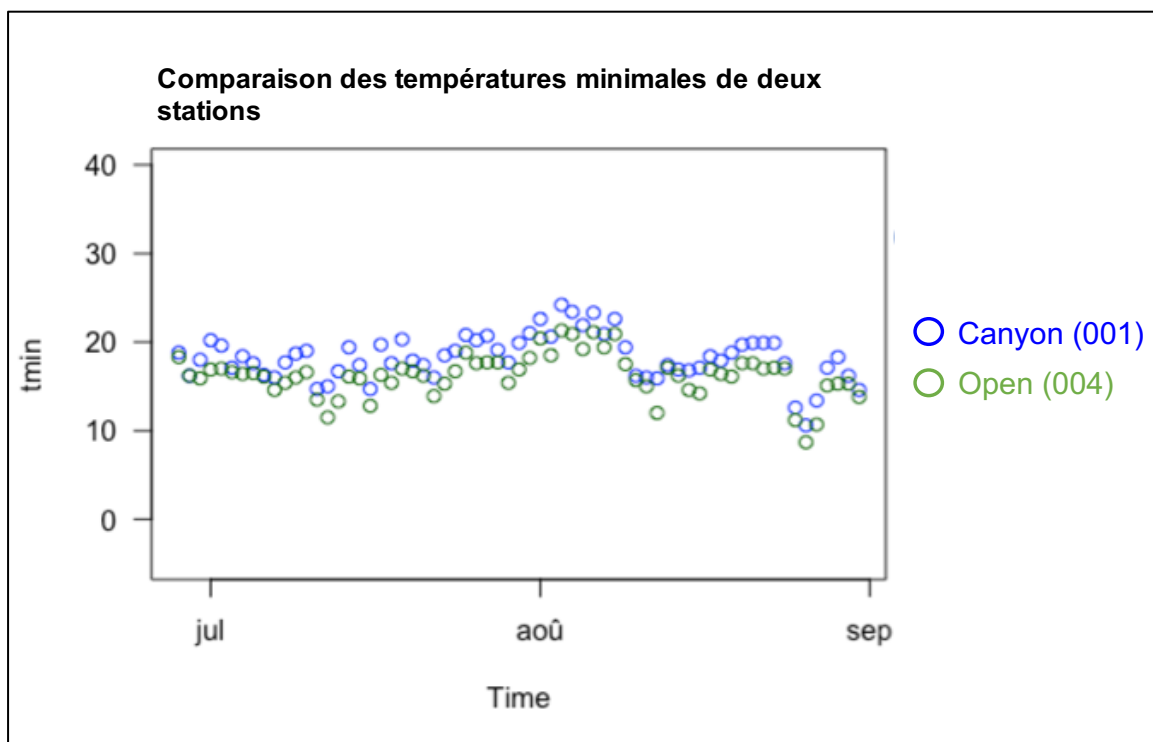


Figure 20 : Comparaison des Tmin journalières estivales 2018 entre la station *Open* 004 (Collège de Vauseyon) et la station *Canyon* 001 (Serrières 1).

Nous avons émis l'hypothèse que cette station voyait ses températures rafraîchies par la brise descendante en provenance de la gorge du Seyon. Pour vérifier cette hypothèse nous avons installé en juin 2019 une station supplémentaire, un peu plus en amont, la station 019 (Mille-Boilles).

L'analyse des mesures de ces deux stations *Open* (004 et 019) proches de la sortie de la gorge du Seyon confirme notre hypothèse, comme l'illustre la Figure 21. Elle montre les températures qui y ont été mesurées le jour le plus chaud de l'été 2019, soit le 23 juillet 2019 et les compare en outre avec les données de la station *Open* 003 (Serrières 3) et celles de la station de MétéoSuisse.

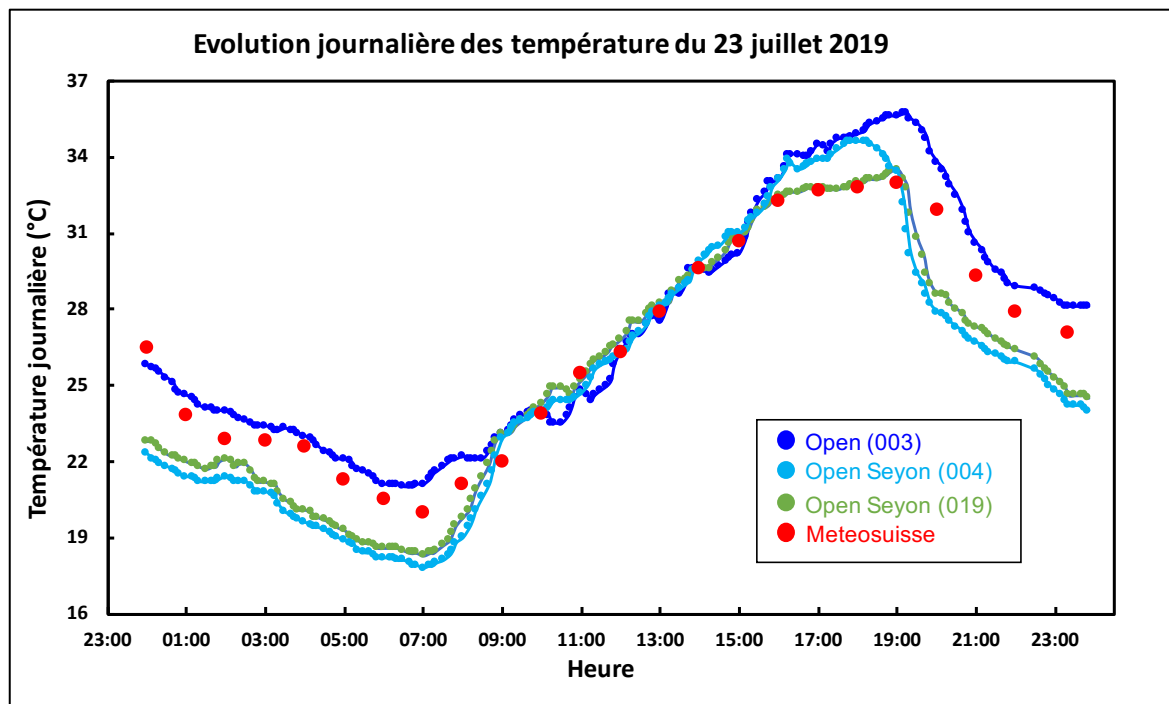


Figure 21 : Évolution de la température de l'air le 23 juillet 2019 de minuit à minuit aux deux stations *Open* proches de la Gorge du Seyon (004 et 019), à la station *Open* 003 (Serrières 3) et à la station de MétéoSuisse.

La Figure 21 montre que, durant la nuit (environ de 19 h à 8 h) les deux stations situées en aval de la Gorge du Seyon voient une évolution des températures très similaire entre elles mais de plusieurs degrés inférieurs à celle de la station *Open* 003 (Serrières 3). Elles sont également plus basses que celles de la station MétéoSuisse. Durant la journée les deux stations de la Gorge du Seyon ne se différencient pas significativement des autres, mais durant la période la plus chaude de la journée, la station la plus proche de la Gorge (019) maintient des valeurs nettement plus basses que celles des deux autres stations *Open* et proches de celles de la station MétéoSuisse.

Les données de ces deux stations confirment que la topographie de la Gorge du Seyon apporte de l'air froid qui descend la vallée, refroidissant ainsi de plusieurs degrés une partie du quartier durant la nuit.

8. Conclusions.

L'analyse des mesures de températures in situ à l'aide de capteurs placés à une hauteur sur sol de 2,5m en ville de Neuchâtel montre que ce type d'étude est possible dans une petite ville suisse contrairement à ce que des collègues nous rapportent de leurs expériences dans des métropoles européennes où les appareils ont majoritairement subi des déprédations. A Neuchâtel seule une installation a disparu involontairement, suite à un accident de la route impliquant le poteau sur lequel elle était installée et qui a dû être changé.

Les mesures par capteurs in situ protégés du rayonnement du poteau hôte par une planche en bois peinte en blanc se sont avérées fiables et de bonne qualité pour effectuer les analyses des températures estivales en ville.

Les résultats des analyses montrent que conformément aux attentes, il existe bien un îlot de chaleur urbain, aussi dans une ville de taille relativement réduite comme Neuchâtel.

Les analyses montrent que certaines caractéristiques connues dans le milieu urbain mais aussi des spécificités du site de Neuchâtel jouent un rôle dans les valeurs de températures mesurées aux différentes stations.

De manière générale, les stations urbaines mesurent des températures plus élevées que la station de référence de MétéoSuisse, qui elle se situe un peu à l'extérieur de la ville dans une zone ouverte mais végétalisée.

Nos résultats montrent que les stations urbaines dans un contexte minéral avec des aménagements de type *Open* et les rues en *Canyon* mesurent les températures les plus élevées, et les stations plus végétalisées ou à proximité immédiate du lac des températures plus basses, ces deux facteurs induisant généralement un léger refroidissement. On soulignera que ces différences entre les catégories sont accentuées lors des jours les plus chauds. Nos résultats montrent que les aménagements de type *Open* présentent les températures les plus élevées aux heures les plus chaudes des jours les plus chauds alors que les stations *Vegetation* gardent les températures les plus fraîches dans ces moments-là.

Comme on s'y attendait les sites les plus minéraux manifestent donc l'effet de l'îlot de chaleur le plus fort, avec des écarts pouvant aller jusqu'à plusieurs degrés par rapport à des environnements plus favorables. Au contraire les sites les plus végétalisés mesurent des températures généralement plus fraîches.

Toutefois il faut une surface végétale relativement importante et de grands arbres pour rafraîchir sensiblement les températures. Les écarts mesurés selon les circonstances entre les trois stations du Jardin anglais, du Marronnier de la gare et de MétéoSuisse illustrent à la fois l'intérêt de la végétalisation et ses limites. Le Marronnier de la gare rafraîchit certes les températures comparativement aux mesures effectuées sur la Place de la gare à quelques mètres de distance, sous un couvert artificiel, mais dans des proportions qui n'égale pas celles des deux autres stations végétalisées. Les températures mesurées sous un arbre du Jardin anglais bénéficient en effet de l'impact rafraîchissant de la canopée tandis que celles du Parc de l'Observatoire où se trouve la station de MétéoSuisse bénéficient d'une relativement grande surface de prairie avec des arbres à proximité assurant un rafraîchissement sensible dans la majorité des circonstances.

Nos mesures confirment les résultats synthétisés par l'OFEV. Si l'on peut détecter l'effet sur les températures d'une végétalisation même de moindre envergure, un effet sensible de rafraîchissement des logements alentours se mesure efficacement à partir d'une surface de

10 000 mètres carrés et avec la présence de grands arbres (*OFEV 2018, Quand la ville surchauffe, 110 pp.*).

Les particularités que nos analyses font apparaître en ville de Neuchâtel sont de trois ordres : la présence du lac, le relief de collines et du Jura et les quelques gorges, vallons et rivières (Seyon, Serrières) orientés perpendiculairement au relief jurassien.

Nos mesures ont montré que le lac constitue un apport de fraîcheur en journée, à proximité immédiate, lorsque les températures sont très élevées et que la brise thermique se dirige du lac en direction de la ville. La nuit en revanche, le lac peut réduire le rafraîchissement nocturne à proximité si la brise de montagne est insuffisante.

Le relief jurassien et en particulier la gorge du Seyon constituent une source de fraîcheur importante et très constante durant la période nocturne. Les températures mesurées à l'embouchure de la gorge sont remarquablement fraîches dans un contexte pourtant très minéral.

Ainsi les aménagements futurs pourront dans la mesure du possible tenir compte premièrement des recommandations habituelles visant à réduire les ilots de chaleurs en périodes caniculaires.

Il s'agira d'augmenter les surfaces végétalisées en faisant un maximum de place aux grands arbres. Ceux-ci seront efficaces pour autant que leur couronne soit vaste et qu'il s'agisse d'essences aptes à rafraîchir les températures, soit des feuillus et non pas des résineux, en évitant tout particulièrement les pins dont il a été montré qu'ils tendent à augmenter les températures estivales plutôt qu'à les réduire (voir p. ex. Renaud et Rebetez, 2009, *Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer of 2003. Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 873-880. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.11.006). On privilégiera également les essences supportant bien les conditions de températures de plus en plus élevées liées au changement climatique.

Il s'agira également de maintenir un maximum d'eau de surface dans les espaces verts et au pied des arbres. C'est en effet le processus d'évaporation qui permet aux températures de se rafraîchir. Un grand arbre pouvant évaporer chaque jour d'importantes quantités d'eau ce sont autant de calories enlevées à l'atmosphère environnante. En outre l'eau en mouvement (ruisseaux et rivières à l'air libre) pourra aussi être favorisée à chaque fois que possible pour rafraîchir l'atmosphère grâce au processus d'évaporation directe.

Dans le contexte spécifique à Neuchâtel, les ouvertures dans le bâti permettant une ventilation en provenance du Jura sur un axe perpendiculaire au relief permettront de rafraîchir certains secteurs. La ville étant logiquement bâtie avec une partie de ses rues fermées, parallèles au relief, en forme de canyon, des ouvertures permettent une ventilation fraîche durant la nuit.

Nos résultats montrent que le lac permet de rafraîchir les températures en journée, surtout aux moments les plus chauds, mais seulement à proximité relativement immédiate. Le lac doit donc surtout être privilégié comme zone de détente en journée. Les accès pourront être facilités et les aménagements favoriseront idéalement des zones de parcs arborisés au bord de l'eau où la circulation des piétons et des cyclistes ainsi que les activités de repos et de loisirs seront possibles à l'ombre de larges canopées de feuillus.