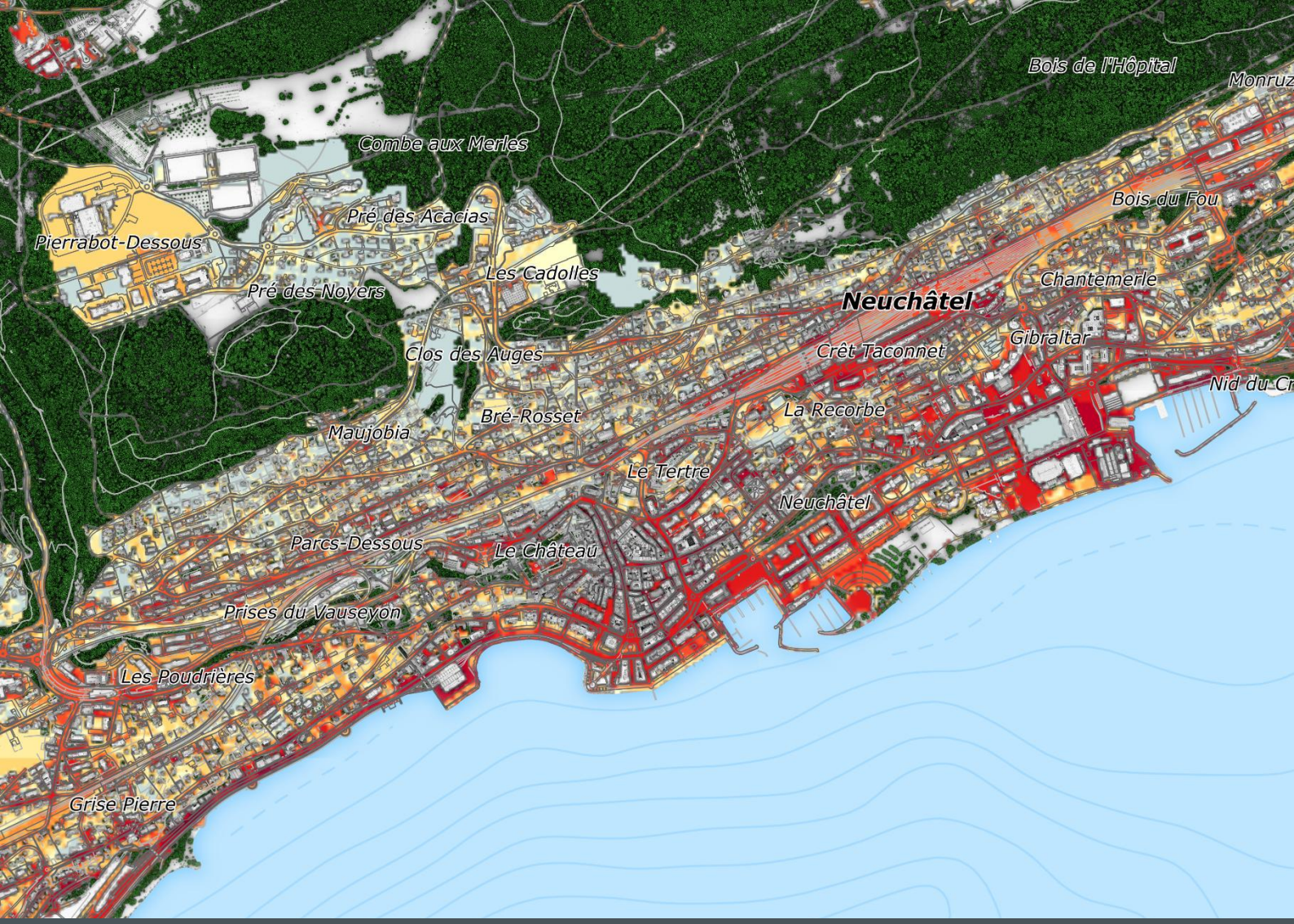


ANALYSE CLIMATIQUE DU CANTON DE NEUCHÂTEL

Étude réalisée par :
GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Pour :
État de Neuchâtel
Système d'information du territoire neuchâtelois
Service de la géomatique et du registre foncier
Département du développement territorial
et de l'environnement

ne.ch
RÉPUBLIQUE ET CANTON DE NEUCHÂTEL

Mai 2025 (v2)

Mandat :	Analyse climatique du canton de Neuchâtel
Lieu :	Canton de Neuchâtel, Suisse
Mandant :	République et canton de Neuchâtel Département du développement territorial et de l'environnement Service de la géomatique et du registre foncier (SGRF) Système d'information du territoire neuchâtelois (SITN) Rue de Tivoli 22 2000 Neuchâtel
Date :	23.09.2024
Élaboré par :	Lars Gerling (GEO-NET)
Évalué par :	Peter Trute (GEO-NET)
Adapté par :	Léna Faivre (SGRF)
Validé par :	Marc Riedo (SGRF)

Ce rapport a été élaboré, dans sa première version, par Lars Gerling (GEO-NET). Le SGRF l'a ensuite adapté afin de le rendre plus accessible aux non spécialistes. Le rapport a ainsi été restructuré, vulgarisé par l'ajout d'illustrations pour expliquer certains principes théoriques, et replacé dans le contexte local du canton de Neuchâtel.

Les éléments théoriques et la méthode sont sous la responsabilité de GEO-NET.

Pilotage du projet au SGRF par Marc Riedo, responsable du SITN et Léna Faivre, géomètre cantonale adjointe.

Mise à jour MAI 2025 : le rapport a été complété avec les chapitres 3.3.4 et 4.3 (évaluation bioclimatique), qui ont été élaborés selon les mêmes conditions que celles décrites ci-dessus, ainsi qu'avec le chapitre 5 (nuits et journées tropicales, jours caniculaires), qui a été élaboré par le SGRF seul.

Résumé

Le plan climat neuchâtelois, qui vise à atteindre la neutralité carbone d'ici 2040, propose des mesures pour réduire les gaz à effet de serre, soutenir la transition énergétique et s'adapter aux changements climatiques. Dans ce cadre, la mesure A1 vise à localiser et lutter contre les îlots de chaleur. Les températures moyennes dans le canton de Neuchâtel vont augmenter au cours du siècle : le scénario représentant la trajectoire actuelle des émissions globales de gaz à effet de serre (RCP8.5[1]) prédit une hausse des températures estivales d'environ +1.4 °C d'ici 2035, +2.5 °C d'ici le milieu du siècle et +4.2 °C d'ici la fin du siècle. Le canton de Neuchâtel, par son service de la géomatique et du registre foncier, a ainsi mandaté une analyse climatique cantonale, réalisée par la société GEO-NET, pour évaluer les conditions climatiques estivales futures.

L'étude a été réalisée sur l'ensemble du canton à l'aide du logiciel de modélisation FITNAH-3D, avec une résolution de 10 mètres pour le scénario RCP8.5 et sans intégrer de mesures d'atténuation. La simulation a permis d'estimer les conditions climatiques typiques d'un jour estival autochtone (conditions météorologiques avec peu de nuages et peu de vent) au moment de rayonnement solaire maximal (à 14h) et au moment de rafraîchissement nocturne maximal (à 4h). La modélisation a été effectuée pour la période de référence (1981-2010) ainsi que les périodes futures (2020-2049, 2045-2074, 2070-2099). Les résultats obtenus sont les températures et leur évolution : température physiologique équivalente (PET), température diurne, température nocturne, effet d'îlot de chaleur, et également les courants nocturnes d'air froid. Ces données ont permis d'identifier les espaces urbanisés où le stress thermique est - et sera - le plus élevé, ainsi que celles concernées par des nuits tropicales. Une évaluation bioclimatique des espaces bâtis, des espaces de transport et des espaces verts complète ces résultats. Elle permet d'identifier les secteurs les plus touchés par les fortes chaleurs ainsi que les espaces verts jouant un grand rôle d'atténuation des températures. En complément, le nombre annuel moyen de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3 ont été calculés.

Les résultats de l'analyse montrent, pour la situation diurne, que les conditions d'un stress thermique élevé se produisent dans les secteurs bâtis imperméables et non ombragés, et que les zones touchées sont de plus en plus nombreuses au fil du temps. Les lieux les plus confortables sont ceux situés à l'ombre des arbres, à haute altitude ou aux abords directs du lac. Pour la situation nocturne, la zone urbanisée montre des températures systématiquement supérieures aux espaces verts alentour dues à l'effet d'îlot de chaleur, qui atteint régulièrement +5 °C en raison de la densité des constructions et d'un important degré d'imperméabilisation des sols. La topographie du canton induit de nombreuses brises de pente dont bénéficient la majorité des communes. Cela n'empêche toutefois pas l'augmentation, au fil du temps, de la part des espaces concernés par des nuits tropicales, qui passe de 5 % au début du siècle à 36 % à la fin du siècle.

Pour faire suite à cette première phase, le canton, par son service cantonal de l'aménagement du territoire, a publié en mai 2025 un guide de sensibilisation, avec des propositions d'actions pragmatiques et diversifiées d'adaptation au réchauffement climatique pour le Canton de Neuchâtel, à l'attention des communes et des planificateurs.

[1] Les RCP (*Representative Concentration Pathways*) sont des scénarios d'émission de gaz à effet de serre permettant de simuler la future évolution des températures.

Table des matières

RÉSUMÉ **3**

TABLE DES MATIÈRES **4**

GLOSSAIRE **8**

1 INTRODUCTION **11**

1.1 Contexte **11**

1.2 Objectifs **12**

1.3 Consultation des données **12**

2 BASES TECHNIQUES **13**

2.1 Le climat et son évolution **13**

2.1.1 Définition du climat 13

2.1.2 Périodes climatiques 13

2.1.3 Climat dans le canton de Neuchâtel 13

2.1.4 Évolution du climat en Suisse de 1864 à nos jours 14

2.1.5 Scénarios climatiques futurs 15

2.2 Conditions météorologiques autochtones **16**

2.3 Phénomènes climatiques locaux **17**

2.3.1 Effet d'îlot de chaleur 17

2.3.2 Courants nocturnes d'air froid 20

2.3.2.1 Brises thermiques 20

2.3.2.1.1 Brises urbaines 20

2.3.2.1.2 Brises de lac, de mer et de terre 21

2.3.2.2 Brises de pente 21

2.3.2.3 Synthèse des courants d'air nocturnes 22

2.3.3 Écoulement d'air froid 22

2.3.3.1 Couloirs d'air froid 22

2.3.3.2 Zones d'écoulement d'air froid 23

2.3.3.3 Densité du débit d'air froid 23

2.3.3.4 Pénétration de l'air en ville 23

2.4 Conditions thermiques estivales **24**

2.4.1 Stress thermique pendant la journée 24

2.4.2 Confort de sommeil pendant la nuit 26

3 DONNÉES ET MÉTHODE **27**

3.1 Données d'entrée **27**

3.1.1 Zone d'étude 27

3.1.2 Résolution 27

3.1.3 Données géographiques 29

3.1.3.1 Synthèse des données géographiques fournies par le SGRF 29

3.1.3.2 Synthèse des données géographiques entrant dans le modèle 30
3.1.3.3 Occupation des sols 31
3.1.3.4 Hauteur des structures 33
3.1.3.4.1 Arbres 33
3.1.3.4.2 Bâtiments 33
3.1.3.4.3 Murs antibruit 33
3.1.4 Température de l'eau 34
3.1.5 Couche d'utilisation du sol 35
3.1.6 Limites des données 37

3.2 Modèle de simulation (FITNAH-3D) 38
3.2.1 Contexte 38
3.2.2 Fonctionnement de FITNAH-3D 38
3.2.3 Hypothèses 38
3.2.4 Température de départ 39
3.2.5 Vents synoptiques 40
3.2.6 Validation du modèle 40
3.2.7 Limites du modèle 42

3.3 Produits 43
3.3.1 Variables issues de FITNAH-3D 43
3.3.2 Variables calculées 43
3.3.2.1 Température physiologique équivalente 43
3.3.2.2 Effet d'îlot de chaleur 43
3.3.2.3 Densité du débit d'air froid 44
3.3.2.4 Taux de production d'air froid 44
3.3.3 Échanges d'air froid nocturnes 44
3.3.3.1.1 Zones de production d'air froid 44
3.3.3.1.2 Trajectoires d'air froid 44
3.3.3.1.3 Zones d'impact d'air froid 44
3.3.4 Cartes d'évaluation bioclimatique 45
3.3.4.1 Notions préalables 45
3.3.4.2 Objectif 45
3.3.4.3 évaluation 45
3.3.4.4 Normalisation des paramÈtres 48
3.3.4.5 Situation bioclimatique relative : échelle d'évaluation 50
3.3.4.6 Importance bioclimatique : échelle d'évaluation 50
3.3.4.7 Importance bioclimatique diurne 50
3.3.4.8 Importance bioclimatique nocturne 52

4 RÉSULTATS 54

4.1 Situation diurne 54
4.1.1 Température physiologique équivalente 54
4.1.1.1 État des lieux à P0 54
4.1.1.2 Évolution de P0 à P3 57
4.1.1.3 Effets du développement urbain 61
4.1.2 Synthèse et analyse de la situation diurne 61

4.2 Situation nocturne 62
4.2.1 Température 62
4.2.1.1 État des lieux à P0 62
4.2.1.2 Évolution de P0 à P3 65
4.2.1.4 Effets du développement urbain 67

4.2.2 Effet d'îlot de chaleur 68
4.2.3 Courants d'air froid 71
4.2.3.1 État des lieux à P0 71
4.2.3.1.1 Vitesse du vent et densitÉ du dÉbit d'air froid 71
4.2.3.1.2 Zones de production d'air froid 74
4.2.3.1.3 Trajectoires d'écoulement d'air froid 74
4.2.3.1.4 Zones d'impact d'air froid 74
4.2.3.2 Évolution de P0 à P3 75
4.2.3.3 Effets du développement urbain 76
4.2.4 Synthèse et analyse de la situation nocturne 76

4.3 Cartes d'évaluation bioclimatique 77
4.3.1 Évaluation des espaces d'action 77
4.3.1.1 Situation diurne 78
4.3.1.1.1 État des lieux à P0 78
4.3.1.1.2 Évolution de P0 à P1 80
4.3.1.2 Situation nocturne 81
4.3.1.2.1 État des lieux à P0 81
4.3.1.2.2 Évolution de P0 à P1 83
4.3.2 Évaluation des espaces de compensation 84
4.3.2.1 Situation diurne 84
4.3.2.1.1 État des lieux à P0 84
4.3.2.1.2 Évolution de P0 à P1 85
4.3.2.2 Situation nocturne 87
4.3.2.2.1 État des lieux à P0 87
4.3.2.2.2 Évolution de P0 à P1 88
4.3.3 Synthèse des cartes d'évaluation bioclimatique 90

5 NUITS ET JOURNÉES TROPICALES, JOURS CANICULAIRES 91

5.1 Données 91
5.1.1 Mesures météorologiques des stations de l'Université de Neuchâtel 91
5.1.2 Mesures météorologiques des stations MétéoSuisse 92
5.1.3 Données climatiques CH2018 92
5.1.3.1 Sélection de la simulation CH2018 92
5.1.4 Températures issues de la modélisation FITNAH 94

5.2 Méthode 94
5.2.1 Préambule 94
5.2.2 Calcul de la température moyenne estivale 94
5.2.3 Calcul des nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3 96
5.2.4 Limites et incertitudes 100

5.3 Résultats 100
5.3.1 Nuits tropicales 100
5.3.1.1 Situation à P1 100
5.3.1.2 Évolution de P0 à P3 103
5.3.2 Journées tropicales 105
5.3.2.1 Situation à P1 105
5.3.2.2 Évolution de P0 à P3 107
5.3.3 Jours caniculaires de degré 3 109
5.3.3.1 Situation à P1 109
5.3.3.2 Évolution de P0 à P3 111
5.3.4 Synthèse 113

CONCLUSION **114**

LISTE DES ACRONYMES **115**

LISTE DES FIGURES **116**

LISTE DES TABLEAUX **119**

LISTE DES ANNEXES **120**

BIBLIOGRAPHIE **121**

ANNEXE 1 ..... **123**

ANNEXE 2 ..... **125**

ANNEXE 3 ..... **132**

Glossaire

Note : tout au long du rapport, les termes soulignés dans le texte renvoient à une définition du glossaire. Chaque terme est souligné lors de sa première apparition dans un chapitre de niveau 2 (1.1, 1.2, etc.).

Air froid : masse d'air dont la température est inférieure à celle de son environnement et qui résulte du processus de refroidissement nocturne de l'atmosphère près du sol.

Albédo : pouvoir réfléchissant d'une surface ou, plus précisément, degré de réflectance des rayonnements à ondes courtes. Plus l'albédo est faible, moins la surface réfléchit la lumière, et donc plus elle accumule de la chaleur. L'albédo dépend de la nature de la surface irradiée (par exemple, le béton a un faible albédo et l'eau un fort albédo) et de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Anthropique : qui découle de l'existence ou de la présence d'êtres humains.

Autochtone : voir conditions météorologiques autochtones.

Bioclimat : ensemble des influences directes et indirectes des conditions météorologiques et du climat sur les organismes vivants, en particulier sur les humains (bioclimat humain).

Brise thermique : courant d'air horizontal, généralement de faible intensité, induit par la différence de température et de pression entre deux lieux. Lorsqu'il se réchauffe, l'air perd en densité et s'élève. Cela crée un phénomène de basse pression qui aspire l'air environnant, plus frais. Un courant d'air frais arrive alors dans la zone plus chaude. Les brises thermiques nocturnes incluent les brises liées à l'effet d'îlot de chaleur, les brises de terre et les brises de parc.

Brise de mer, brise de lac : courants d'air horizontaux induits par la différence de température et de pression entre l'air situé au-dessus de l'eau et l'air situé au-dessus des terres. La brise de mer et la brise de lac soufflent la journée, de l'eau vers les terres tandis que la brise de terre souffle la nuit.

Brise de parc : courant d'air horizontal, généralement de très faible intensité, induit par la différence de température et de pression entre un espace vert situé en ville et les constructions environnantes.

Brise de pente : courants d'air provoqués par la différence d'altitude entre deux lieux, et d'autant plus puissants que la différence d'altitude et la pente sont importantes.

Brise de terre : courant d'air horizontal induit par la différence de température et de pression entre l'air situé au-dessus de l'eau et l'air situé au-dessus des terres. La brise de terre souffle la nuit, de la terre vers l'eau, tandis que la brise de mer (ou brise de lac) souffle la journée.

Canicule de degré 3 : épisode de chaleur caractérisé par une température moyenne journalière atteignant ou dépassant 25 °C, et ce durant au moins 3 jours consécutifs (source : MétéoSuisse).

Capacité thermique : quantité de chaleur qu'il faut transférer à un corps pour augmenter sa température de 1 °C. Plus la capacité thermique d'un corps est grande, plus il faut d'énergie pour le réchauffer, plus il est capable de stocker cette énergie (sous forme de chaleur), plus il met du temps à refroidir et plus il émet de l'énergie (sous forme de chaleur) en se refroidissant. Par exemple, l'eau a une grande capacité thermique alors que la végétation en a peu.

Charge thermique : quantité de chaleur reçue. Dans le contexte climatique, cette chaleur peut provenir du rayonnement solaire direct, mais également du rayonnement réfléchi ou de sources de chaleur directes comme les modules extérieurs de climatisation.

Conditions météorologiques autochtones : conditions dans lesquelles le ciel est sans nuages et où les vents synoptiques, comme la bise ou le foehn, ne sont que très faiblement présents. Cela laisse la place aux phénomènes climatiques locaux, qui sont alors prépondérants. Le terme « autochtone » peut être compris comme « peu de nuages et peu de vent » (voir partie *2.2*).

Convection : ensemble des mouvements internes, verticaux ou horizontaux, qui animent un fluide. Dans le contexte climatique, l'air au-dessus du sol se réchauffe par convection sous l'effet du rayonnement solaire.

Couloirs d'air froid : trajectoire empruntée par un courant d'air froid, caractérisée par une forme allongée et relativement étroite, permettant de transporter l'air froid des zones de production d'air froid vers les zones urbanisées.

Débit d'air froid : voir densité du débit d'air froid.

Densité du débit d'air froid : volume d'air froid qui s'écoule, chaque à seconde, à travers une colonne d'air froid de la section d'écoulement. La largeur de la colonne d'air froid correspond à la résolution du modèle (ici, 10 m). Le résultat s'exprime en $m^3/(m \cdot s)$ (voir partie *2.3.3.3*). Les termes « densité du débit d'air froid » et « débit d'air froid » sont utilisés indistinctement.

Désimperméabilisation : processus consistant à retirer les surfaces imperméables et à les remplacer par une surface perméable, notamment des espaces végétalisés en pleine terre.

Effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) : phénomène de surchauffe des villes par rapport à la campagne environnante. Cette surchauffe est due à l'influence anthropique : faible albédo des matériaux utilisés en ville, fort degré d'imperméabilisation, piégeage radiatif ou encore émissions directes de chaleur. La structure urbaine (dimensions et positionnement des bâtiments et autres obstacles aux courants d'air) exerce une grande influence sur la température en ville.

Effet de serre : dans le contexte climatique, il s'agit de l'effet induit par les gaz présents dans l'atmosphère, qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre et le réémettent, notamment vers le bas, ce qui s'ajoute au rayonnement solaire direct. La température au sol est ainsi supérieure à ce qu'elle serait en l'absence d'atmosphère, et elle augmente au fur et à mesure qu'augmente la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre, tels que le CO_2. Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) utilise le terme de forçage radiatif pour décrire l'influence des gaz à effet de serre sur le bilan thermique de la Terre.

Espace bâti : espace dans lequel sont construits des bâtiments. En zone urbanisée, la délimitation des espaces bâtis est majoritairement celle des zones d'affectation dédiées à l'habitat et aux activités économiques. Les espaces bâtis font partie des espaces d'action.

Espace d'action : espace où les humains vivent et ont la majorité de leurs activités. Les espaces d'action regroupent les espaces bâtis et les espaces de transport. Ils présentent en général une charge thermique élevée.

Espace de compensation : espace potentiellement capable de compenser la surchauffe des espaces d'action en offrant des lieux de refuge pour la population (durant la journée) ou en favorisant l'apport d'air froid dans les espaces d'action (durant la nuit). Les espaces de compensation sont les espaces verts et les espaces ouverts, ainsi que le réseau qu'ils constituent.

Espace de transport : espace dédié au transport (hors voies de chemin de fer) composé des routes et trottoirs, des places, ainsi que des sentiers et chemins lorsque l'information est disponible. Les espaces de transport font partie des espaces d'action.

Espace ouvert : espace de faible rugosité qui peut être un espace vert, comme les surfaces agricoles (champs cultivés, pâturages) ou non, comme les zones sans végétation ou la roche nue, etc.

Espace vert : dans ce rapport, il s'agit des zones ayant un faible degré d'imperméabilisation (< 25%), indépendamment de leur utilisation. Cela englobe donc les forêts et les espaces agricoles, mais également les parcs, les jardins, les cimetières ou certaines installations sportives.

Importance bioclimatique : indique l'importance des espaces de compensation en tant qu'espaces capables de compenser la charge thermique des espaces d'action, sur une échelle absolue (de « très grande » à « nulle »).

Jour d'été : jour au cours duquel la température dépasse 25 °C.

Jour d'hiver : jour au cours duquel la température ne dépasse pas 0 °C.

Jour de gel : jour au cours duquel la température descend en dessous de 0 °C.

Journée tropicale : journée au cours de laquelle la température atteint ou dépasse 30 °C.

Nuit tropicale : nuit au cours de laquelle la température ne descend pas en dessous de 20 °C.

Occupation du sol : couche géographique utilisée comme donnée d'entrée de la modélisation, répartissant le territoire cantonal dans 11 classes d'occupation permettant de décrire la surface du sol ainsi que sa perméabilité. Les 11 classes d'occupation sont : bâtiment, surface imperméable, surface semi-imperméable, voies ferrées, champ/gazon, arbre sur sol naturel, arbre sur surface semi-imperméable, arbre sur surface imperméable, eaux de surface, roche nue, éboulis/sable.

PET : température physiologique équivalente (*Physiological Equivalent Temperature*). Il s'agit d'un indice permettant d'évaluer la température ressentie par l'organisme, calculé sur la base de plusieurs facteurs tels que la température de l'air, l'humidité de l'air, les interactions de l'organisme avec son environnement (bilan thermique humain), le métabolisme humain, les vêtements. Cet indice permet de caractériser le stress thermique subi par l'organisme durant la journée.

Piégeage radiatif : phénomène lors duquel le rayonnement solaire, au lieu d'être réfléchi en direction du ciel, est réfléchi plusieurs fois sur le sol ainsi que sur les façades des bâtiments, étant ainsi progressivement absorbé par les surfaces de faible albédo. Ce phénomène est amplifié dans les rues canyons (rues étroites bordées de hauts bâtiments). Le piégeage radiatif renforce l'accumulation de chaleur dans les matériaux.

Rayonnement à ondes courtes : rayonnement thermique dans le spectre optique, comprenant le spectre visible, proche ultra-violet et proche infrarouge, qui se caractérise par sa puissance de chauffe particulièrement importante.

Rayonnement à ondes longues : rayonnement électromagnétique de basse énergie émis de la Terre vers l'espace dans le domaine infrarouge.

Rugosité : caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide, qui indique comment celui-ci interagit avec un fluide en écoulement. Appliquée à la climatologie urbaine, la rugosité désigne la quantité et la hauteur des obstacles à l'écoulement d'air proche du sol (bâtiments, talus, arbres, etc.). Ainsi, un champ a une rugosité très faible et une ville avec de hauts bâtiments a une rugosité très élevée.

Secteurs de développement urbain : zones à bâtir (à l'horizon 2040) encore libres de construction.

Situation bioclimatique relative : caractérise le bioclimat local d'un espace d'action par rapport à la moyenne cantonale des espaces d'action, sur une échelle relative (de « largement meilleure que la moyenne » à « largement moins bonne que la moyenne »).

Stress thermique : situation dans laquelle l'organisme ne parvient plus à réguler sa température, en raison de la chaleur ou du froid. Plusieurs seuils de stress thermique de chaleur sont définis, d'un stress faible au-delà de 23 °C ressentis, à un stress extrême au-delà de 41 °C ressentis.

Taux de production d'air froid : quantité d'air froid, en m^3, qui est générée sur une surface de 1 m^2 en 1 h.

Température physiologique équivalente : voir PET.

Trajectoire d'air froid : dans cette étude, il s'agit des couloirs d'air froid, des zones d'écoulement d'air froid et des brises de parc.

Utilisation du sol : couche géographique utilisée comme base pour les cartes d'évaluation bioclimatique, répartissant le territoire cantonal dans 8 catégories d'utilisation du sol et le subdivisant de telle manière que le climat soit supposé homogène au sein de chaque portion de territoire définie. Les 8 catégories sont : Habitat, Autre activité humaine, Surface sans végétation, Transport (hors rail), Rail, Eau, Forêt, Surface verte.

Vent synoptique : vent à large échelle dépassant les limites du canton et déplaçant des masses d'air sur de longues distances, comme le foehn ou la bise.

Zone d'écoulement d'air froid : zone où l'air froid circule avec une vitesse ou un débit particulièrement important.

Zone de production d'air froid : espace vert ou ouvert dont le taux de production d'air froid est particulièrement important.

Zone d'impact d'air froid : partie de la zone urbanisée où la densité du débit d'air froid est particulièrement importante. Ces zones sont considérées comme bien ventilées.

Zone urbaine (ou urbanisée) : zones bâties ou aménagées (zones résidentielles, industrielles, commerciales et mixtes), ainsi que les constructions hors zone à bâtir.

1 Introduction

1.1 CONTEXTE

Le plan climat neuchâtelois, approuvé par le Grand Conseil le 24 janvier 2023, a pour objectif général d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2040 par une réduction massive de la dépendance du canton aux énergies fossiles. Le plan climat cantonal 2022-2027 présente une première série de mesures pour soutenir la dynamique de transformation, comprenant 27 mesures de réduction des gaz à effet de serre, 20 mesures d'adaptation aux changements climatiques et 9 mesures d'accompagnement des changements. Parmi les mesures d'adaptation aux changements climatiques figure la mesure A1 intitulée « Localiser et lutter contre les îlots de chaleur » (*Figure 1*). Pour réaliser la première étape de cette mesure (localisation des îlots de chaleur), le canton de Neuchâtel a réalisé une analyse climatique cantonale, la première de cette envergure.

Adaptation aux changements climatiques — **Mesure A1**

Localiser et lutter contre les îlots de chaleur

DIAGNOSTIC

Défi climatique
1. Accentuation des fortes chaleurs

Champs d'action
DT1 Qualité de vie dans les villes et les agglomérations

STRATÉGIE

Objectif stratégique
3. Population

Objectif opérationnel
13. Réduire les effets des vagues de chaleur sur la santé

Enjeux

Avec les changements climatiques, les épisodes caniculaires deviennent plus fréquents. Dans un même temps, la part de la population âgée de plus de 65 ans et donc, les risques sanitaires liés à la chaleur s'accroissent. Il y a donc un enjeu à réduire les concentrations de chaleur en milieu urbain lors d'épisodes caniculaires afin de maintenir à plus long terme un confort thermique et une qualité de vie agréable dans nos villes et agglomérations.

Description de la mesure

1. Identification des îlots de chaleur dans le cadre d'une analyse climatique du territoire cantonal ;
2. Identification des mesures pouvant concrètement être prises par les communes dans le respect de la proportionnalité des règles de droit, par exemple : créer des espaces verts (végétaliser, planter des arbres), augmenter la part d'espaces ombragés et non-imperméabilisés (par exemple en créant des bandes herbeuses), mettre en place des plans d'eau ou des jeux d'eau ou encore intégrer la circulation de l'air (orientation du bâti) comme principe de planification ;
3. Inviter les communes concernées à prévoir les mesures nécessaires dans les planifications directrices et d'affectation, notamment lors de révision des plans d'aménagement locaux (PAL).

Effets induits par la mesure

- Maintien, voire amélioration de la qualité de vie en milieu urbain.

Figure 1 – Extrait de la mesure A1 du plan climat neuchâtelois 2024-2027

1.2 OBJECTIFS

À cause du dérèglement climatique, les températures moyennes du canton de Neuchâtel vont augmenter au cours de ce siècle. En conséquence, le stress thermique subi par les êtres humains en été va s'accentuer, en particulier dans les zones urbanisées. L'objectif de cette analyse climatique est d'évaluer les conditions climatiques du canton de Neuchâtel dans lesquelles les habitantes et habitants vivront en période estivale, et ce jusqu'à la fin du siècle. Cela inclut la cartographie des îlots de chaleur, mais également la modélisation d'autres paramètres tels que la température ressentie durant la journée ou la température nocturne.

Cette analyse vise également, plus largement, à créer un jeu de données climatiques cantonales de référence. Ces données serviront d'aide à la décision pour les politiques publiques à incidence spatiale telles que le développement territorial, la gestion des écosystèmes, l'agriculture, la sylviculture ou la santé, qui devront être menées compte tenu de l'évolution climatique. Les résultats de l'étude constitueront aussi un important support de dialogue et de réflexion pour les porteurs de projets.

Des études similaires, basées sur le même modèle (FITNAH-3D), ont été menées ou sont en cours dans plus d'une dizaine de cantons, soit la majorité des cantons du plateau suisse entre Genève (étude 2021) et Zürich (étude 2019). L'étude neuchâteloise contribue donc à l'homogénéité des analyses suisses et aux échanges entre cantons sur les mesures de lutte contre les effets du changement climatique.

1.3 CONSULTATION DES DONNÉES

Toutes les données et tous les documents relatifs à cette analyse climatique sont disponibles en ligne, aux liens suivants.

- Page d'accueil de l'analyse climatique : https://www.ne.ch/sitn/climat

  Elle contient l'ensemble des liens vers les données ainsi que le présent rapport et la synthèse illustrée, un document qui reprend les principaux éléments techniques et présente les données produites.
- Géoportail internet du SITN, thème « Climat » https://sitn.ne.ch/theme/climat
- Cartes interactives simplifiées pour les résultats principaux
  - Température physiologique équivalente à 14h : https://sitn.ne.ch/climat/pet
  - Température à 14h : https://sitn.ne.ch/climat/temp14h
  - Température à 4h : https://sitn.ne.ch/climat/temp4h
  - Effet d'îlot de chaleur à 4h : https://sitn.ne.ch/climat/icu
  - Nombre annuel moyen de nuits tropicales : https://sitn.ne.ch/climat/nuitstropicales
  - Nombre annuel moyen de journées tropicales : https://sitn.ne.ch/climat/journeestropicales
  - Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 : https://sitn.ne.ch/climat/jourscaniculaires

2 Bases techniques

2.1 LE CLIMAT ET SON ÉVOLUTION

2.1.1 Définition du climat

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat est défini par les conditions météorologiques moyennes (valeurs moyennes de température, d'ensoleillement, de précipitations, etc.) d'un lieu donné et sur une période donnée, cette période allant de quelques mois à plusieurs millions d'années. L'OMM utilise des périodes de 30 ans pour déterminer le climat moyen d'un lieu.

2.1.2 Périodes climatiques

Une période climatique de référence est toujours définie pour observer l'évolution du climat et dresser des comparaisons. Si l'OMM a ainsi choisi la période 1961-1990 comme référence pour l'observation de l'évolution à long terme du climat, elle recommande également l'utilisation de périodes climatiques plus récentes et actualisées tous les 10 ans pour décrire le climat actuel.

Dans cette étude, la période 1981-2010 est utilisée comme période de référence[2]. Elle est nommée indistinctement « période de référence », « période actuelle » ou « P0 ».

Pour simuler le climat futur, trois périodes sont considérées, conformément aux scénarios climatiques CH2018[3] :

- la période 2020-2049, appelée indistinctement « avenir proche », « 2035 » ou « P1 » ;
- la période 2045-2074, appelée indistinctement « milieu du siècle », « 2060 » ou « P2 » ;
- la période 2070-2099, appelée indistinctement « fin du siècle », « 2085 » ou « P3 ».

2.1.3 Climat dans le canton de Neuchâtel

Le canton de Neuchâtel se trouve dans deux régions dont les moyennes climatiques sont différentes. On considère d'une part les communes situées au bord des lacs, à environ 450-500 m d'altitude, et, d'autre part, le reste du canton, situé à plus haute altitude. Les moyennes climatiques des stations de mesure de Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds pour la période 1991-2020 illustrent bien ces différences (*Tableau 1, Figure 2*).

	Neuchâtel	**La Chaux-de-Fonds**
Altitude	485 m	1017 m
Température moyenne sur la période	10.7 °C	7.0 °C
Cumul annuel moyen de précipitations	956 mm	1389 mm
Nombre annuel moyen de jours d'été	49	16
Nombre annuel moyen de journées tropicales	10	1

Tableau 1 – Moyennes climatiques des stations de mesure de Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds pour la période 1991-2020 (source MétéoSuisse)

[2] À noter que depuis le 1er janvier 2022 la période de référence officiellement utilisée par MétéoSuisse est 1991-2020.

[3] Les scénarios climatiques CH2018 sont des données élaborées par MétéoSuisse pour la recherche climatique.

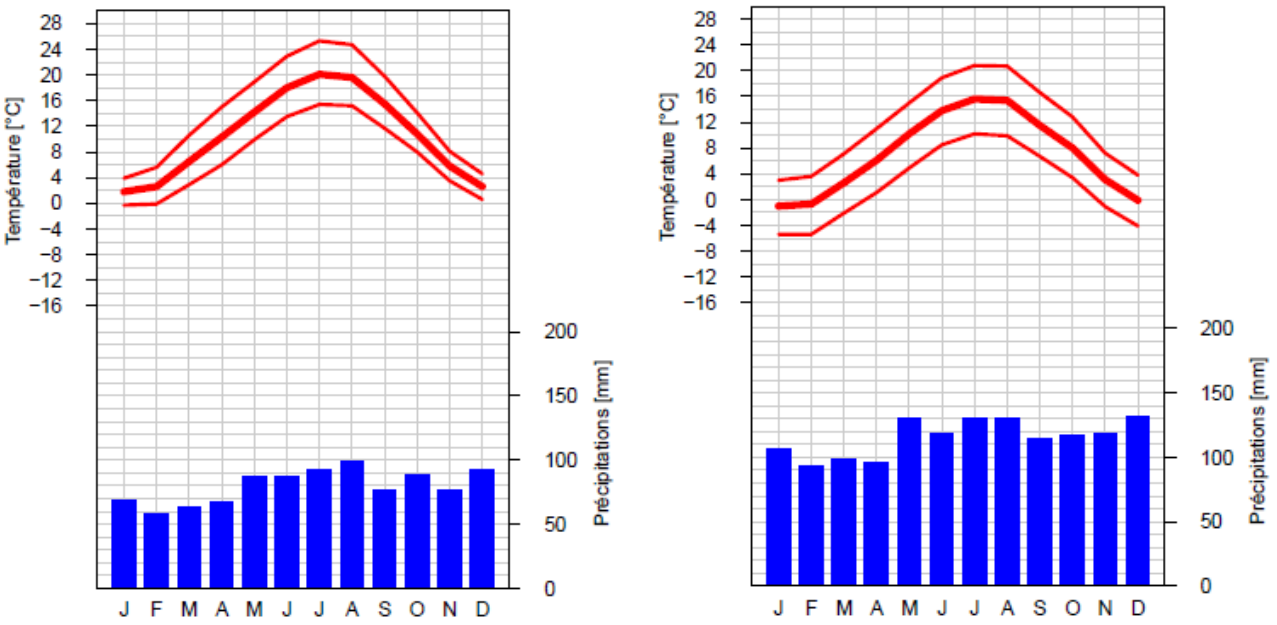


Figure 2 – Températures et précipitations sur la période 1991-2020 des stations MétéoSuisse de Neuchâtel (à gauche) et La Chaux-de-Fonds (à droite)

2.1.4 Évolution du climat en Suisse de 1864 à nos jours

Au cours des dernières décennies, le climat a changé de manière significative et observable en raison du changement climatique. En Suisse, l'augmentation de la température moyenne de 1864 à aujourd'hui est d'environ 2 °C. En comparaison, l'augmentation de la température moyenne mondiale au cours de la même période est de 0,8 °C. L'évolution récente des températures estivales (moyenne des mois de juin, juillet et août) depuis 1864 par rapport à la période 1961-1990 (*Figure 3*) montre une tendance positive significative (régression linéaire en noir). Depuis les années 1980, les températures estivales moyennes ont remarquablement augmenté et sont restées à un niveau élevé. À partir de 2015, presque toutes les années montrent un écart dépassant les +3 °C par rapport à la période 1961-1990. L'année 2003 est celle qui présente l'écart positif le plus important, avec une augmentation de presque 5 °C.

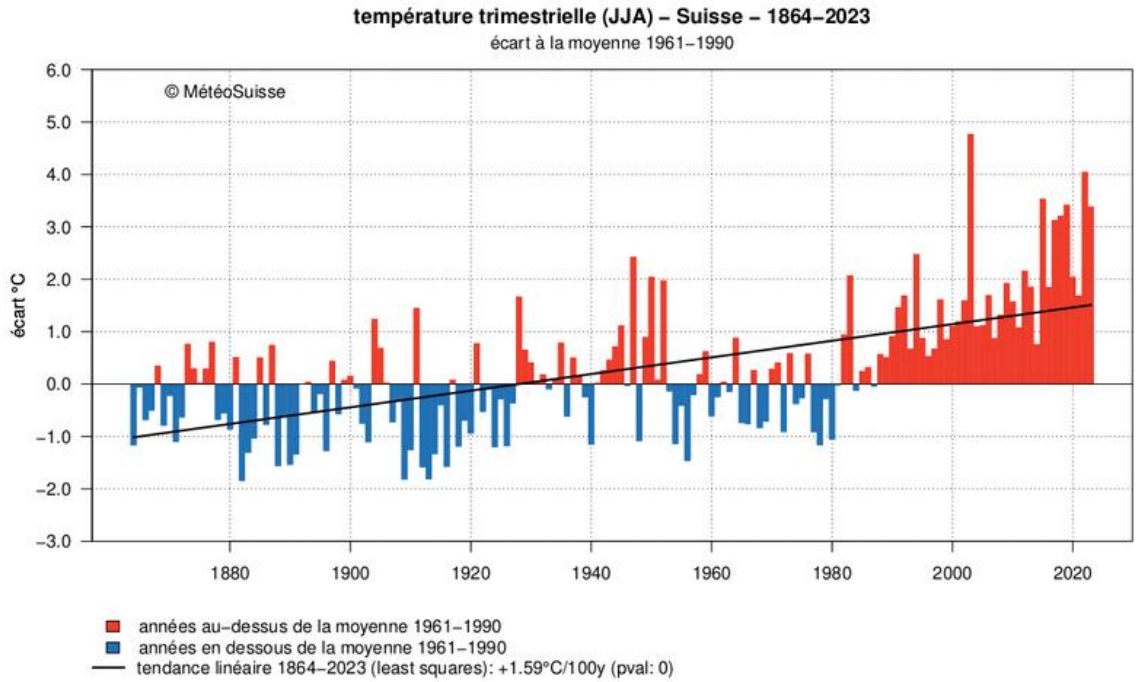


Figure 3 – Évolution des températures estivales (moyenne des mois de juin, juillet et août, JJA) de la Suisse de 1864 à nos jours par rapport à la période 1961-1990 (lien vers la page MétéoSuisse)

2.1.5 Scénarios climatiques futurs

L'augmentation des températures moyennes mondiales est largement imputable aux émissions anthropiques de dioxyde de carbone (CO_2), car celles-ci renforcent l'effet de serre. Comme les émissions futures de CO_2 sont incertaines, plusieurs scénarios de leur évolution jusqu'en 2100 ont été établis par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), de la situation la plus optimiste du point de vue climatique à la plus pessimiste. Chaque scénario considère une activité anthropique différente (et donc des émissions de CO_2 différentes) et génère ainsi un certain forçage radiatif. Le forçage radiatif désigne la contribution au bilan énergétique global (somme des énergies entrantes et sortantes) de l'atmosphère. Le forçage radiatif des différents scénarios climatiques correspond à une augmentation de l'énergie reçue par l'atmosphère, se traduisant par une augmentation plus ou moins marquée des températures. Le GIEC a établi le forçage radiatif mondial des 4 scénarios climatiques RCP2.6[4] (le plus optimiste), RCP4.5, RCP6 et RCP8.5 (le plus pessimiste) (*Figure 4*).

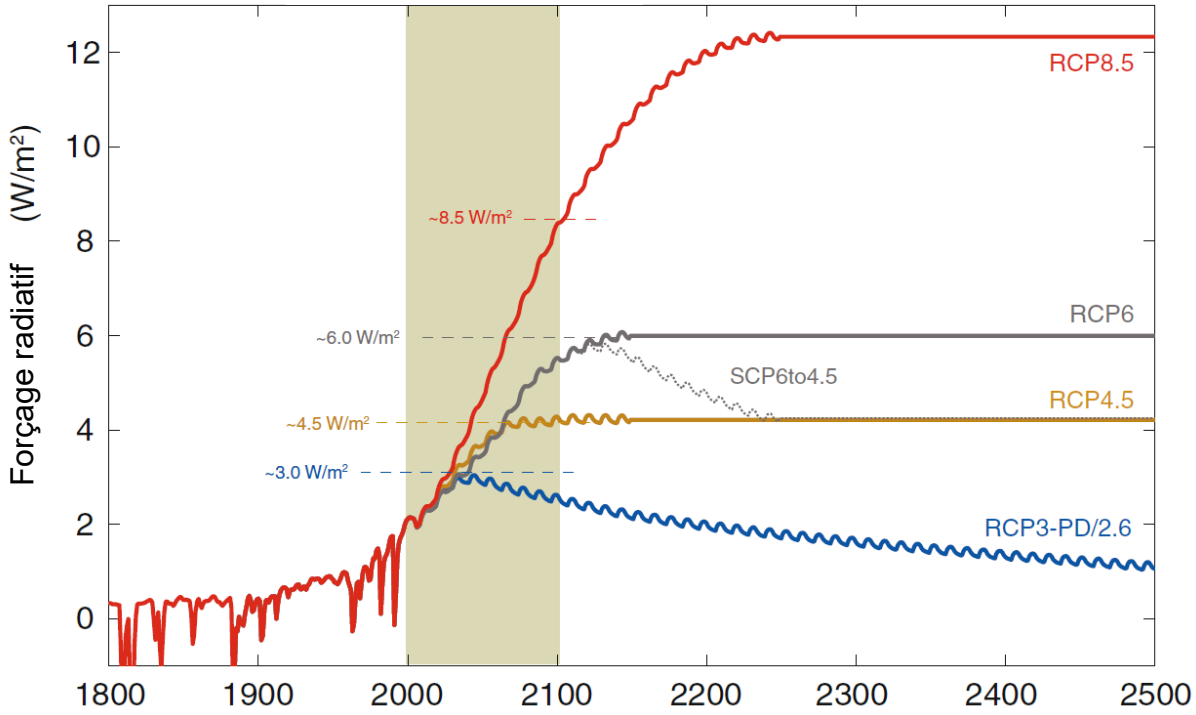
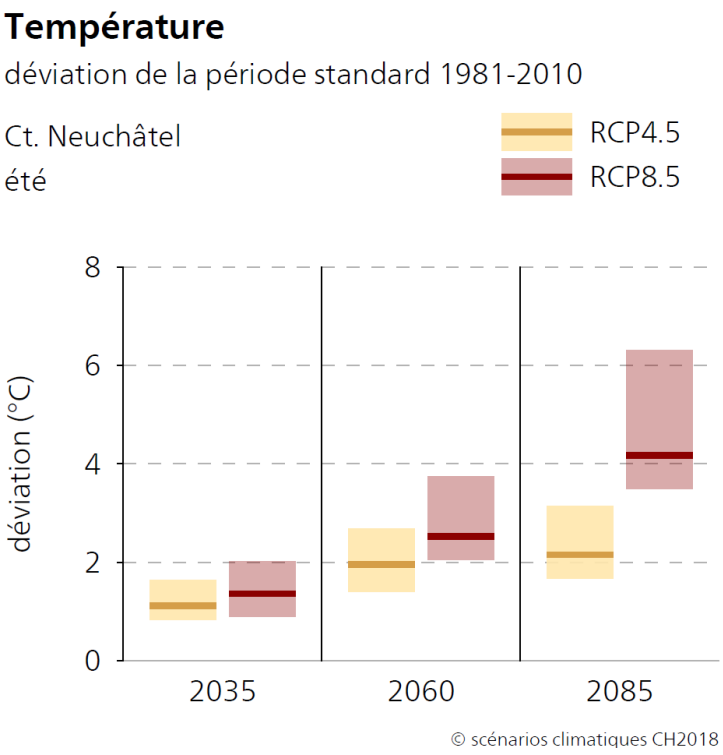


Figure 4 – Forçage radiatif des scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 (Meinshausen et al. 2011, adapté par GEO-NET)

À l'échelle suisse, les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 sont principalement étudiés. Grâce à une collaboration entre le National Center for Climate Services (NCCS) et le Center for Climate Systems Modeling (C2SM) de l'École Polytechnique Fédérale de Zürich, ces scénarios ont été établis et ont permis de produire les données CH2018, disponibles gratuitement, utilisables pour tout projet de recherche sur le climat en Suisse.

L'augmentation prévue des températures estivales dans le canton de Neuchâtel pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 par rapport à la période 1981-2010 est visible ci-dessous (*Figure 5*). Les résultats sont présentés sous la forme d'une plage de valeurs possibles (colorée en jaune ou en rouge) et d'une valeur médiane (ligne jaune ou rouge) pour chaque scénario et chaque période. Les valeurs médianes sont également mentionnées à droite.

[4] RCP pour *Representative Concentration Pathways*, ou « trajectoires représentatives de concentration » en français. Il s'agit de l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.



Valeur médiane de l'augmentation de la température estivale

RCP2.6
2035 : **+ 1.1 °C**
2060 : **+ 1.2 °C**
2085 : **+ 1.1 °C**

RCP4.5
2035 : **+ 1.2 °C**
2060 : **+ 2.0 °C**
2085 : **+ 2.2 °C**

RCP8.5
2035 : **+ 1.4 °C**
2060 : **+ 2.5 °C**
2085 : **+ 4.2 °C**

Figure 5 – Estimation de l'augmentation de la température estivale dans le canton de Neuchâtel par période et par scénario d'émission de gaz à effet de serre, par rapport à la période 1981-2010 (NCCS 2024)

Le scénario RCP8.5 correspond à une situation où les émissions de gaz à effet de serre suivraient leur trajectoire actuelle, ce qui provoquerait dans le canton de Neuchâtel une augmentation des températures estivales allant jusqu'à +4.2 °C (valeur médiane) à la fin du siècle, et pouvant possiblement atteindre +6.5 °C (valeur maximale). Il s'agit de la tendance que nous suivons actuellement.

Le scénario RCP4.5 correspond à une situation où des mesures de réduction des gaz à effet de serre seraient mises en œuvre de sorte à les stabiliser d'ici la fin du siècle. Dans le canton de Neuchâtel, les températures estivales augmenteraient jusqu'à +2.0 °C au milieu du siècle puis jusqu'à +2.2 °C à la fin du siècle (valeur médiane), et pouvant possiblement atteindre +3.2 °C (valeur maximale). Il s'agit d'un scénario encore possible si des mesures suffisantes sont prises dans un délai raisonnable.

Le scénario RCP2.6 correspond à une situation où des mesures drastiques de réduction des gaz à effet de serre seraient mises en œuvre dès les années 2020, avec des impacts visibles à partir des années 2070. Dans le canton de Neuchâtel, les températures estivales augmenteraient jusqu'à atteindre +1.2 °C au milieu du siècle (2060) puis baisseraient légèrement jusqu'à la fin du siècle. Ce scénario correspond à l'objectif des Accords de Paris de limiter le réchauffement climatique à +2.0 °C d'ici 2100 par rapport à la température préindustrielle. Ce scénario n'est plus considéré comme réaliste compte tenu de la situation effective au début des années 2020.

Dans tous les scénarios, les différences de l'augmentation de température prévue entre le littoral et le reste du canton se limitent à environ 0.1 °C.

2.2 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES AUTOCHTONES

Les températures estivales, et a fortiori leur augmentation prévue pour les prochaines décennies, entraînent des conséquences directes sur la santé humaine, en particulier pour les populations les plus fragiles. Pour cela, une attention particulière est portée sur les conditions météorologiques autochtones, qui entraînent généralement les charges thermiques les plus élevées.

Les conditions météorologiques autochtones sont les situations dans lesquelles le ciel est sans nuages et où les vents à large échelle, qui amènent des masses d'air depuis d'autres régions, comme la bise ou le foehn, ne sont que très faiblement présents. Cette situation laisse place aux phénomènes climatiques locaux (voir partie *2.3*), qui sont alors prépondérants. Le terme « autochtone » peut être compris comme « peu de nuages et peu de vent ».

Les journées autochtones sont caractérisées par un rayonnement solaire très élevé et un vent faible. La température est donc élevée, en ville particulièrement, mais également sur toutes les zones ouvertes, comme les surfaces agricoles.

Les nuits autochtones sont caractérisées par une faible couverture nuageuse (au maximum 4/8 du ciel couvert) et, simultanément, un vent faible (vitesse de vent ne dépassant pas 2.7 m/s). Ces critères doivent être remplis pendant 7 heures consécutives ou 10 heures non consécutives au cours de la période 17h - 5h.

En général, les journées et les nuits d'été autochtones entraînent les conditions thermiques les plus chaudes en raison du rayonnement solaire élevé et du faible échange d'air. Dans ces conditions, les variations de température et d'humidité sur une période de 24h sont prononcées. Même s'il s'agit de conditions météorologiques particulières, les conditions autochtones se produisent régulièrement, y compris en été. En moyenne, à la station de mesure de Neuchâtel, sur la période 2011-2022, 34 % des nuits des mois de juin, juillet et août sont autochtones.

2.3 PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES LOCAUX

En conditions météorologiques autochtones, plusieurs phénomènes climatiques locaux s'expriment, tels que l'effet d'îlot de chaleur ou les brises nocturnes.

2.3.1 Effet d'îlot de chaleur

En ville, l'influence anthropique induit une augmentation des températures par rapport à la campagne environnante, et cela est d'autant plus marqué que la ville est grande ou peuplée (Oke 1973). Les raisons sont multiples, notamment :

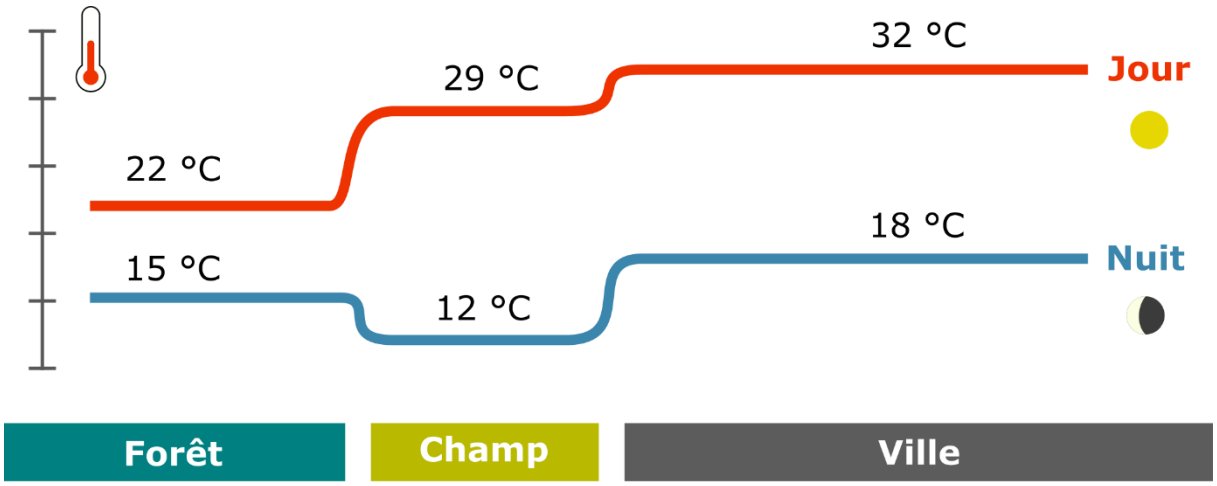
- le faible albédo des matériaux utilisés (béton, asphalte, goudron, etc.), qui provoque une forte accumulation de chaleur pendant la journée, restituée ensuite durant la nuit ;
- le faible pouvoir d'évapotranspiration, et donc la limitation de son pouvoir refroidissant[5], du fait de la faible part de végétation et de surfaces naturelles présentes ;
- la morphologie urbaine, telle que l'orientation des rues ou la densité des constructions, qui génère une rugosité urbaine limitant le passage de l'air, notamment l'air frais en provenance des surfaces vertes environnantes ;
- le piégeage radiatif, qui favorise l'accumulation de chaleur dans les matériaux à cause des multiréflexions du rayonnement solaire ;
- les émissions directes de chaleur provenant du trafic, de l'industrie et des ménages ;
- les émissions de polluants atmosphériques, qui provoquent un « pseudo-effet de serre » en absorbant le rayonnement solaire et en le réémettant sous la forme d'un rayonnement à ondes longues, empêchant ainsi le refroidissement.

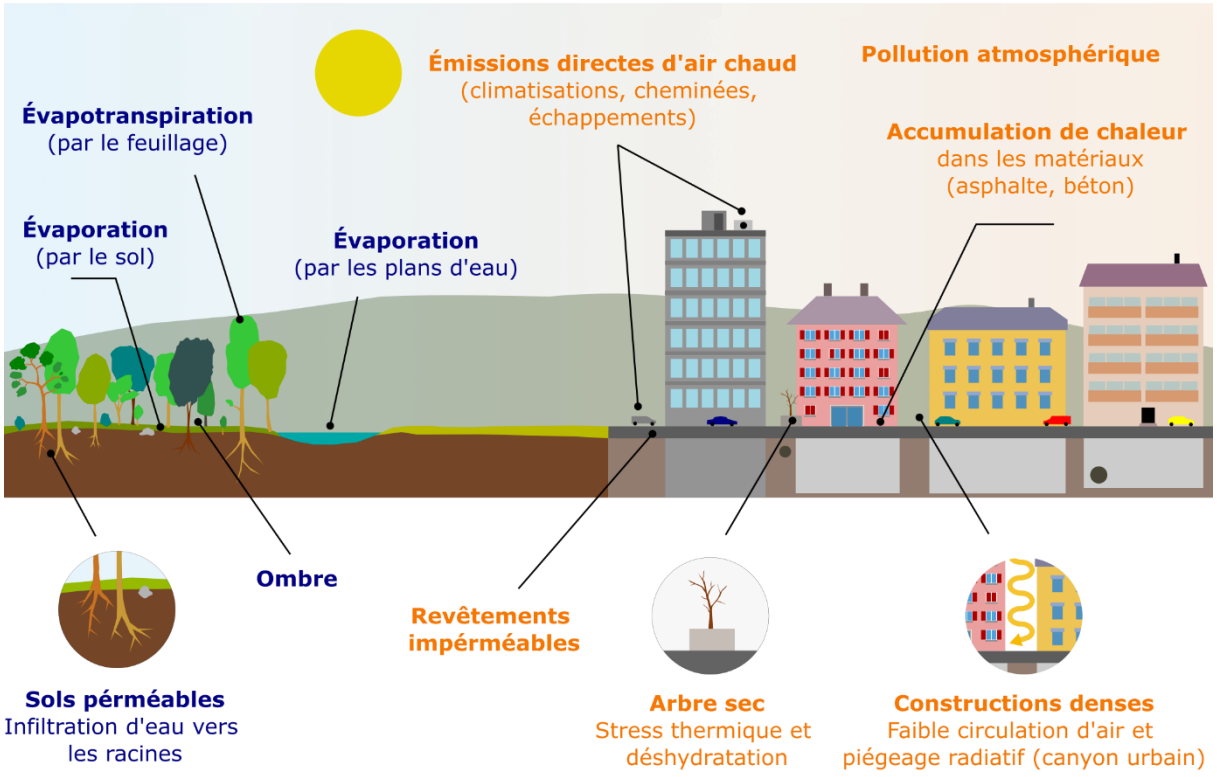
Ce phénomène de surchauffe en ville est connu sous le nom d'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU). La journée, malgré cet effet, la différence de température (à 2 m du sol) entre la ville et les espaces agricoles ouverts

[5] La transformation d'eau en vapeur est une transformation physique qui puise de l'énergie dans l'air et permet de le refroidir.

(non forestiers) de même altitude est modérée, car le rayonnement solaire est intense dans les deux cas (*Figure 6*).

Cette différence est toutefois plus marquée la nuit, en raison d'un temps de refroidissement beaucoup plus long en ville que dans la campagne environnante. En effet, la nuit, l'atmosphère se refroidit à proximité du sol d'autant plus que sa capacité thermique est faible. En d'autres termes, moins le sol accumule de chaleur la journée, plus l'air se refroidit la nuit. Ainsi, le refroidissement est plus important et plus rapide au-dessus des terres agricoles ou des prairies. Au contraire, en ville, le faible albédo des matériaux donne lieu à une diffusion de la chaleur accumulée la journée pendant plusieurs heures après le coucher du soleil. S'ajoute à cela la rugosité urbaine qui limite le passage de l'air froid, et les émissions directes de chaleur par les activités humaines nocturnes.





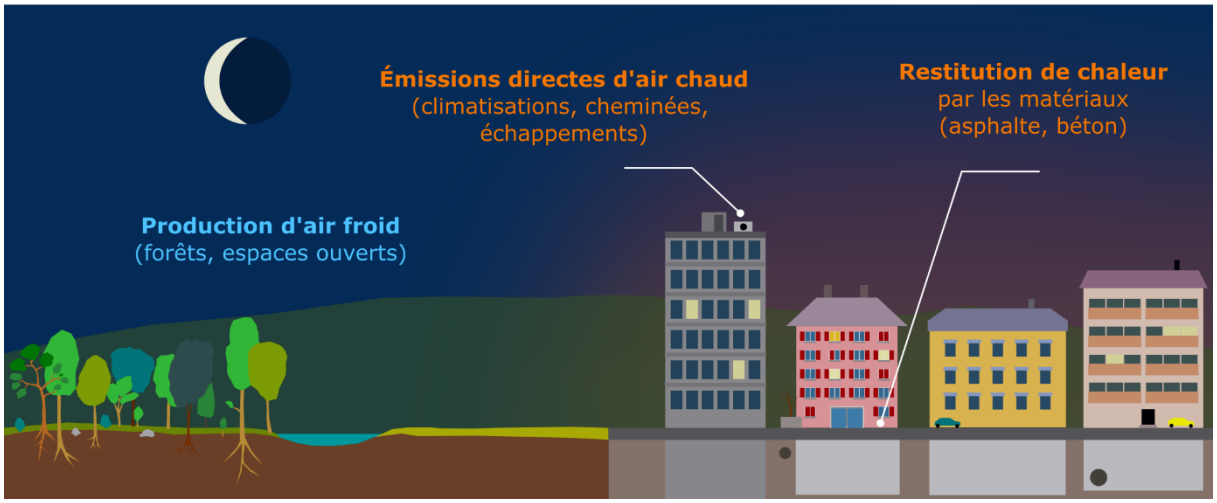


Figure 6 – Représentation schématique de l'effet d'îlot de chaleur durant la journée, avec des températures typiques du canton de Neuchâtel en conditions autochtones, sur la période 1981-2010

2.3.2 Courants nocturnes d'air froid

L'air froid désigne une masse d'air dont la température est inférieure à celle de son environnement et qui résulte du processus de refroidissement nocturne de l'atmosphère près du sol.

2.3.2.1 BRISES THERMIQUES

Les brises thermiques sont des courants d'air horizontaux de compensation provoqués par la différence de température et de pression de l'air entre deux lieux. Lorsqu'il se réchauffe, l'air perd en densité et s'élève. Cela crée un phénomène de basse pression qui aspire l'air environnant, plus frais. Ainsi, un courant d'air frais arrive dans la zone plus chaude.

Ce phénomène se produit dans plusieurs situations décrites ci-dessous.

2.3.2.1.1 BRISES URBAINES

En conditions météorologiques autochtones, durant la journée, l'air des villes surchauffe à cause de l'effet d'îlot de chaleur (voir partie *2.3.1*) et s'élève par convection. Le système de basse pression qui se développe alors près du sol provoque des courants de compensation faisant s'écouler, dans la zone urbaine, des masses d'air provenant des environs (*Figure 7*).

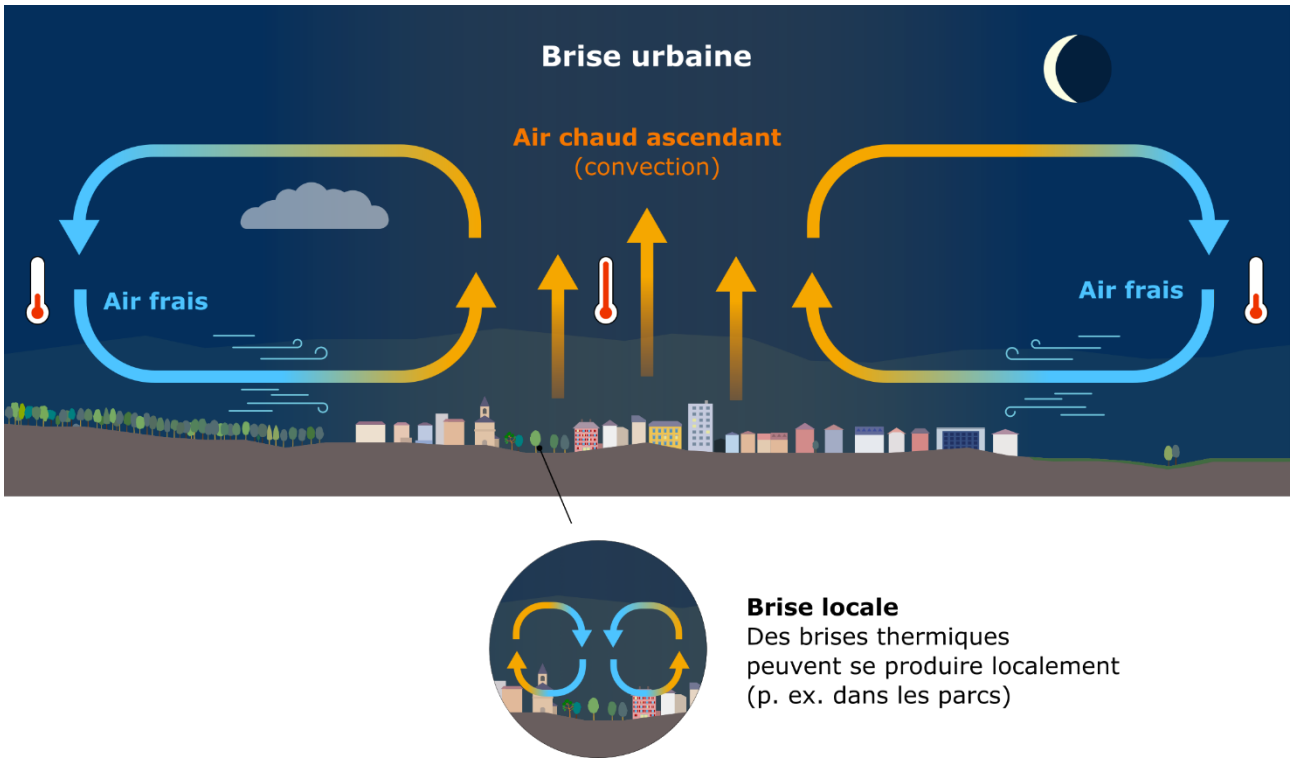


Figure 7 – Illustration schématique de la brise urbaine

Pendant la journée, cela n'entraîne généralement pas de réduction de la charge thermique dans les zones d'habitation, car un niveau de température similaire prévaut dans les environs proches, qui sont en général des zones non ombragées et dégagées. Les brises urbaines peuvent cependant contribuer au mélange de la couche d'air près du sol et provoquer une dilution des polluants atmosphériques.

La nuit, en revanche, l'air des espaces verts environnants est nettement plus froid et peut apporter un rafraîchissement dans les zones urbaines. La brise induite est d'autant plus forte que la différence de température entre la ville et ses environs est grande.

Ce phénomène de brise urbaine se produit également à plus petite échelle, c'est par exemple le cas des brises de parc qui soufflent depuis un espace vert situé au milieu de la zone urbaine vers les environs construits,

plus chauds. Les brises de parc sont généralement faibles, elles dépendent grandement de la taille de l'espace vert et de sa capacité à produire de l'air froid, ainsi que des obstacles à l'écoulement qui l'entourent (bâtiments, arbres, talus, etc.).

2.3.2.1.2 BRISES DE LAC, DE MER ET DE TERRE

La journée, l'air situé au-dessus du lac (ou de la mer) est plus frais qu'au-dessus des terres, car, du fait de la grande capacité thermique de l'eau, le réchauffement de l'eau puise des calories dans l'air et permet de le rafraîchir. Cela induit une brise, soufflant du lac (ou de la mer) vers les terres, appelée « brise de mer » ou « brise de lac ».

La nuit, l'air situé au-dessus du lac est plus chaud qu'au-dessus des terres, car la grande capacité thermique de l'eau implique une importante émission de chaleur lors de son refroidissement. Pour la même raison, l'air au-dessus des terres se refroidit plus vite. Cette différence de température provoque un courant d'air de compensation appelé « brise de terre », où l'air souffle depuis les terres en direction du lac (*Figure 8*).

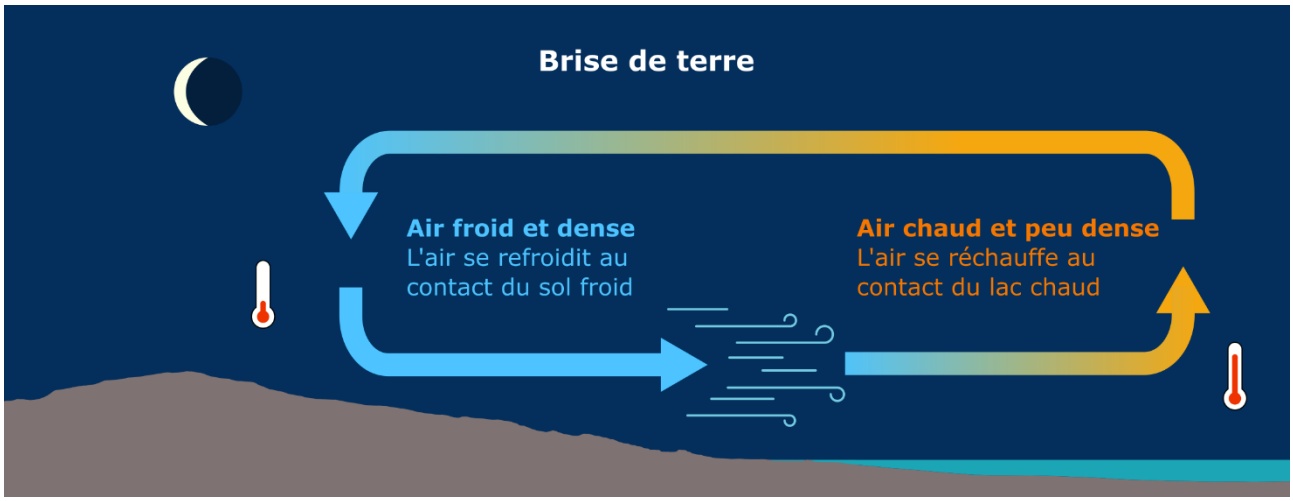


Figure 8 – Illustration schématique de la brise de terre

2.3.2.2 BRISES DE PENTE

Les brises de pente sont des courants d'air provoqués par la différence d'altitude entre deux lieux.

La journée, l'air des fonds de vallée (ou plus généralement les zones de plus faible altitude) se réchauffe plus vite et remonte le long de la vallée et des montagnes environnantes car il est moins dense, ce sont les « brises de vallée ».

La nuit, au contraire, l'air se rafraîchit plus vite sur les sommets (et, plus généralement, se rafraîchit plus vite à plus haute altitude). Plus dense, il s'écoule le long des pentes et descend dans la vallée, formant les « brises de montagne ».

Ce phénomène est d'autant plus marqué que la pente est importante et que les différences d'altitude entre le fond de vallée et les sommets sont grandes. Toutefois, ce phénomène est déjà visible avec des différences d'altitude faible, sans qu'il y ait à proprement parler de vallée et de sommets (*Figure 9*).

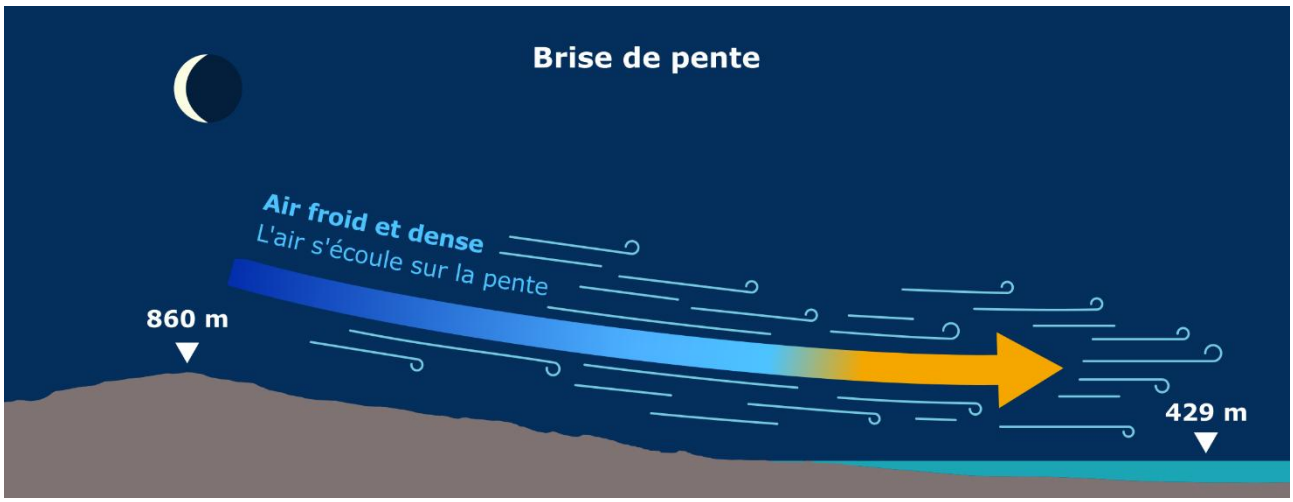


Figure 9 – Illustration schématique de la brise de pente

2.3.2.3 SYNTHÈSE DES COURANTS D'AIR NOCTURNES

La plupart du temps, les vents décrits ci-dessus apparaissent simultanément et se superposent. La nuit, dans le canton de Neuchâtel, les brises de pente se superposent généralement à la brise de terre et aux brises urbaines provoquées par les îlots de chaleur.

La vitesse d'écoulement de ces différents courants est variable mais, en général, les brises de montagne et de pente sont les plus rapides, suivis par les brises de terre, puis les brises urbaines et enfin les brises de parc, plutôt faibles.

2.3.3 Écoulement d'air froid

Pendant la nuit, l'air froid issu des différents courants décrits ci-dessus s'écoule des espaces verts ou ouverts en direction, notamment, des espaces urbains. Toutefois, cet écoulement n'est pas homogène : il dépend de la rugosité ainsi que de la pente.

La stratification thermique des masses d'air près du sol empêche le mélange vertical[6] des couches d'air. L'écoulement d'air proche du sol se fait donc majoritairement horizontalement et peut être freiné par les obstacles, tels que les arbres, les talus ou les bâtiments. Les grandes agglomérations agissent donc comme des obstacles à l'écoulement d'air en raison de leur forte rugosité, de même que les forêts, où une forte réduction de la vitesse du vent est constatée proche du sol. Le transport d'air froid au-dessus de la canopée reste toutefois possible. Au contraire, dans les espaces ouverts, sans rugosité, l'écoulement d'air est libre.

L'écoulement est favorisé par la pente car l'air froid, dense et lourd, descend sous l'effet de la gravité. Les zones de forte pente ont donc des vitesses d'écoulement plus importantes, permettant un écoulement même lorsque la rugosité est importante.

2.3.3.1 COULOIRS D'AIR FROID

Les couloirs d'air froid sont les zones dégagées ou peu rugueuses qui permettent le transport d'air froid. Ils ont une largeur limitée par les obstacles à l'écoulement, comme les espaces bâtis. Une largeur de 50 m est considérée comme le minimum permettant un transport efficace d'air froid (Barlag, 1997). Ils permettent de transporter l'air froid avec un débit généralement élevé et constituent une composante essentielle du rafraîchissement urbain nocturne.

[6] Pendant la journée, au contraire, les conditions sont moins stables. La montée des bulles d'air chaud de l'air circulant près du sol (rafales) peut provoquer un mélange vertical des couches d'air.

Les couloirs d'air froids sont vulnérables car le développement urbain peut altérer fortement le passage de l'air à ces endroits.

2.3.3.2 ZONES D'ÉCOULEMENT D'AIR FROID

Les zones d'écoulement d'air froid englobent toutes les autres zones où l'écoulement d'air est significatif. Si l'écoulement d'air froid repose uniquement sur des brises urbaines, il peut être grandement limité par les obstacles, de façon similaire aux couloirs d'air froid. Si, au contraire, l'écoulement d'air froid repose sur des brises de pente ou des brises de montagne, il est en général peu freiné par une densification modérée de la zone urbaine, car l'air froid trouve toujours un chemin pour s'écouler malgré les obstacles qu'il rencontre.

2.3.3.3 DENSITÉ DU DÉBIT D'AIR FROID

La capacité d'un flux d'air froid à rafraîchir une zone urbaine ne dépend pas seulement de sa vitesse, mais également de son épaisseur, c'est-à-dire de la hauteur de la couche d'air froid. Pour cela, on utilise la notion de densité du débit d'air froid.

La densité du débit d'air froid correspond au volume d'air froid qui s'écoule, chaque seconde, à travers une colonne d'air froid de la section d'écoulement (*Figure 10*). La largeur de la colonne d'air froid correspond à la résolution du modèle (ici, 10 m). Le résultat s'exprime en $m^3/(m \cdot s)$.

Le débit d'air froid tient donc compte des mouvements d'air qui ont lieu au-dessus de la couche d'air proche du sol.

L'épaisseur de la couche d'air froid augmente généralement au cours de la nuit et n'est généralement pas complètement développée avant la deuxième moitié de la nuit.

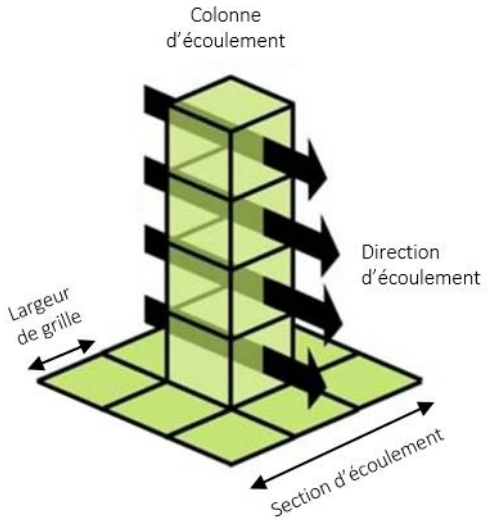


Figure 10 – Débit d'air froid à travers une colonne d'écoulement d'air

2.3.3.4 PÉNÉTRATION DE L'AIR EN VILLE

La profondeur de pénétration de l'air froid dans une zone bâtie dépend de la taille de l'agglomération et de la densité des bâtiments, ainsi que du dégagement de chaleur anthropique et de la quantité d'air froid entrant (densité du débit d'air froid). Plus la densité du débit d'air froid est grande, plus cet air est à même de rafraîchir la zone urbaine.

Les obstacles à la circulation de l'air, tels que les murs et talus routiers ou les bâtiments, peuvent provoquer d'importantes accumulations d'air froid du côté au vent. De grands volumes d'air circulent au-dessus ou autour des obstacles, mais des masses d'air froid stagnent près du sol, ce qui peut induire des différences de vitesse d'écoulement sur le plan horizontal et sur le plan vertical.

Le type et la densité du développement urbain exercent une influence considérable sur la ventilation nocturne. Les rues larges, les voies ferrées, les espaces ouverts ainsi que les corps de bâtiments positionnés parallèlement au flux favorisent une large pénétration de l'air dans la zone urbaine.

2.4 CONDITIONS THERMIQUES ESTIVALES

Avec l'augmentation prévue des températures, les êtres humains auront de plus en plus de difficultés à faire face aux conditions thermiques estivales.

2.4.1 Stress thermique pendant la journée

La journée, l'organisme est exposé à de fortes températures. On qualifie de stress thermique une situation dans laquelle le corps ne parvient plus à maintenir une température normale (entre 36 et 37 °C), que ce soit à cause du froid ou de la chaleur (*Figure 11*).

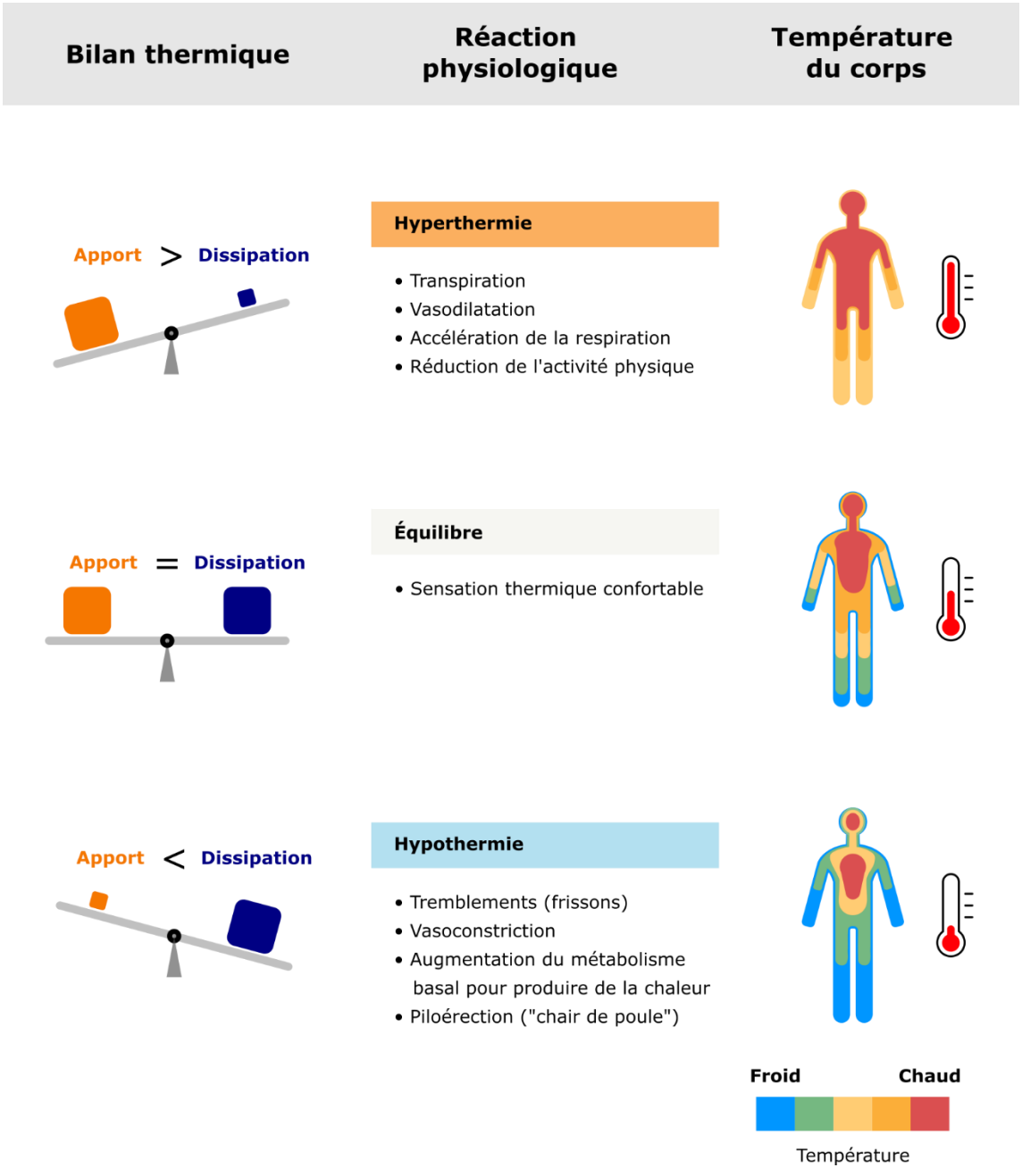


Figure 11 – Les effets du stress thermique sur l'organisme

Le stress thermique subi par les êtres humains pendant la journée est généralement évalué lors de leurs séjours à l'extérieur des bâtiments, car les conditions à l'intérieur sont variables et il est difficile de les modéliser de façon fiable. La charge thermique subie par l'organisme est évaluée en calculant les échanges de chaleur entre une personne « standard » et son environnement (*Figure 12*).

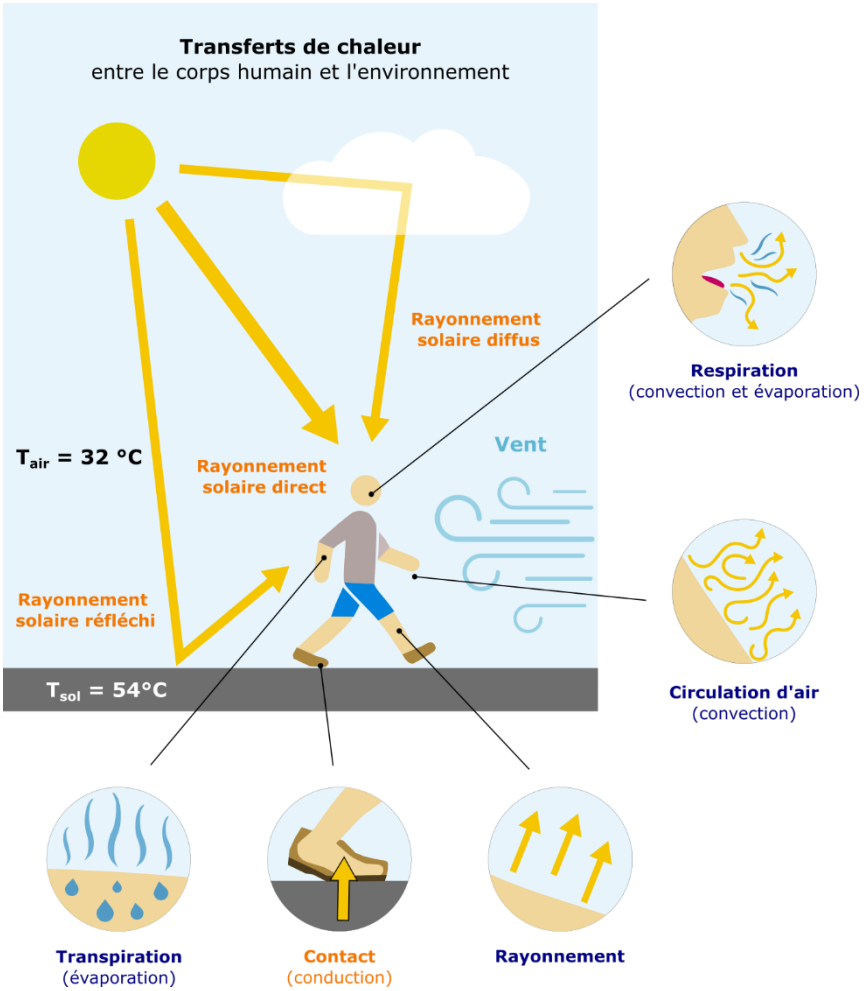


Figure 12 – Représentation schématique des différents paramètres influençant la sensation de chaleur

Plusieurs indices permettent d'estimer le stress thermique, notamment la température physiologique équivalente (PET = *Physiological Equivalent Temperature* en anglais). La PET est un indice qui permet d'exprimer la température ressentie, en °C, en combinant des informations sur la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent et le métabolisme d'un être humain « standard » (personne de taille moyenne et en bonne santé). La PET est généralement calculée à 1.1 m du sol, car il s'agit de la hauteur moyenne du centre de gravité d'un être humain.

Plus précisément, la PET indique quelle température il devrait faire, en intérieur (donc sans vent ni rayonnement solaire), pour que le bilan thermique du corps humain (températures corporelle et cutanée) soit le même que dans les conditions extérieures considérées. Cela permet intuitivement de comparer les effets thermiques complexes extérieurs avec notre expérience en intérieur. Par exemple, en été et au soleil, la PET peut être supérieure de plus de 20 °C à la température réelle de l'air, tandis que lors d'un jour d'hiver couvert et venteux, elle peut être inférieure de 15 °C.

La PET est fortement corrélée à l'ensoleillement. Par conséquent, les valeurs de PET les plus importantes se manifestent dans les villes, notamment sur les grandes surfaces imperméabilisées sans ombrage, mais aussi dans les espaces ouverts situés en périphérie.

L'échelle d'évaluation ci-dessous relie la sensation physiologique et les niveaux de stress thermique à des valeurs de l'indice PET (*Tableau 2*)

Indice PET	Sensation physiologique	Niveau de stress thermique
41 °C	Extrêmement chaud	Stress de chaleur extrême
35 °C	Très chaud	Stress de chaleur élevé
29 °C	Chaud	Stress de chaleur modéré
23 °C	Légèrement chaud	Stress de chaleur faible
20 °C	Confortable	Pas de stress thermique
18 °C	Légèrement frais	Stress de froid faible
13 °C	Frais	Stress de froid modéré
8 °C	Froid	Stress de froid élevé
4 °C	Très froid	Stress de froid extrême

Tableau 2 – Sensation physiologique et niveau de stress thermique selon les valeurs de l'indice PET (selon VDI 2004)

Cette évaluation correspond à celle d'un être humain de taille moyenne et en bonne santé, mais les personnes âgées ou malades et les enfants ont généralement plus de difficultés à réguler leur température interne et peuvent donc avoir des seuils de stress différents.

Par rapport à d'autres indices comparables, l'indice PET a l'avantage de s'exprimer en °C, ce qui rend les résultats compréhensibles pour les urbanistes et les planificateurs régionaux, qui ne sont pas forcément familiers avec la terminologie biométéorologique. De plus, cet indice est devenu un quasi-standard pour les spécialistes et est à ce titre souvent utilisé pour décrire la charge thermique dans les études climatologiques urbaines (Höppe 1999, Matzarakis et al. 1999, 2010). Ce standard permet également de comparer les résultats avec ceux d'autres villes ou d'autres cantons.

2.4.2 Confort de sommeil pendant la nuit

La nuit, les températures élevées ont surtout un impact sur les conditions de sommeil de la population. Comme il est difficile de modéliser la température de manière fiable à l'intérieur des bâtiments, il est supposé que la ventilation des logements permette d'obtenir, en milieu de nuit, la même température à l'intérieur qu'à l'extérieur. C'est donc la température de l'air extérieur qui permet d'évaluer le confort de sommeil la nuit.

Il est communément admis que la température idéale pour bien dormir se situe entre 16 et 18 °C. La notion de nuit tropicale (nuit au cours de laquelle la température ne descend pas en dessous de 20 °C) est un indicateur permettant de décrire l'exposition nocturne à la chaleur et ses effets sur la santé humaine (Krug, Mücke 2018). En effet, le repos nocturne est difficile dans les conditions d'une nuit tropicale, d'autant plus lorsque cela se produit durant plusieurs jours de suite. La santé des groupes de personnes vulnérables comme les personnes âgées et malades, les femmes enceintes et les enfants en bas âge est particulièrement impactée.

D'après MétéoSuisse[7], il faut s'attendre à ce que le nombre de nuits tropicales augmente considérablement dans les régions de basse altitude d'ici le milieu du siècle.

[7] https://www.meteosuisse.admin.ch/meteo/meteo-et-climat-de-a-a-z/nuit-tropicale.html

3 Données et méthode

3.1 DONNÉES D'ENTRÉE

3.1.1 Zone d'étude

La présente étude porte sur l'ensemble du canton de Neuchâtel. Cependant, afin de modéliser les flux d'air entre le canton et ses environs, la zone analysée s'étend au-delà des limites cantonales.

Le territoire cantonal couvre une superficie de 802.6 km² avec une extension allant jusqu'à 34.5 km dans le sens nord-sud et 50.0 km dans le sens est-ouest. La zone d'étude rectangulaire utilisée pour la modélisation s'étend sur une superficie de près de 1758 km² (37.6 km x 52 km).

Comme la quantité de données dépasse la capacité de calcul d'une seule modélisation de FITNAH-3D, la zone d'étude a été divisée en 4 carreaux (*Figure 13*) qui ont été modélisés séparément et fusionnés ensuite. Chaque carreau s'étend sur une superficie de 23 km x 30.5 km, comportant 7.2 millions de cellules raster. Pour éviter les effets de bord, les carreaux se chevauchent d'au moins 20 % (environ 8 km), tant selon l'axe nord-sud que selon l'axe est-ouest.

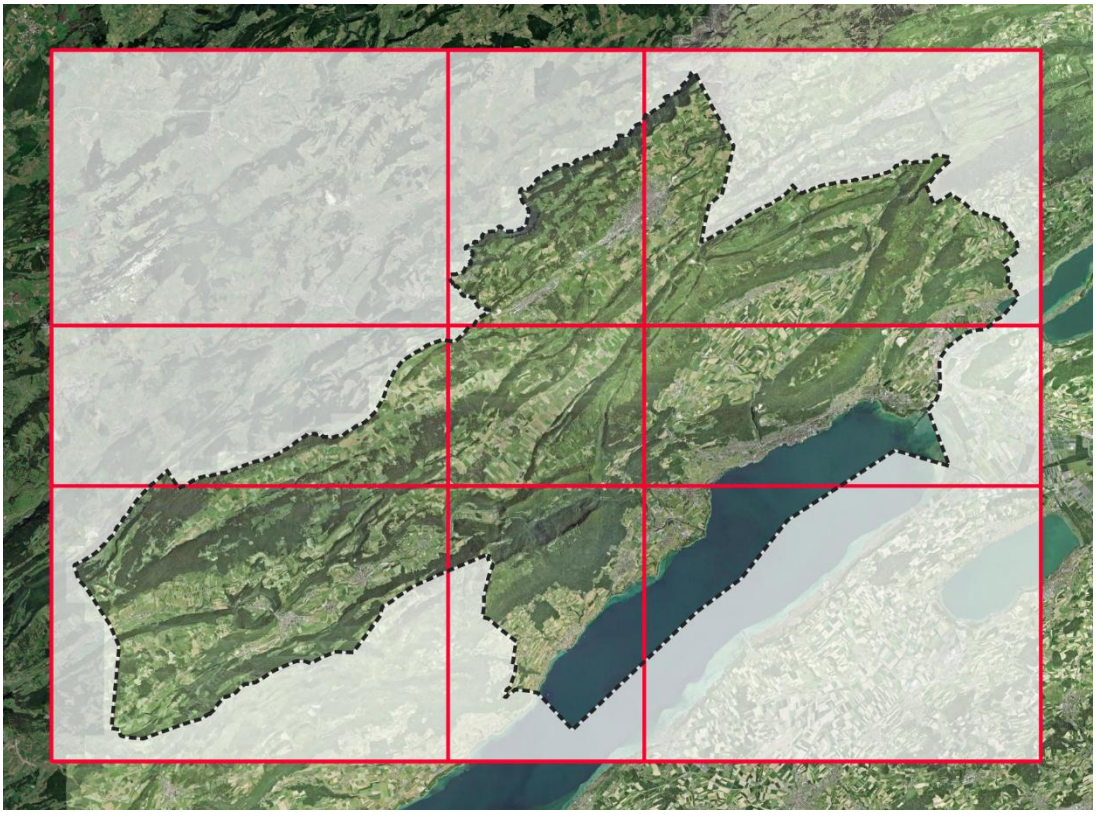


Figure 13 – Division de la zone d'étude en 4 carreaux

3.1.2 Résolution

La modélisation avec FITNAH-3D s'effectue selon une grille numérique en trois dimensions. La taille de la grille a été choisie afin que les caractéristiques climatiques locales de la zone d'étude puissent être prises en compte par le modèle. Plus la grille est fine, meilleure est la résolution, mais plus les exigences en matière

de temps de calcul et de données d'entrée sont élevées. Un compromis entre nécessité et faisabilité a dû être trouvé.

Dans la présente étude, le maillage horizontal utilisé pour la modélisation avec FITNAH-3D est de 10 m. En revanche, la maille verticale n'est pas constante : elle est particulièrement petite près du sol, afin de modéliser de manière réaliste la forte variation des variables météorologiques, et augmente avec l'altitude. Ainsi, les zones de calcul les plus basses sont situées à des hauteurs de 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40 et 60 m au-dessus du sol. Pour les plus hautes altitudes, la maille verticale augmente encore, avec les hauteurs de calcul suivantes : 100, 150, 200, 300, 400, 600, 1000, 1500, 2000 et 3000 m au-dessus du sol. Pour cette étude, la limite supérieure de cette étude se situe à une hauteur de 3000 m au-dessus du sol car, même si la limite du modèle se situe à 8000 m, les perturbations causées au niveau du sol par les reliefs montagneux sont supposées négligeables à partir de 3000 m.

3.1.3 Données géographiques

Les données géographiques nécessaires pour FITNAH-3D sont l'altitude, l'occupation des sols et la hauteur des structures. Pour modéliser P0, ces données n'existent pas ou ne sont pas d'une précision suffisante. Des données actuelles ont donc été utilisées. Pour modéliser P1, P2 et P3 de la manière la plus réaliste possible, les données utilisées pour P0 ont été adaptées lorsque cela était faisable. La liste des données fournies par le SGRF est présentée ci-dessous (*Tableau 3*).

3.1.3.1 SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOGRAPHIQUES FOURNIES PAR LE SGRF

Périmètre	Données de base	Type de donnée	Traitement	Données fournies	Période	Format
Données sur l'altitude						
Canton de Neuchâtel	MNT issu du relevé lidar cantonal 2022	Raster à 1 m	-	*Idem aux données de base*	P0 à P3	Raster à 1 m
France voisine	Points lidar de l'IGN	Nuage de points	Calcul du MNT	MNT issu du relevé lidar IGN	P0 à P3	Raster à 1 m
Données sur l'occupation du sol						
Canton de Neuchâtel	Couche « couverture de sol » de la mensuration officielle	Vecteur polygone	Voir annexe 1	Occupation des sols	P0	Vecteur polygone
Canton de Neuchâtel	Objets « couverts » de la couche « objets divers » de la mensuration officielle	Vecteur polygone			P0	
Canton de Neuchâtel	Objets « toits » du cadastre 3D des bâtiments	Vecteur polygone 3D			P0	
Canton de Neuchâtel	Futures zones de développement selon le SCAT	Vecteur polygone	Voir annexe 2	Secteurs de développement	P1 à P3	Vecteur polygone
Canton de Neuchâtel	Orthophoto 2018-2019	Raster à 10 cm	Digitalisation de la zone en eau	Lac des Brenets futur	P1 à P3	Vecteur polygone
Données sur la hauteur des structures						
Canton de Neuchâtel	MNC issu du relevé lidar cantonal 2022	Raster à 1 m	-	*Idem aux données de base*	P0	Raster à 1 m
Canton de Neuchâtel	MNC issu du relevé lidar cantonal 2022 et MNC issu du relevé lidar post-tempête de La Chaux-de-Fonds	Raster à 1 m	Adaptations selon les indications du SFFN	MNC adapté	P1 à P3	Raster à 1 m
Canton de Neuchâtel	Cadastre 3D des bâtiments	Vecteur polygone 3D	Intersection spatiale avec les empreintes de bâtiments	Hauteur moyenne des bâtiments	P0	Attribut de la couche « occupation des sols »
Canton de Neuchâtel	Points de la classe « bâtiment » du relevé lidar 2022	Nuage de points				
Canton de Neuchâtel	Objets « murs » de la couche « objets divers » de la mensuration officielle	Vecteur polygone	Attribution d'une hauteur	Principaux murs antibruit	P0 à P3	Vecteur polygone
Canton de Neuchâtel	Points de la classe « sol » du relevé lidar 2022	Nuage de points				
France voisine	Points de la classe « végétation » du relevé lidar de l'IGN	Nuage de points	Calcul du MNC	MNC issu du relevé lidar IGN	P0 à P3	Raster à 1 m
France voisine	Points de la classe « bâtiment » du relevé lidar de l'IGN	Nuage de points	Calcul du MNB	MNB issu du relevé lidar IGN	P0 à P3	Raster à 1 m

Tableau 3 – Synthèse des données géographiques fournies par le SGRF

3.1.3.2 SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOGRAPHIQUES ENTRANT DANS LE MODÈLE

À partir des données fournies par le SGRF et d'autres données gratuites, 3 rasters à 10 m ont été créés pour chaque période : MNT, occupation des sols et hauteur des structures (*Tableau 4*). Ces 3 rasters sont les données géographiques d'entrées nécessaires pour effectuer une modélisation dans FITNAH-3D.

Périmètre	Données utilisées	Format	Traitement	Données d'entrée	Période	Format
Données sur l'altitude						
Canton de Neuchâtel	MNT issu du relevé lidar cantonal 2022	Raster à 1 m	• Agrégation et rééchantillonnage	MNT	P0 à P3	Raster à 10 m
Cantons voisins	MNT de Swisstopo (Swissalti3D)	Raster à 1 m				
France voisine	MNT issu du relevé lidar IGN	Raster à 1 m				
Données sur l'occupation du sol						
Canton de Neuchâtel	Occupation des sols	Vecteur polygone	• Transformation des vecteurs en raster • Agrégation et rééchantillonnage	Occupation des sols	P0	Raster à 10 m
Cantons voisins	Couche « couverture de sol » de la mensuration officielle	Vecteur polygone				
France voisine	MNB	Raster à 1 m				
Canton de Neuchâtel	Secteurs de développement	Vecteur polygone	• Transformation des vecteurs en raster • Remplacement dans le raster de P0	Occupation des sols	P1 à P3	Raster à 10 m
Canton de Neuchâtel	Lac des Brenets	Vecteur polygone				
Données sur la hauteur des structures						
Canton de Neuchâtel	MNC issu du relevé lidar 2022	Raster à 1 m	• Transformation des vecteurs en raster • Agrégation et rééchantillonnage	Hauteur des structures	P0	Raster à 10 m
Canton de Neuchâtel	Hauteur moyenne des bâtiments	Attribut de la couche « occupation des sols »				
Canton de Neuchâtel	Principaux murs antibruit	Vecteur lignes				
Cantons voisins	MNC national (LFI[8])	Raster à 1 m				
Cantons voisins	SwissBUILDINGS3D 3.0 Beta	Vecteur polygones 3D				
France voisine	MNC issu du relevé lidar IGN	Raster à 1 m				
France voisine	MNB issu du relevé lidar IGN	Raster à 1 m				
Canton de Neuchâtel	Hauteur moyenne des bâtiments futurs	Attribut de la couche « Secteurs de développement »	• Agrégation et rééchantillonnage • Remplacement dans le raster de P0	Hauteur des structures	P1 à P3	Raster à 10 m
Canton de Neuchâtel	MNC adapté	Raster à 1 m				

Tableau 4 – Synthèse des données géographiques entrant dans le modèle FITNAH-3D

[8] LFI est un modèle numérique de canopée à l'échelle suisse produit dans le cadre de l'inventaire forestier national. Il est calculé à partir d'une autocorrélation des photos swissimage RS dans le cadre de l'inventaire forestier national.

3.1.3.3 OCCUPATION DES SOLS

Le raster de l'occupation des sols, utilisé en entrée du modèle, est défini par 11 classes d'occupation (*Tableau* 5).

Surface artificielle	Surface naturelle (végétation)	Surface naturelle (autre)
Bâtiment	Champ, gazon	Eaux de surface
Surface imperméable	Arbre sur sol naturel	Roche nue
Surface semi-imperméable	Arbre sur surface semi-imperméable	Éboulis, sable
Voies ferrées	Arbre sur surface imperméable	

Tableau 5 – Les 11 classes d'occupation des sols

Pour produire ce raster, la couche vectorielle de l'occupation des sols fournie par le SGRF a été transformée en raster à 10 m, selon la même grille que le modèle numérique de terrain (MNT).

Avec une taille de pixel à 10 m, les grands bâtiments et certains arbres isolés sont représentés dans le raster. Les couverts et les avant-toits des bâtiments ont été considérés comme des bâtiments, permettant ainsi d'augmenter un peu l'emprise au sol des constructions pour favoriser leur représentation dans le raster (voir annexe 1). La végétation de plus de 2.5 m de haut a été répartie dans 3 classes d'occupation différentes : les arbres sur un sol naturel (p. ex. la forêt ou les arbres dans les parcs), les arbres sur un sol partiellement imperméable (p. ex. les arbres à côté de voies ferrées ou de terrains de sport) et les arbres sur une surface imperméable (p. ex. les arbres des rues).

Ci-dessous, un extrait de l'occupation des sols à P0 est présenté respectivement pour Neuchâtel (*Figure 14*) et La Chaux-de-Fonds (*Figure 15*).

Le canton est caractérisé par une grande part d'espaces verts : les classes « Champ, gazon » et « Arbres sur sol naturel » représentent à elles seules environ 91 % du raster de l'occupation des sols à P0.

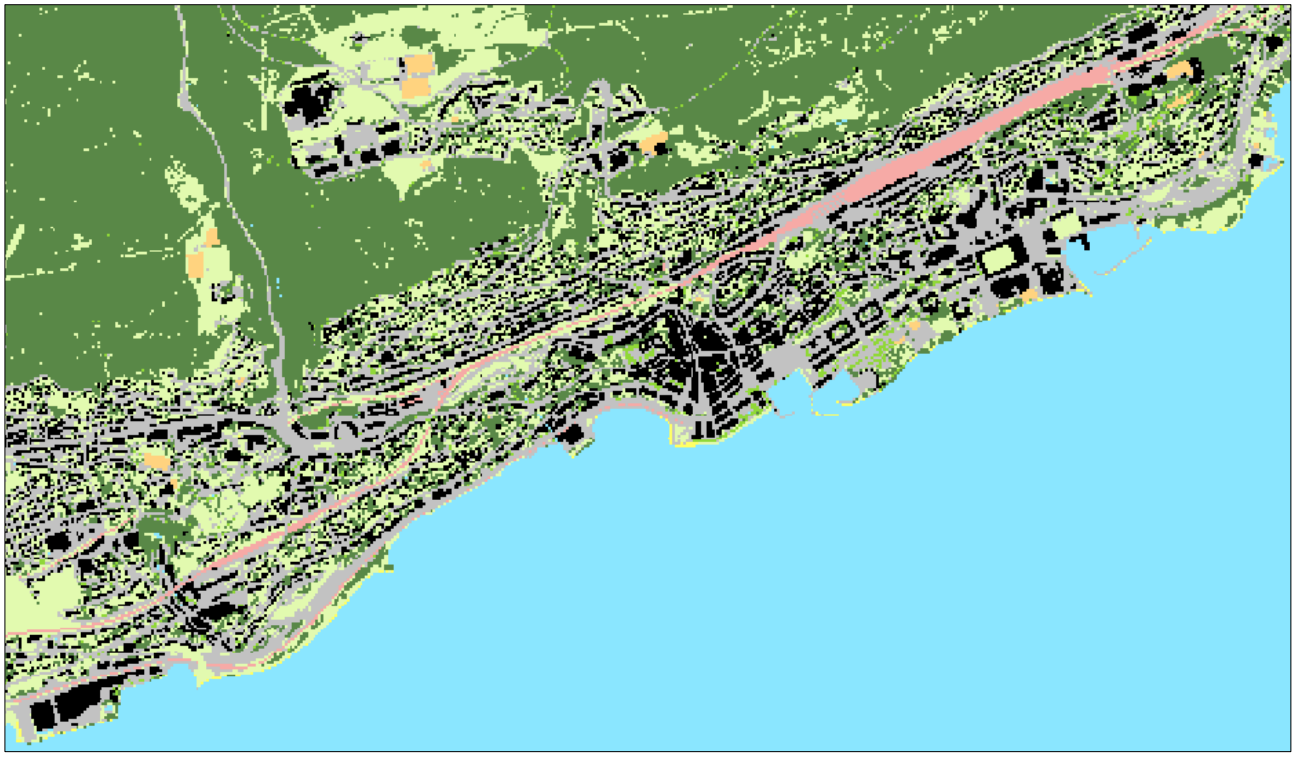


Figure 14 – Raster à 10 m de l'occupation des sols pour la ville de Neuchâtel

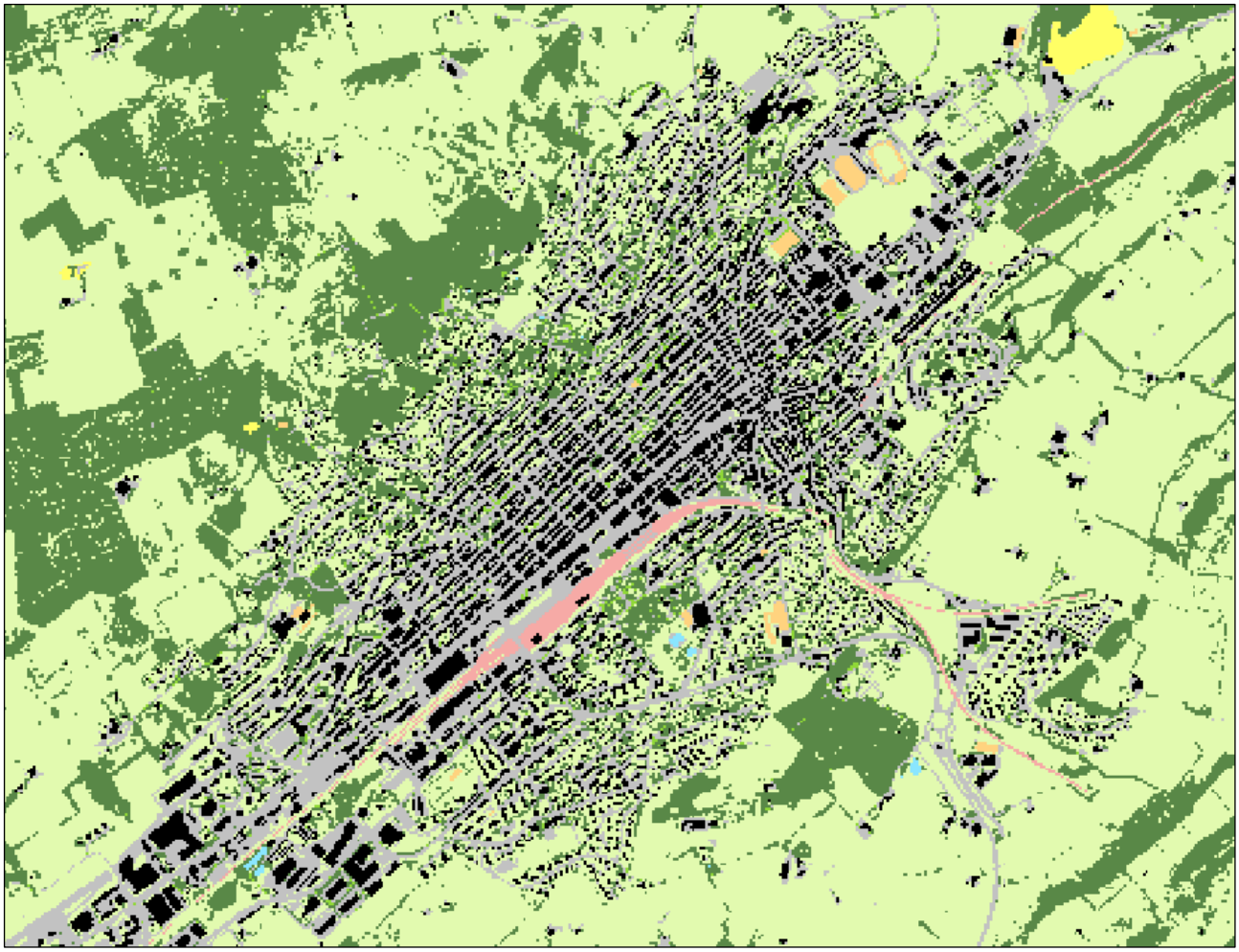


Figure 15 – Raster à 10 m de l'occupation des sols pour la ville de La Chaux-de-Fonds

Pour la période future P1, l'occupation des sols dans le canton a été adaptée en tenant compte des secteurs de développement à l'horizon 2040 (zones à bâtir encore libres de construction). Pour chaque secteur de développement, la part destinée à être occupée par les classes « Bâtiment », « Surface imperméable », « Champ, gazon » et « Arbre sur sol naturel » a été définie (voir annexe 2). Les pixels situés à l'intérieur des secteurs de développement ont été attribués à ces 4 classes d'occupation de sorte à respecter les parts définies. La distribution spatiale des pixels a été faite de façon aléatoire, car l'implantation des futurs bâtiments et des futurs aménagements n'est pas encore connue. L'occupation des sols à P0 et à P1 d'un secteur de développement est présentée ci-dessous (*Figure 16*).



Figure 16 – Raster à 10 m de l'occupation des sols à P0 (à gauche) et à P1 (à droite) d'une zone de développement

À l'échelle du canton, l'intégration des secteurs de développement réduit de moins de 1 % la part des espaces verts et ouverts (classe « Champ, gazon ») et augmente de près de 5 % l'ensemble des classes « Bâtiment » et « Surface imperméable » (dans le cas où l'intégralité des droits à bâtir serait utilisée).

Pour les périodes futures P2 et P3, l'occupation des sols utilisée est celle de P1, car il n'existe pas encore d'informations sur le développement urbain pour ces horizons de temps.

3.1.3.4 HAUTEUR DES STRUCTURES

La couche de la hauteur des structures contient des informations sur la hauteur des objets qui peuvent avoir un impact sur les écoulements d'air. Il s'agit principalement des arbres, des bâtiments et d'autres grandes structures urbaines comme les murs antibruit.

3.1.3.4.1 ARBRES

Pour modéliser P0, les hauteurs des arbres ont été reprises des modèles numériques de canopée (MNC) existants.

Pour les trois périodes futures, le MNC cantonal a été adapté selon les prévisions du SFFN, se résumant à une diminution générale de la hauteur de la canopée de l'ordre de 2 m. La hauteur moyenne des arbres diminuera probablement au cours des prochaines années, car les arbres les plus hauts, principalement résineux, dépériront et seront progressivement remplacés par des espèces de feuillus plus adaptées au climat futur, de plus petite taille.

La tempête survenue en juillet 2023 sur les villes du Locle et de La Chaux-de-Fonds a détruit ou endommagé près de 25'000 arbres, en ville comme dans les forêts voisines. Ces pertes, non négligeables, sont prises en compte à partir de la période P1. Ainsi, la période de référence P0 tient compte de la végétation avant le sinistre et la période P1 tient compte de la situation post-tempête à laquelle 6 m de hauteur de canopée ont été ajoutés, prédisant que la végétation se renouvellera dans les zones touchées. Les périodes P2 et P3 sont identiques à P1.

3.1.3.4.2 BÂTIMENTS

Dans le périmètre cantonal, les hauteurs des constructions ont été en majorité extraites du cadastre 3D des bâtiments, et, lorsque le cadastre 3D n'était pas à jour, des points lidar de la classe « bâtiment » du vol cantonal 2022. Afin d'obtenir un raster de la hauteur des bâtiments, ces valeurs ont été intégrées aux pixels de la classe « Bâtiment » de la couche vectorielle « occupation des sols » produite par le SGRF. Les données ont finalement été agrégées avec les modèles numériques de bâtiment (MNB) des cantons voisins et de France voisine.

À P1, la hauteur des bâtiments des futurs secteurs de développement a également été considérée. Une hauteur moyenne de bâtiment a été définie pour chaque secteur de développement (voir annexe 2), permettant d'assigner une hauteur aux pixels de la classe « Bâtiment » du raster de l'occupation des sols. Ce même raster a été utilisé pour modéliser P2 et P3. Il s'agit d'hypothèses plausibilisées en coordination avec le SCAT, à partir des informations disponibles au moment de l'étude.

3.1.3.4.3 MURS ANTIBRUIT

En plus des bâtiments et des arbres, les murs antibruit constituent des obstacles potentiels aux courants d'air. Les principaux murs antibruit le long des voies ferrées et des autoroutes d'une hauteur supérieure à 3 m ont été considérés.

3.1.4 Température de l'eau

Outre les données géographiques, FITNAH-3D prend en compte la température des eaux de surfaces (lacs et rivières). Les données utilisées pour la modélisation de P0 sont présentées ci-dessous (*Tableau 6*).

Lac / rivières	Source des données	Méthode de calcul	Température
Lac de Neuchâtel	Eawag	Modélisation de la température avec Simstrat 3.03	20.46 °C
Lac de Morat	MeteoNews	Diagramme climatique des températures de l'eau	21.3 °C
Lac de Bienne	MeteoNews	Diagramme climatique des températures de l'eau	20.3 °C
Autres lacs	-	Valeur par défaut	20 °C
Rivière « L'Areuse »	SENE	Mesures	De 8.3 °C à sa source à 20 °C à son embouchure
Rivière « Le Doubs »	SENE	Mesures	De 16.3 °C à l'arrivée dans le lac des Brenets à 21.2 °C au barrage du Châtelot
Autres rivières	-	Régression linéaire à partir des données disponibles (*Figure 17*)	Selon la régression linéaire

Tableau 6 – Température des eaux de surface à P0

Une régression linéaire de la température en fonction de l'altitude a été effectuée sur la base des données de l'OFEV, disponibles pour la période 2000-2022 et couvrant les cantons de Lucerne, Argovie, Berne, Vaud, Zürich et Neuchâtel (*Figure 17*). Cela a permis d'attribuer une température aux rivières qui n'ont pas fait l'objet de campagnes de mesures.

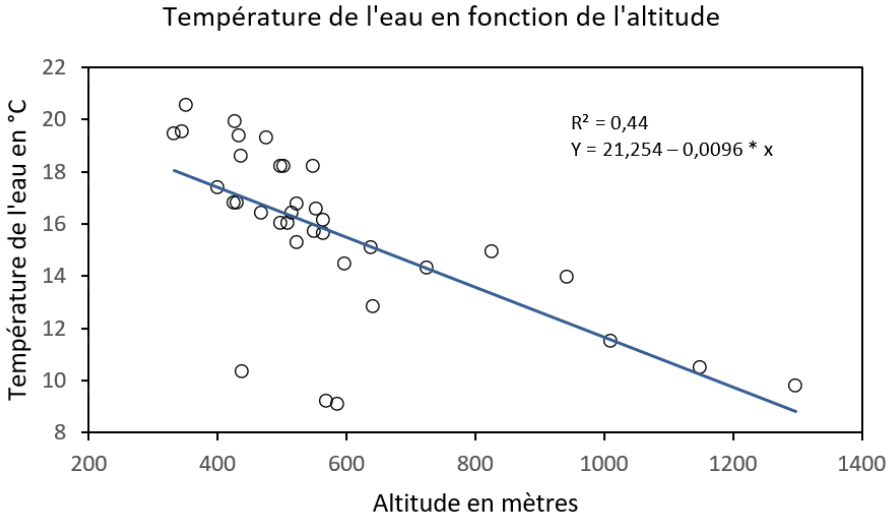


Figure 17 – Régression linéaire permettant de lier la température de l'eau à l'altitude

Pour la modélisation des périodes P1, P2 et P3, une augmentation de la température de l'eau a été prise en compte (*Tableau* 7), celle-ci étant définie comme la moitié de l'augmentation de la température de l'air, du fait de la grande capacité thermique de l'eau. La même augmentation a été appliquée pour toutes les eaux de surface, indépendamment de leur nature (lac, rivière), de leur taille et de leur altitude.

Période	Plage temporelle	Augmentation de la température de l'eau
P1	2020-2049	+ 0,7 °C
P2	2045-2074	+ 1,25 °C
P3	2070-2099	+ 2,1 °C

Tableau 7 – Augmentation de la température de l'eau pour les périodes futures

3.1.5 Couche d'utilisation du sol

La couche d'utilisation du sol vise à subdiviser le canton en petites portions dont l'utilisation et les caractéristiques climatiques sont homogènes. La segmentation du territoire cantonal est d'abord effectuée selon 8 catégories d'utilisation du sol, puis affinée en unités climatiquement homogènes pour les entités spatiales de grande taille, telles que les forêts.

La couche d'utilisation du sol n'a pas été utilisée directement comme donnée d'entrée de FITNAH-3D, mais elle a servi de base à la création des cartes d'évaluation bioclimatique (voir partie *3.3.4*). Pour l'établir, plusieurs sources de données ont été exploitées. Dans les zones urbanisées, les zones d'affectation issues de l'aménagement du territoire ont majoritairement été utilisées, tandis que dans le reste du canton la couche vectorielle d'occupation des sols (celle produite par le SGRF et ayant servi de base à la couche raster utilisée par FITNAH), majoritairement issue de la mensuration officielle, a été majoritairement utilisée. La résolution spatiale de la couche d'occupation des sols peut s'avérer excessivement détaillée (par exemple, la représentation d'un chemin au sein d'un parc), ce qui requiert une interprétation nuancée des résultats.

Les catégories d'utilisation du sol et leur contenu sont disponibles ci-dessous (*Tableau 8*), sans toutefois mentionner la totalité des cas particuliers. La procédure complète est disponible à l'annexe 3.

Note pour la lecture du tableau :

- *« classe » se rapporte à la classe d'occupation du sol dans le raster d'occupation du sol,*
- *« nature » se rapporte à la nature de couverture du sol dans la couche vectorielle d'occupation du sol (provenant de la mensuration officielle).*

Catégorie	Définition	Contenu en zone urbanisée (selon les zones d'affectation)	Contenu hors zone urbanisée (selon l'occupation des sols)
Habitat	Zones contenant des bâtiments d'habitation	Zones dédiées à l'habitat	classe « Bâtiments » + tampon de 100 m
Autre activité humaine	Zones contenant des bâtiments destinés à d'autres activités	Zones dédiées aux activités économiques ou de loisir	classe « Bâtiments » + tampon de 100 m
Surface sans végétation	Zones perméables ou semi-perméables non végétalisées	-	natures « accès, place » et « surface sans végétation »
Transport (hors rail)	Zones dédiées au transport non ferroviaire	Zone dédiée au transport non ferroviaire	natures « route », « chemin », « trottoir », « îlot »
Voies ferrées	Zones dédiées au transport ferroviaire	Zone dédiée au transport ferroviaire	nature « chemin de fer »
Eau	Zones dont la surface est en eau	-	classe « eaux »
Forêt	Zones de forêt	-	nature « surface boisée »
Surface verte	Zones végétalisées non forestières	-	nature « surface verte »

Tableau 8 – Les catégories de la couche d'utilisation du sol

Un extrait de la couche d'utilisation du sol est disponible ci-dessous, à Neuchâtel (*Figure 18*) et La Chaux-de-Fonds (*Figure 19**Erreur ! Source du renvoi introuvable.***).



Figure 18 – Extrait de la couche d'utilisation du sol à Neuchâtel


Rue du Parc
Rue de la Serre
Rue de la Loge
Rue des Musées
Rue de la Chapelle
Rue des Terreaux
Rue du Temple-Allemand
Rue du Progrès
Rue du Pont
Rue du Collège
Rue du Marché
Rue de la Balance
Rue du Docteur-Coullery
Rue Fritz-Courvoisier
Rue du Président-Wilson
Rue Numa-Droz
Rue de la Paix
Avenue Léopold-Robert
Rue du Commerce
Rue Jaquet-Droz
Rue Daniel-JeanRichard
Rue de la Ronde
Rue du Casino
Rue des Crêtets
Rue Charles-Humbert
Rue des Entilles
Rue des Arêtes
Rue des Sagnes
Rue du Grenier
Rue du Locle
Rue du Doubs
Rue du Nord
Rue du Stand
Rue du Soleil
Rue du Versoix
Rue du Temple
Rue du Midi
Rue du Balancier
Rue du Bois-Gentil
Rue du Bois-Noir
Rue du Bois-Rond
Rue du Bois-Sonnet
Rue du Bois-Rougeot
Rue du Bois-Rochat
Rue du Bois-Joli
Rue du Bois-Mairet
Rue du Bois-Mairet
Rue du Bois-Mairet

3.1.6 Limites des données

Les données utilisées dans cette analyse présentent plusieurs approximations et limites.

Premièrement, la zone d'étude choisie implique d'utiliser des données géographiques concernant les parties hors du canton. Ces données sont moins détaillées que les données cantonales, mais elles sont considérées comme suffisantes pour modéliser les interactions entre le canton de Neuchâtel et ses alentours de façon représentative.

Ensuite, bien que P0 se réfère à une période révolue depuis plus de 10 ans, des données actuelles sont utilisées pour modéliser cette période, car leur incertitude est moindre comparé aux anciennes données, qui sont bien souvent moins précises, moins fiables ou tout simplement inexistantes. Utiliser des données récentes n'exclut toutefois pas le risque d'incohérences entre des couches dont la source, la résolution, ou l'année sont différentes.

Les villes ont souvent des structures particulièrement fines qui, compte tenu de la résolution de la grille (10 m), impliquent des simplifications. Pour les données d'entrée, seule l'occupation la plus importante au sein d'une cellule a été prise en compte. En conséquence, les petits objets, tels que des arbres isolés, ne sont pas considérés et leur effet est sous-estimé. Toutefois, ces effets restent très locaux et la lecture des résultats à l'échelle d'un quartier, d'une ville ou du canton en est peu affectée.

Concernant la modélisation des périodes futures, l'occupation des sols et la hauteur dans les secteurs de développement ont été définies de manière aléatoire. Cette occupation n'est pas réaliste, mais elle permet malgré tout de simuler un aménagement urbain dans ces secteurs. Pour étudier les effets d'un projet particulier, une simulation sur la base d'une implantation concrète devrait être réalisée.

De plus, certaines informations concernant les bâtiments sont lacunaires. Bien que l'on connaisse leur emprise au sol et leur hauteur, ce qui permet de les définir comme des cubes (niveau de détail LOD1[9]) faisant obstacle aux flux d'air, les informations sur le type de matériaux utilisés, l'albédo ou la part des façades occupée par des fenêtres ne sont pas connues. Dans le modèle, le taux d'émission de chaleur des bâtiments est uniquement représenté par le volume de construction. Toutefois cette approximation est acceptable, car le volume d'une construction est le facteur majeur influençant l'émission de chaleur, tandis que les autres éléments ne sont que des facteurs mineurs.

Des études de sensibilité (Gross 2012) indiquent que ces incertitudes, ainsi que les lacunes sur d'autres informations (telles que les caractéristiques des sols comme la conductivité thermique ou l'humidité du sol), peuvent entraîner localement une incertitude maximale de la température de l'air (à 2 m du sol) de 1.5 °C à 14h et de 1.1 °C la nuit, ce qui peut affecter localement le calcul de la vitesse de la brise thermique (Gross 2012).

Les développements rapides dans les domaines de la télédétection ou des jumeaux numériques laissent présager un potentiel d'amélioration des données de base nécessaires à FITNAH-3D. Meilleures sont les données de base, meilleurs seront les résultats. Il est conseillé de mettre à jour l'analyse climatique lorsque les données de base seront actualisées ou significativement améliorées.

[9] LOD1 pour « Level Of Detail » ou niveau de détail en français. Il s'agit d'une dénomination courante pour qualifier le niveau de détail d'un modèle 3D des bâtiments. Le niveau de détail 1 représente les bâtiments comme des « boîtes à chaussure », c'est-à-dire sous forme de cube avec une hauteur de toit unique.

3.2 MODÈLE DE SIMULATION (FITNAH-3D)

3.2.1 Contexte

Les phénomènes météorologiques pertinents pour cette analyse ont une extension spatiale de quelques mètres à plusieurs kilomètres et une durée de quelques minutes à quelques heures. Il s'agit de phénomènes de méso-échelle comme l'effet d'îlot de chaleur, les brises thermiques ou les brises de pente, et de micro-échelle comme l'influence des obstacles sur le vent et l'ombrage.

La distribution des variables météorologiques telles que le vent et la température peut être déterminée par des mesures, mais celles-ci ne sont représentatives qu'en certains points. Une extrapolation directe et sans modèle vers des zones voisines est rarement possible en raison de la grande variation spatiale et temporelle des conditions météorologiques. Par conséquent, il est difficile de faire une évaluation climatologique sur l'ensemble de la zone d'étude à partir d'un nombre limité d'observations, même si la structure générale et les causes physiques de ces phénomènes climatiques locaux sont essentiellement connues.

Le modèle méso-échelle FITNAH-3D a été conçu pour répondre aux questions de climatologie urbaine de manière plus complète que les campagnes de mesures. Il comble les écarts spatiaux et/ou temporels entre les mesures, calcule d'autres variables météorologiques et détermine les champs d'écoulement et de température pour toute la zone d'étude, en s'appuyant sur des équations de physique. En outre, FITNAH-3D permet de faire des simulations avec plusieurs variantes de planification urbaine, d'étudier leur effet et de trouver des solutions d'aménagement optimales d'un point de vue climatique.

À partir d'un programme prioritaire de la Fondation allemande pour la recherche (Deutsche Forschungsgemeinschaft), plusieurs modèles à micro et méso-échelle ont été conçus en Allemagne dès 1988. FITNAH-3D est développé depuis près de 30 ans par l'équipe du Prof. Günter Groß à l'institut de météorologie et climatologie de l'Université Leibniz d'Hanovre, en Allemagne. Plusieurs publications scientifiques et documents sur ce modèle sont référencés dans la bibliographie.

3.2.2 Fonctionnement de FITNAH-3D

FITNAH signifie « Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat sources », qui peut être traduit en Français par « Écoulement sur terrain irrégulier avec des sources de chaleur naturelles et anthropogéniques[10] ». Autrement dit, FITNAH-3D est un modèle météorologique tridimensionnel de méso-échelle permettant la simulation de champs de vent et de champs de température tout en prenant en compte la forme du terrain, aussi complexe soit-elle. Ainsi, en tout point de la zone modélisée sont produites une valeur de vent, de température et d'humidité. Les bâtiments et les arbres sont représentés dans le modèle comme des obstacles au courant et au transport de chaleur. La classe d'occupation des sols détermine les caractéristiques physiques du sol dans le calcul du bilan énergétique du sol.

Le cadre de base de FITNAH-3D est constitué des équations de conservation du mouvement des fluides (équations de Navier-Stokes), de la préservation de la masse (équation de continuité) et de la conservation de l'énergie (premier principe de la thermodynamique). FITNAH-3D est utilisé en mode « RANS » (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations), dans lequel les turbulences atmosphériques ne sont pas décrites explicitement, mais à l'aide d'équations simplificatrices.

3.2.3 Hypothèses

Les hypothèses suivantes ont été formulées pour les modélisations effectuées dans cette étude.

[10] Causé ou généré par l'être humain.

- Le scénario climatique choisi est le RCP8.5, car il s'agit de la trajectoire que nous suivons actuellement (voir partie *2.1.5*).
- Les conditions météorologiques sont supposées autochtones.
- Le jour de modélisation correspond au 21 juin, jour de rayonnement solaire maximal.
- Pour la situation diurne, il s'agit de la situation à 14h, ce qui correspond au moment de rayonnement solaire maximal.
- Pour la situation nocturne, il s'agit de la situation à 4h, ce qui correspond au moment de rafraîchissement maximal.

Chaque modélisation permet donc de simuler les variables climatiques à 14h et à 4h d'un jour typique de la période concernée, en conditions autochtones. Des situations nettement plus froides ou nettement plus chaudes peuvent toutefois se produire, dans la mesure où la simulation représente un jour moyen de la période considérée.

3.2.4 Température de départ

Pour démarrer une modélisation avec FITNAH-3D, la température initiale de l'air à 21h doit être indiquée. Cette température doit être déduite des données d'une station météorologique remplissant les critères suivants :

- la station est située dans le canton de Neuchâtel ou très proche de la frontière cantonale ;
- la station est située dans un environnement plutôt rural, ni montagnard, ni trop influencé par la ville, et sans eau de surface à proximité ;
- la station dispose de données de température pour la période 1981-2010.

Il n'y a aucune station MétéoSuisse (*Figure 20*) qui réponde parfaitement à ces critères dans le canton.

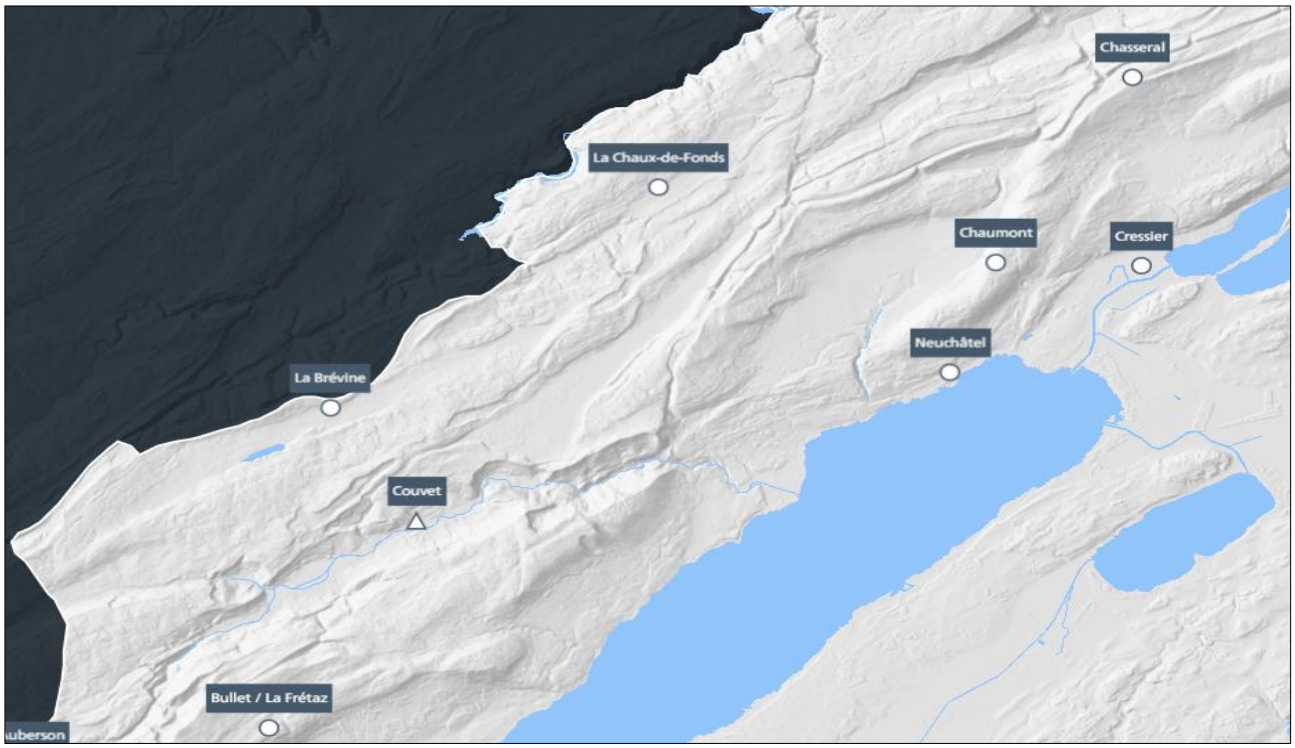


Figure 20 – Les stations de MétéoSuisse dans le canton de Neuchâtel (source MétéoSuisse)

Les stations de La Chaux-de-Fonds, La Brévine, Chaumont, Chasseral et Bullet/La Frétaz sont situées en montagne, la station de Neuchâtel est située en pleine ville et proche du Lac. La station de Cressier respecte les critères de l'emplacement, mais ne dispose de données que pour la période 1992-2010.

D'après les analyses de température effectuées pour les autres stations, la période 1980-1992 ne montre pas d'augmentation significative de température. Ainsi, les valeurs de températures de la station de Cressier, située à 430 m d'altitude, ont été utilisées pour calculer la température de départ de la période de référence (1981-2010). Pour cela, la température à 21h des jours d'été des mois de juin, juillet et août a été moyennée pour la période 1992-2010. Cela concerne en moyenne 36 jours par an, pour une valeur moyenne 19.9 °C.

Le choix de la station de Cressier est conforté par la cohérence de cette valeur avec les températures de départ utilisées dans les modélisations d'autres cantons :

- Canton de Berne, station de Zollikofen, altitude 554 m, 19°C
- Canton de Vaud, station de Nyon, altitude 460 m, 20.7 °C
- Canton de Lucerne, station de Lucerne, altitude 456 m, 20.1 °C

Pour la modélisation des périodes P1, P2 et P3, la température de départ a été adaptée. Elle correspond à la somme de la température de départ pour la période P0 et de l'augmentation de température supposée (*Tableau 9*), qui se réfère aux résultats des scénarios climatiques pour la Suisse (CH2018).

Période	Plage temporelle	Augmentation de température	Température de départ à 21 h
P0	1981-2010	-	19,9 °C
P1	2020-2049	+ 1,4 °C	21,3 °C
P2	2045-2074	+ 2,5 °C	22,4 °C
P3	2070-2099	+ 4.2 °C	24,2 °C

Tableau 9 – Température de départ de la modélisation pour chaque période

3.2.5 Vents synoptiques

Des vents synoptiques (vents à large échelle dépassant les limites du canton) peuvent influencer la simulation. Afin d'en tenir compte, une méthode de « nesting » a été utilisée. Elle consiste à reporter les informations relatives à l'écoulement d'air à grande échelle sur la zone d'étude, plus petite, du canton de Neuchâtel. La base de données utilisée est le champ d'écoulement issu de la modélisation climatique nationale de la Suisse, en conditions météorologiques autochtones et avec une résolution planimétrique de 100 m.

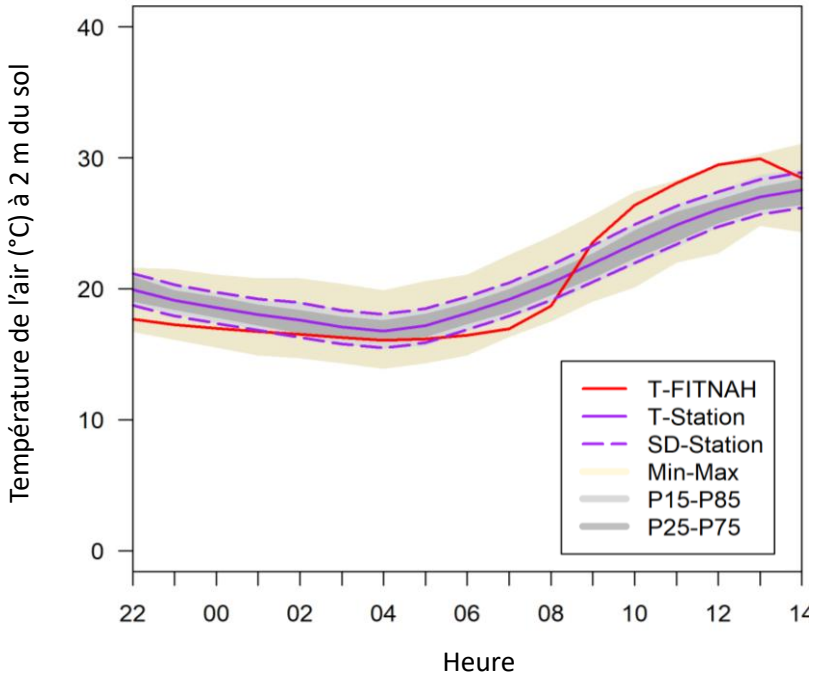
3.2.6 Validation du modèle

Pour valider le modèle, les variables résultantes de la modélisation de la période P0 ont été comparées aux mesures météorologiques. Deux jeux de données ont été utilisés : les données de la station MétéoSuisse de Neuchâtel et les données du réseau de stations de mesure de la température de l'air mis en place par l'Université de Neuchâtel.

Le premier jeu de données concerne un lieu unique (la station MétéoSuisse de Neuchâtel) qui a servi à valider la variation temporelle. Il est considéré que les bâtiments et les arbres situés à proximité immédiate de la station influencent la vitesse et la direction du vent, raison pour laquelle la comparaison se limite à la température de l'air. Les données de la station de mesures présentent une large amplitude de valeurs pour la température, tandis que les températures modélisées à 2 m du sol par FITNAH-3D couvrent une plage plus restreinte, typique d'une chaude journée d'été. Pour une comparaison fiable et équitable entre les mesures et les résultats de FITNAH-3D, les données de la station de mesure ont été filtrées de la façon suivante. Seules les journées et les nuits estivales autochtones dont la température minimale, la température maximale, la température moyenne et la température à 22 h ne dévient pas de plus de 4 °C des résultats de la modélisation

ont été retenues, permettant de maintenir un volume de données suffisant. Au total, 85 journées et 85 nuits ont été prises en compte sur la période 2010-2022 (période de disponibilité des données).

La comparaison entre la température de l'air modélisée par FITNAH-3D, pour une journée et une nuit d'été autochtones typiques à P0, et les mesures filtrées de la station est visible ci-dessous (*Figure 21*).



T-FITNAH = température prédite par FITNAH-3D

T-Station = moyenne des températures mesurées à la station

SD-Station = écart-type des températures mesurées à la station, variant entre 1.2 °C (à 0h00) et 1.5 °C (à 10h00)

Min-Max = valeurs minimale et maximale des températures mesurées à la station

P15-P85 = températures situées entre le 15e et le 85e percentile

P25-P75 = températures situées entre le 25e et le 75e percentile

Figure 21 – Comparaison de la température modélisée par FITNAH-3D avec les mesures de la station MétéoSuisse de Neuchâtel

On observe que la température modélisée (en rouge) se situe dans la fourchette des valeurs mesurées (minimum et maximum en beige). Aux horaires analysés dans cette étude, c'est-à-dire à 4h et à 14h, l'écart entre les températures modélisées et mesurées est particulièrement faible, avec une température modélisée proche de la température moyenne (courbe violette en trait plein). Pour les autres horaires, des écarts plus importants sont constatés. Le modèle simule des températures qui suivent une variation diurne typique en conditions autochtones, avec des températures relativement froides pendant la nuit et une augmentation forte durant la matinée. Les températures mesurées ne suivent pas complètement cette variation, avec une augmentation matinale de la température qui démarre plus tôt et est atténuée. Ceci est probablement dû à des caractéristiques ponctuelles du terrain et du sol qui influencent très localement le climat, mais ne peuvent être représentées que de façon approximative dans un raster à 10 m.

Le second jeu de données concerne plusieurs stations réparties dans la ville de Neuchâtel et ses environs, et permet de valider la variation spatiale de la température. Cette seconde comparaison confronte la température nocturne (4h) à P0 modélisée par FITNAH-3D et les données de température du 19 juin 2019 à 4h (nuit autochtone). Cette date a été choisie car de nombreuses stations disposent de mesure ce jour-là (41 stations, *Figure 22*), et que cette date est proche du jour modélisé par FITNAH-3D (le 21 juin, jour d'ensoleillement maximal). Pour 29 des 41 stations, l'écart de température est inférieur à 1 °C et pour 6 stations, l'écart se situe entre 1 et 2 °C. Pour 7 stations, l'écart est supérieur à 2 °C. Ce résultat indique que la variation spatiale est assez bien représentée par le modèle. Les écarts importants sont possiblement une conséquence des caractéristiques ponctuelles du terrain et du sol qui ne peuvent être représentées dans la résolution utilisée pour la modélisation (10 m) que de façon approximative.

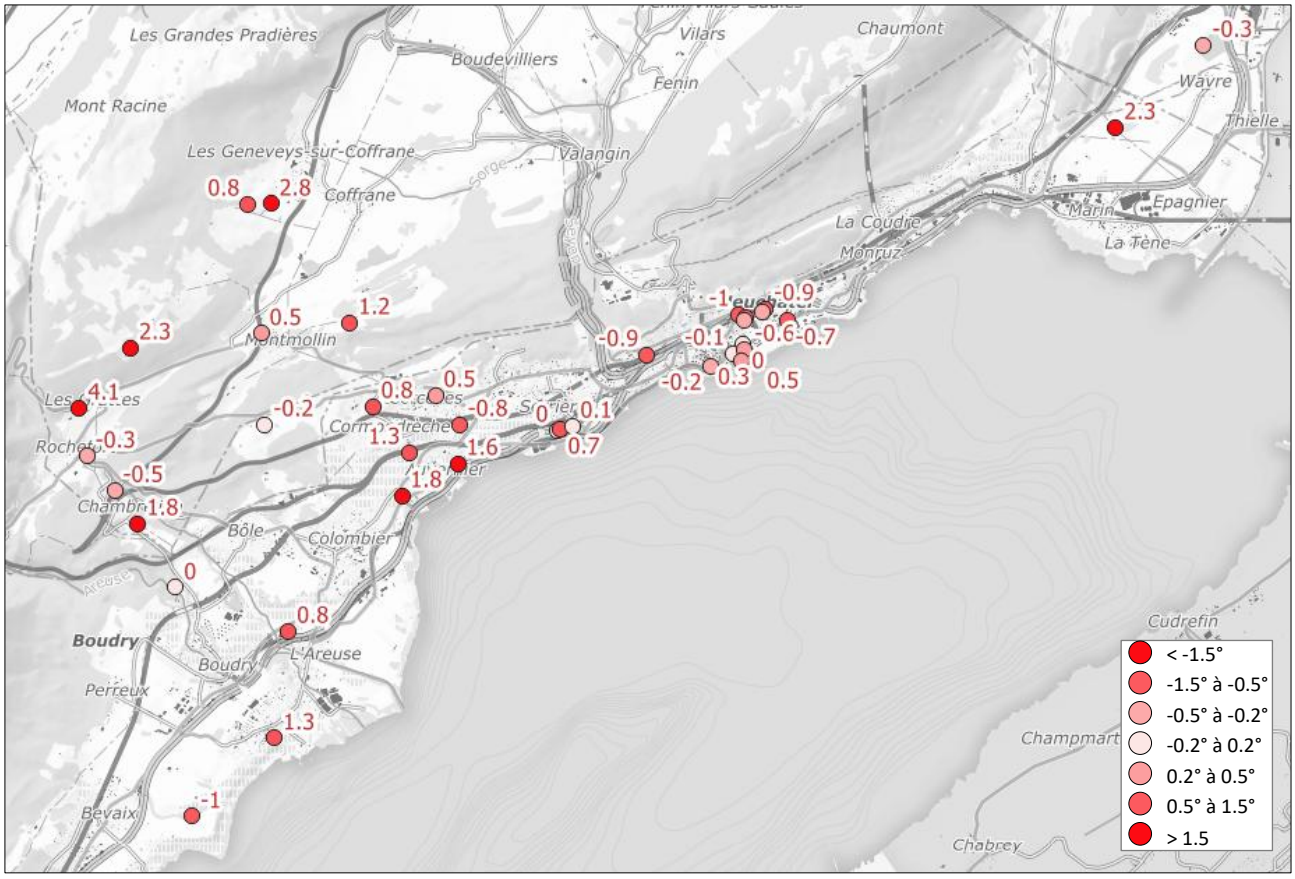


Figure 22 – Comparaison de la température nocturne (4h) modélisée par FITNAH-3D avec les valeurs à 4h du 19 juin 2019 de 41 stations

3.2.7 Limites du modèle

Les modèles sont, par définition, des représentations incomplètes de la réalité. Ils n'ont pas la prétention de représenter le système à modéliser de manière exhaustive, mais de manière suffisamment bonne. La qualité d'un modèle doit être évaluée dans le domaine d'utilisation pour lequel il a été conçu. Ceci s'applique particulièrement pour les modèles du climat (urbain) à cause de la complexité de l'atmosphère (urbaine) décrite par des équations physiques.

En conséquence, pour la présente étude, FITNAH-3D n'a pas l'ambition de représenter tous les processus physiques atmosphériques dans les moindres détails, mais uniquement ceux nécessaires à la compréhension du climat urbain estival en conditions autochtones. Le modèle remplit les standards de modélisation des champs d'écoulement définis dans la directive VDI (association des ingénieurs en Allemagne) 3787 (fiche 7).

La modélisation numérique, ainsi que les autres méthodes d'analyse environnementale et climatologique contiennent des incertitudes. Toutefois, ces incertitudes n'ont d'influence que sporadiquement et localement, et sont par conséquent négligeables par rapport aux principaux résultats de la présente analyse.

3.3 PRODUITS

3.3.1 Variables issues de FITNAH-3D

À chaque modélisation, 3 variables sont calculées sous la forme d'un raster à 10 m. Les valeurs de ces variables sont valables pour une hauteur de 2 m au-dessus du sol, raison pour laquelle il n'y a pas de valeur sur les bâtiments. Ces 3 variables sont :

- la température de l'air [°C] à 14h ;
- la température de l'air [°C] à 4h ;
- la vitesse du vent [m/s] et sa direction à 4h.

Les résultats de la température à 4h tiennent compte de l'effet rafraîchissant des courants d'air froid.

Ces 3 variables ont été modélisées pour P0, P1, P2 et P3.

3.3.2 Variables calculées

3.3.2.1 TEMPÉRATURE PHYSIOLOGIQUE ÉQUIVALENTE

La température physiologique équivalente (voir partie *2.4.1*) est calculée à 1.1 m au-dessus du sol, à partir des éléments suivants : température de l'air, bilan de radiation, vitesse du vent, humidité de l'air, paramètres physiologiques humains, taux métabolique humain et vêtements.

La procédure de calcul de la PET (présenté en détail dans VDI directive 3787, fiche 2 ; 2022) consiste d'abord à calculer la température moyenne de la peau et la température corporelle d'un humain « standard » à l'aide du modèle MEMI (*Munich Energy-balance Model for Individuals*), pour une combinaison donnée de paramètres météorologiques. Ensuite, ces valeurs sont utilisées pour résoudre un système d'équations (Höppe 1999) permettant d'aboutir à la PET.

Cette variable a été calculée pour P0, P1, P2 et P3.

3.3.2.2 EFFET D'ÎLOT DE CHALEUR

L'effet d'îlot de chaleur a été calculé la nuit, à partir des données de température nocturne issues de FITNAH-3D. Pour chaque cellule raster située en zone urbaine, il s'agit de la différence entre la température de l'air de la cellule considérée et la température moyenne de l'air des espaces verts et ouverts situés dans la même tranche d'altitude. Le résultat obtenu est une différence de température, exprimée en °C. Plusieurs tranches d'altitude ont été définies dans le canton pour prendre en compte la diminution de la température de l'air avec l'altitude (*Tableau 10*). Cette variable a été calculée pour P0 et P1.

Température moyenne des espaces verts et ouverts		
Altitude	**P0**	**P1**
<= 700 m	14.6 °C	15.9 °C
700 m à 900 m	12.4 °C	13.9 °C
900 m à 1200 m	10.6 °C	12.1 °C
> 1200 m	9.3 °C	10.7 °C

Tableau 10 – Température moyenne de l'air à 4h des espaces verts et ouverts, par tranche d'altitude

3.3.2.3 DENSITÉ DU DÉBIT D'AIR FROID

La densité du débit d'air froid est le produit de la vitesse d'écoulement de l'air froid, sa dimension verticale (épaisseur de la couche) et la dimension horizontale de la section traversée (largeur du débit).

Cette variable a été calculée pour P0, P1, P2 et P3.

3.3.2.4 TAUX DE PRODUCTION D'AIR FROID

Le taux de production d'air froid est la quantité d'air froid, en m³, qui est générée sur une surface de 1 m² en l'espace d'une heure. Le vent est intégré au calcul jusqu'à une hauteur de 50 m.

Cette variable a été calculée pour P0, P1, P2 et P3.

3.3.3 Échanges d'air froid nocturnes

La nuit, l'air est rafraîchi dans les zones dites de « production d'air froid », il se déplace ensuite vers la zone urbaine via les « trajectoires d'air froid ». Les zones urbaines qui en bénéficient particulièrement sont les « zones d'impact d'air froid ». Ces différentes zones ont été définies pour P0 et P1.

3.3.3.1.1 ZONES DE PRODUCTION D'AIR FROID

Les zones de production d'air froid sont des espaces verts ou ouverts où l'air se rafraîchit de manière significative durant la nuit.

Les forêts sont considérées comme zones de production d'air froid si leur taux de production est supérieur à la moyenne cantonale des forêts. Les autres espaces verts ou ouverts sont considérés comme tels si leur taux de production d'air froid est supérieur à la moyenne cantonale de ces mêmes espaces, à laquelle sont ajoutés 25 % de l'écart-type [11].

Les valeurs moyennes du taux de production d'air froid ont été calculées pour P0 et P1 (*Tableau 11*).

Taux de production d'air froid	P0	P1
Forêts	30.9 m³/(m²·h)	30.5 m³/(m²·h)
Autres espaces verts	41.0 m³/(m²·h)	40.5 m³/(m²·h)

Tableau 11 – Taux de production d'air froid moyen des espaces verts

3.3.3.1.2 TRAJECTOIRES D'AIR FROID

Les trajectoires d'air froid identifiées dans cette étude sont les couloirs d'air froid (voir partie *2.3.3.1*), les zones d'écoulement d'air froid (voir partie *2.3.3.2*) et les brises de parc (voir partie *2.3.2.1.1*).

Leur identification a été effectuée visuellement sur la base de la densité du débit d'air froid, du champ de vent ainsi que des classes d'occupation des sols et du MNT.

La délimitation entre couloir d'air froid et écoulement d'air froid n'est pas toujours évidente, il arrive que ces zones se chevauchent.

3.3.3.1.3 ZONES D'IMPACT D'AIR FROID

Les zones d'impact d'air froid sont les zones urbaines qui bénéficient d'un flux d'air froid près du sol provenant des zones de production d'air froid et qui abaisse leur température.

[11] Cet ajout de 25% de l'écart-type est issu d'une décision empirique de GEO-NET, sur la base d'un examen visuel de la distribution spatiale du taux de production d'air froid.

Pour être définie comme une zone d'impact d'air froid, une zone urbaine doit remplir les trois critères suivants :

- être supérieure à 500 m² ;
- présenter un débit d'air froid supérieur ou égal au débit d'air froid moyen des espaces urbains ;
- présenter une vitesse de vent supérieure ou égale à la moyenne de la vitesse du vent des zones urbaines.

Le débit d'air froid moyen et la vitesse moyenne du vent dans les espaces urbains ont été calculés pour P0 et P1 (*Tableau 12*).

	P0	**P1**
Débit d'air froid moyen des espaces urbains	39.6 m³/(m·s)	39.7 m³/(m·s)
Vitesse du vent moyenne des espaces urbains	0.60 m/s	0.59 m/s

Tableau 12 – Débit d'air froid moyen et vitesse moyenne du vent dans les espaces urbains

3.3.4 Cartes d'évaluation bioclimatique

3.3.4.1 NOTIONS PRÉALABLES

Le bioclimat désigne l'ensemble des influences directes et indirectes des conditions météorologiques et du climat sur les organismes vivants.

Les espaces d'action sont les espaces bâtis (catégories « habitat » et « autre activité humaine » de la couche d'utilisation du sol) ainsi que les espaces de transport (catégorie « transport (hors rail) » de la couche d'utilisation du sol). Il s'agit des lieux où les humains vivent, travaillent et ont la majorité de leurs activités. Ce sont également les espaces qui présentent en général une charge thermique élevée et donc où la question du bioclimat se pose particulièrement.

Les espaces de compensation sont les espaces verts ou ouverts (catégories « forêt », « surface verte » et « surface sans végétation » de la couche d'utilisation du sol). Il s'agit des espaces susceptibles de compenser la surchauffe des espaces d'action, soit en offrant un lieu de refuge (durant la journée), soit en les approvisionnant en air froid (durant la nuit). Les terrains de sport et les autres espaces ouverts ou végétalisés sont considérés comme des espaces de compensation.

3.3.4.2 OBJECTIF

Les cartes d'évaluation bioclimatique visent à produire une classification des résultats de la modélisation qui convienne bien aux besoins des décideurs et à la planification urbaine en proposant une représentation plus simple des résultats. À condition de les croiser avec d'autres données, ces cartes doivent pouvoir participer au processus d'identification des espaces d'action dans lesquels des mesures d'aménagement du territoire et de protection de la population devraient être prises en priorité, ainsi que les espaces de compensation à préserver particulièrement, en prévision des développements urbains futurs.

Pour cela, une évaluation des espaces d'action et des espaces de compensation a été réalisée, de jour et de nuit distinctement, pour les périodes P0 et P1.

3.3.4.3 ÉVALUATION

L'évaluation consiste, d'une part, à qualifier la situation bioclimatique relative des espaces d'action, de « largement meilleure [que la moyenne cantonale] » à « largement moins bonne [que la moyenne cantonale] ». Il s'agit d'une évaluation relative, à l'échelle du canton, du bioclimat local. Ainsi, une situation « largement moins bonne que la moyenne cantonale » ne signifie pas que la situation est critique, et de la

même façon, une situation « largement meilleure que la moyenne cantonale » ne signifie pas que la situation est agréable.

- La journée, l'évaluation est basée sur les valeurs normalisées de la PET à 14h et se rapporte donc aux conditions de séjour d'un être humain à l'extérieur.
- La nuit, l'évaluation est basée sur les valeurs normalisées de la température à 4h et se rapporte donc aux conditions de sommeil d'un être humain.

Dans les deux cas, l'évaluation a été réalisée séparément pour les espaces bâtis et les espaces de transport car la vitesse de déplacement des humains y est supposée différente (séjour stationnaire dans les espaces bâtis, mobile dans les espaces de transport).

L'évaluation consiste, d'autre part, à qualifier l'importance bioclimatique des espaces de compensation, sur une échelle absolue, de « très grande » à « nulle ». Il s'agit de mesurer l'importance des espaces verts et ouverts en tant qu'espaces capables de compenser la charge thermique des espaces d'action. Il est important de préciser que les espaces verts ne sont jamais d'importance nulle du point de vue climatique en général : la notation se rapporte ici uniquement à la capacité de l'espace vert à compenser la charge thermique des espaces d'action.

- La journée, l'évaluation d'un espace de compensation est basée sur trois éléments : la situation bioclimatique relative de l'espace considéré (A), la situation bioclimatique relative des espaces d'action situés à proximité (B), et la distance entre (A) et (B). Il s'agit de mesurer la capacité des espaces de compensation à constituer des lieux de refuge pour la population (lieux frais et rapidement accessibles à pied depuis l'espace d'action) lors des fortes chaleurs.
- La nuit, l'évaluation d'un espace de compensation est basée sur sa à générer ou transporter l'air froid permettant de rafraîchir l'espace d'action.

Les voies ferrées et les étendues d'eau sont restées non évaluées tant de jour que de nuit car ces espaces ne sont considérés ni comme espaces d'action, ni comme espaces de compensation étant donné que les humains n'y séjournent généralement pas.

Ces éléments sont résumés dans le tableau ci-dessous (*Tableau 13*).

Espace	**Évaluation**		**Critères / variables utilisés pour l'évaluation**
Action	Situation bioclimatique relative	Jour	PET à 14h normalisée
		Nuit	Température à 4h normalisée
Compensation	Importance bioclimatique	Jour	Situation bioclimatique relative de l'espace considéré (sur la base de la PET à 14h normalisée) Situation bioclimatique relative des espaces d'action à proximité Distance entre eux
		Nuit	Production d'air froid, transport d'air froid, proximité avec les espaces d'action

Tableau 13 – Variables et critères utilisés pour l'évaluation bioclimatique

L'évaluation a été réalisée conformément aux directives VDI 3785, fiche 1 et 3787, fiche 1 (VDI 2008a, VDI 2014), à partir de la couche d'utilisation du sol (voir partie ***Erreur ! Source du renvoi introuvable.***).

Préalablement, les valeurs de plusieurs variables (rasters à 10 m de la PET à 14h, la température à 14h, la température à 4h, la vitesse du vent à 4h, le débit d'air froid à 4h et le taux de production d'air froid à 4h) ont été moyennées au sein de chaque polygone de la couche d'utilisation du sol, pour P0 et P1 respectivement.

Un exemple du processus d'établissement de la carte d'évaluation bioclimatique est disponible ci-dessous (*Tableau 14*), pour les espaces d'action à P0, situation diurne.

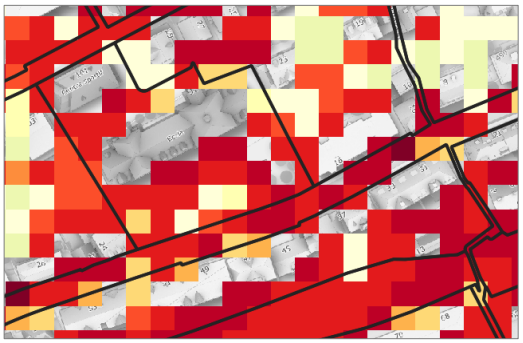
1		Couche d'utilisation du sol à P0, colorisée selon les catégories d'utilisation Habitat Autre activité humaine Transport hors rail Voies ferrées
2		Superposition de la couche d'utilisation du sol à P0 et du raster de la PET à P0 43° à 45° / 41° à 43° / 39° à 41° / 37° à 39° / 35° à 37° 33° à 35° / 31° à 33° / 29° à 31° / 27° à 29° / 25° à 27° Polygones de la couche d'utilisation du sol
3		Dans chaque polygone de la couche d'utilisation du sol, les valeurs du raster sont moyennées Polygones de la couche d'utilisation du sol 35.1 Valeur moyenne de la PET à 14h (à P0)
4		À chaque valeur moyenne de PET correspond une valeur de PET normalisée (voir *3.3.4.4*) Polygones de la couche d'utilisation du sol 0.2 Valeur normalisée de la PET moyenne à 14h (à P0)
5		À chaque valeur de PET normalisée correspond un niveau d'évaluation (voir *Tableau 16*) ainsi que, dans le cas de l'évaluation bioclimatique des espaces d'action, une situation bioclimatique relative (voir *Tableau 17*). Largement meilleure que la moyenne Meilleure que la moyenne Dans la moyenne Moins bonne que la moyenne Largement moins bonne que la moyenne

Tableau 14 – Processus d'établissement de la carte d'évaluation bioclimatique, exemple avec la PET à 14h

3.3.4.4 NORMALISATION DES PARAMÈTRES

Certaines variables climatiques utilisées ont été normalisées en utilisant le score Z. Mathématiquement, cela signifie que, pour une variable donnée (p. ex. la température), la moyenne arithmétique de la distribution initiale est soustraite de la variable, puis le résultat est divisé par son écart-type. La distribution résultante de la variable a une moyenne arithmétique de 0 et un écart-type (+- S1) de 1 (*Figure 23*).

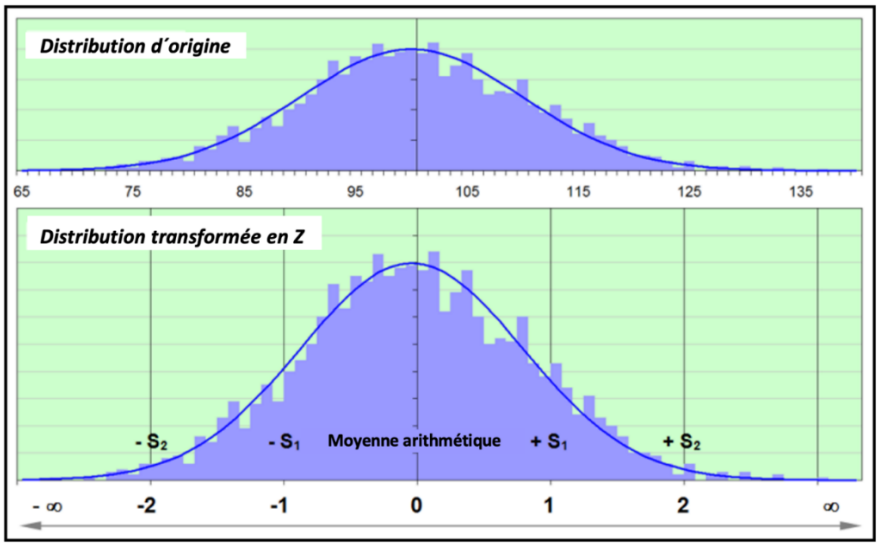


Figure 23 – Normalisation de la distribution d'une variable par le score Z

Ainsi, 5 normalisations ont été effectuées :

- Score Z de la température physiologique équivalente à 14h des espaces bâtis,
- Score Z de la température physiologique équivalente à 14h des espaces de transport,
- Score Z de la température réelle de l'air à 4h des espaces bâtis,
- Score Z de la température réelle de l'air à 4h des espaces de transport,
- Score Z de la température physiologique équivalente à 14h des espaces de compensation.

La moyenne et l'écart-type, utilisés pour la normalisation, ont été calculés à partir de l'ensemble des données issues de P0 et P1. La distribution résultante est donc un mix des deux distributions initiales.

La normalisation elle-même (soustraction de la moyenne et division par l'écart-type) a ensuite été effectuée pour chaque période. Pour la période P0, l'évaluation est plutôt optimiste car la moyenne calculée, biaisée par les valeurs élevées de P1, entraîne une sous-estimation des valeurs de P0. Pour la période P1, l'évaluation est plutôt pessimiste car la moyenne calculée, biaisée par les valeurs moins élevées de P0, entraîne une surestimation des valeurs de P1.

L'avantage de cette méthode est de pouvoir comparer les résultats des deux périodes, car les espaces bâtis de chaque niveau d'évaluation, par exemple « largement moins bonne que la moyenne », ont exactement la même plage de valeurs à P0 et P1.

En revanche, des comparaisons intercantonales de ces cartes ne sont pas valables car les niveaux d'évaluation ne correspondent pas aux mêmes valeurs de PET et de température d'un canton à l'autre.

La distribution originale et le score Z pour chaque normalisation est disponible ci-dessous (*Figure 24*).

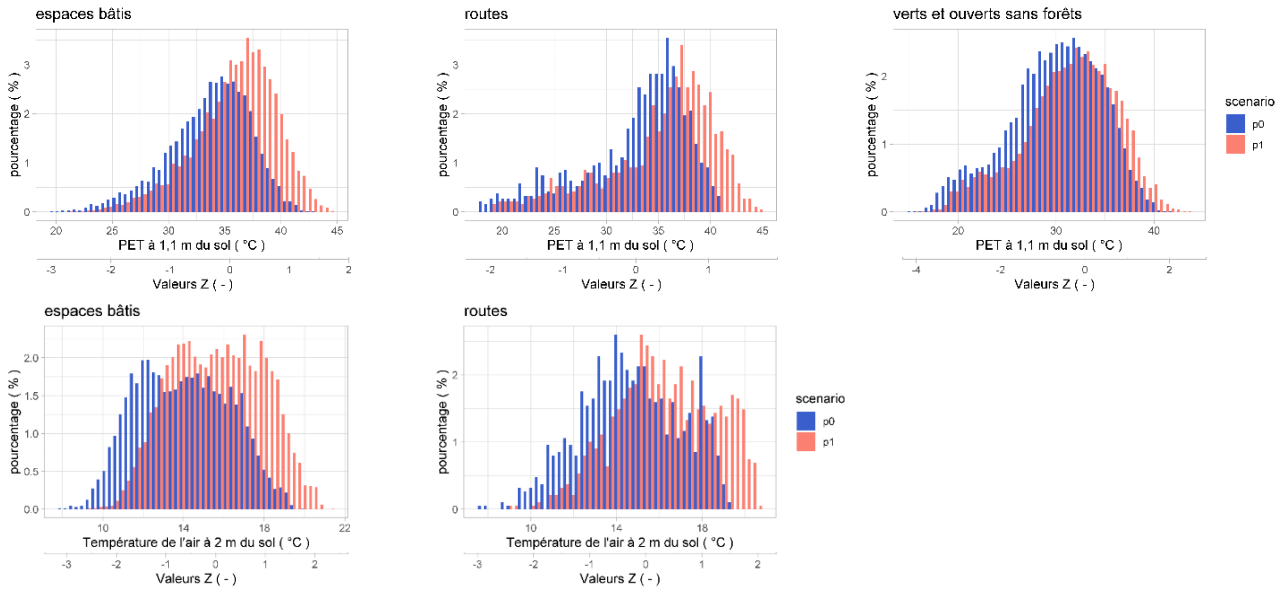


Figure 24 – Distributions originales et scores Z de chaque normalisation effectuée

Sur la base du score Z, 5 niveaux d'évaluation ont été définis (*Tableau 15*). Les valeurs limites de chaque classe ont été choisies de telle sorte que toutes les classes soient représentées à P0 et P1.

Situation	Type d'espace	Variable	Unité	Moyenne (μ) Écart-type (σ)	Valeurs réelles	Score Z	Niveau d'évaluation
Diurne	Bâti	*PET à 14h*	*[°C]*	μ = 35.4 σ = 5.3	[min ; 31.3]]31.3 ; 33.8]]33.8 ; 36.5]]36.5 ; 39.1]]39.1 ; max]	[min ; -0.8]]-0.8 ; -0.3]]-0.3 ; 0.2]]0.2 ; 0.7]]0.7 ; max]	1 2 3 4 5
Diurne	Transport	*PET à 14h*	*[°C]*	μ = 32.4 σ = 7.0	[min ; 26.9]]26.9 ; 30.3]]30.3 ; 33.8]]33.8 ; 37.7]]37.7 ; max]	[min ; -0.8]]-0.8 ; -0.3]]-0.3 ; 0.2]]0.2 ; 0.7]]0.7 ; max]	1 2 3 4 5
Nocturne	Bâti	*Température de l'air à 4h*	*[°C]*	μ = 15.5 σ = 2.5	[min ; 11.8]]11.8 ; 14.5]]14.5 ; 16.5]]16.5 ; 18.0]]18.0 ; max]	[min ; -1.5]]-1.5; -0.4]]-0,4 ; 0.4]]0.4 ; 1]]1 ; max]	1 2 3 4 5
Nocturne	Transport	*Température de l'air à 4h*	*[°C]*	μ = 15.2 σ = 2.6	[min ; 11.3]]11.3 ; 14.2]]14.2 ; 16.2]]16.2 ; 17.8]]17.8 ; max]	[min ; -1.5]]-1.5; -0.4]]-0.4 ; 0.4]]0.4 ; 1.0]]1.0 ; max]	1 2 3 4 5
Diurne	Compensation	*PET à 14h*	*[°C]*	μ = 32.3 σ = 4.4	[min ; 31.2]]31.2 ; 33.8]]33.8 ; 36.5]]36.5 ; 39.1]]39.1 ; max]	[min ; -0.8]]-0.8; -0.3]]-0.3 ; 0.2]]0.2 ; 0.7]]0.7 ; max]	1 2 3 4 5

Tableau 15 – Niveaux d'évaluation de la situation bioclimatique relative selon la situation et le type d'espace

3.3.4.5 SITUATION BIOCLIMATIQUE RELATIVE : ÉCHELLE D'ÉVALUATION

L'échelle d'évaluation de la situation bioclimatique relative des espaces d'action est présentée ci-dessous (*Tableau 16*). Dans ce tableau, « la moyenne » correspond à la moyenne cantonale des espaces considérés, c'est-à-dire la moyenne cantonale des espaces bâtis et la moyenne cantonale des espaces de transport, respectivement.

Niveau d'évaluation	Situation bioclimatique relative	Code couleur
1	Largement meilleure que la moyenne	
2	Meilleure que la moyenne	
3	Dans la moyenne	
4	Moins bonne que la moyenne	
5	Largement moins bonne que la moyenne	

Tableau 16 – Échelle d'évaluation de la situation bioclimatique relative des espaces d'action

3.3.4.6 IMPORTANCE BIOCLIMATIQUE : ÉCHELLE D'ÉVALUATION

L'échelle d'évaluation de l'importance bioclimatique des espaces de compensation est présentée ci-dessous (*Tableau 17*).

Importance bioclimatique	Code couleur
Très grande	
Grande	
Moyenne	
Faible	
Nulle	

Tableau 17 – Échelle d'évaluation de l'importance bioclimatique des espaces de compensation

3.3.4.7 IMPORTANCE BIOCLIMATIQUE DIURNE

L'évaluation diurne des espaces de compensation a été réalisée séparément pour les forêts et les autres types d'espaces de compensation. En effet, les forêts offrent un espace ombragé privilégié qui leur confère une importance qui ne peut être inférieure à « moyenne ». La qualité de séjour en forêt est relativement élevée pendant la journée, mais certaines sont difficilement accessibles depuis l'espace bâti et ne servent donc de lieu de refuge que de manière limitée. La distance entre la forêt et l'espace d'action est considérée dans l'évaluation, ainsi que la situation bioclimatique relative de l'espace bâti le plus proche.

Les critères d'évaluation des forêts, en fonction de la situation de l'espace bâti situé à proximité et de son éloignement, sont les suivants (*Tableau 18*).

Distance[12]	Situation bioclimatique relative de l'espace bâti	Importance bioclimatique de la forêt
< 300 m		Très grande
< 300 m		Grande
< 700 m		Très grande
< 700 m		Moyenne
> 700 m		Moyenne

Tableau 18 – Critères d'évaluation de l'importance bioclimatique diurne des forêts

L'évaluation des autres espaces de compensation (espaces verts non forestiers et espaces ouverts) repose sur 3 critères (*Tableau 19*) :

- la situation bioclimatique relative de l'espace de compensation considéré, dont l'évaluation a été faite sur la base du score Z de la PET à 14h ;
- la proximité entre l'espace de compensation et l'espace d'action ;
- la situation bioclimatique relative de l'espace d'action situé à proximité.

Importance bioclimatique des espaces verts non forestiers						
Distance[13]	Situation bioclimatique relative de l'espace bâti	Situation bioclimatique relative de l'espace de compensation				
< 300 m		Très grande	Très grande	Grande	Faible	Nulle
< 700 m		Très grande	Grande	Moyenne	Faible	Nulle
< 300 m						
< 700 m		Grande	Moyenne	Faible	Faible	Nulle
< 300 m						
< 700 m		Moyenne	Moyenne	Faible	Nulle	Nulle
> 700 m						

Tableau 19 – Évaluation de l'importance bioclimatique diurne des espaces verts et ouverts

Les critères de distance (300 et 700 m à vol d'oiseau) sont issus d'une étude de l'institut fédéral allemand de la recherche sur la construction, le développement urbain et l'aménagement du territoire (Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR 2018)). Lorsque la distance est inférieure à 300 m à vol d'oiseau, l'accessibilité est considérée comme « très bonne » ; quand la distance est entre 300 et 700 m à vol d'oiseau, l'accessibilité est

[12] Distance entre l'espace de compensation considéré et l'espace bâti le plus proche, à vol d'oiseau.

[13] Distance entre l'espace de compensation considéré et l'espace bâti le plus proche, à vol d'oiseau.

considérée comme « bonne ». Le temps réellement nécessaire pour parcourir la distance, qui est influencé par plusieurs facteurs tels que le tracé des chemins d'accès, les éventuels feux de circulation ou passages à niveau ou le dénivelé, n'est pas pris en compte.

Les espaces de compensation publics et privés ne sont pas différenciés.

3.3.4.8 IMPORTANCE BIOCLIMATIQUE NOCTURNE

L'évaluation de l'importance bioclimatique des espaces de compensation durant la nuit a été réalisée selon l'arbre de décision présenté ci-dessous (*Figure 25*).

Les zones de transport d'air froid sont les couloirs d'air froid, zones d'écoulement d'air froid et brises de parc (voir partie *2.3.2*).

Le critère d'adjacence à une zone de transport d'air froid est une distance inférieure à 15 m à vol d'oiseau.

Les critères d'adjacence à un espace bâti sont : une distance à vol d'oiseau inférieure à 15 m et un espace bâti d'une surface de plus de 25'000 m² (soit un groupe de plus de 250 pixels).

Les valeurs moyennes du débit d'air froid et de la vitesse du vent sont les suivantes (*Tableau 20*).

	P0	**P1**
Débit moyen d'air froid dans les espaces de compensation	31.1 $m^3/(s \cdot m)$	32.7 $m^3/(s \cdot m)$
Vitesse moyenne du vent dans les espaces de compensation	0.68 m/s	0.72 m/s

Tableau 20 – Débit d'air froid moyen et vitesse du vent moyenne des espaces verts ou ouverts à P0 et P1

Le critère de taille (≥ 1 ha) fait référence à la superficie de l'ensemble du réseau d'espaces verts[14] et non de l'espace vert lui-même. À compter d'une superficie d'environ 1 ha, il est présumé qu'un espace vert ou ouvert a un effet bénéfique sur le climat (BBSR 2018).

Les zones de production d'air froid ne sont jamais d'importance nulle. Un espace de compensation est considéré comme faisant partie d'une zone de production d'air froid si au moins un tiers de cette surface est définie comme zone de production d'air froid.

[14] Un réseau d'espaces verts est constitué de plusieurs espaces verts jointifs. Il est limité par la présence d'une autre occupation des sols, par exemple les eaux de surface ou un espace d'action.

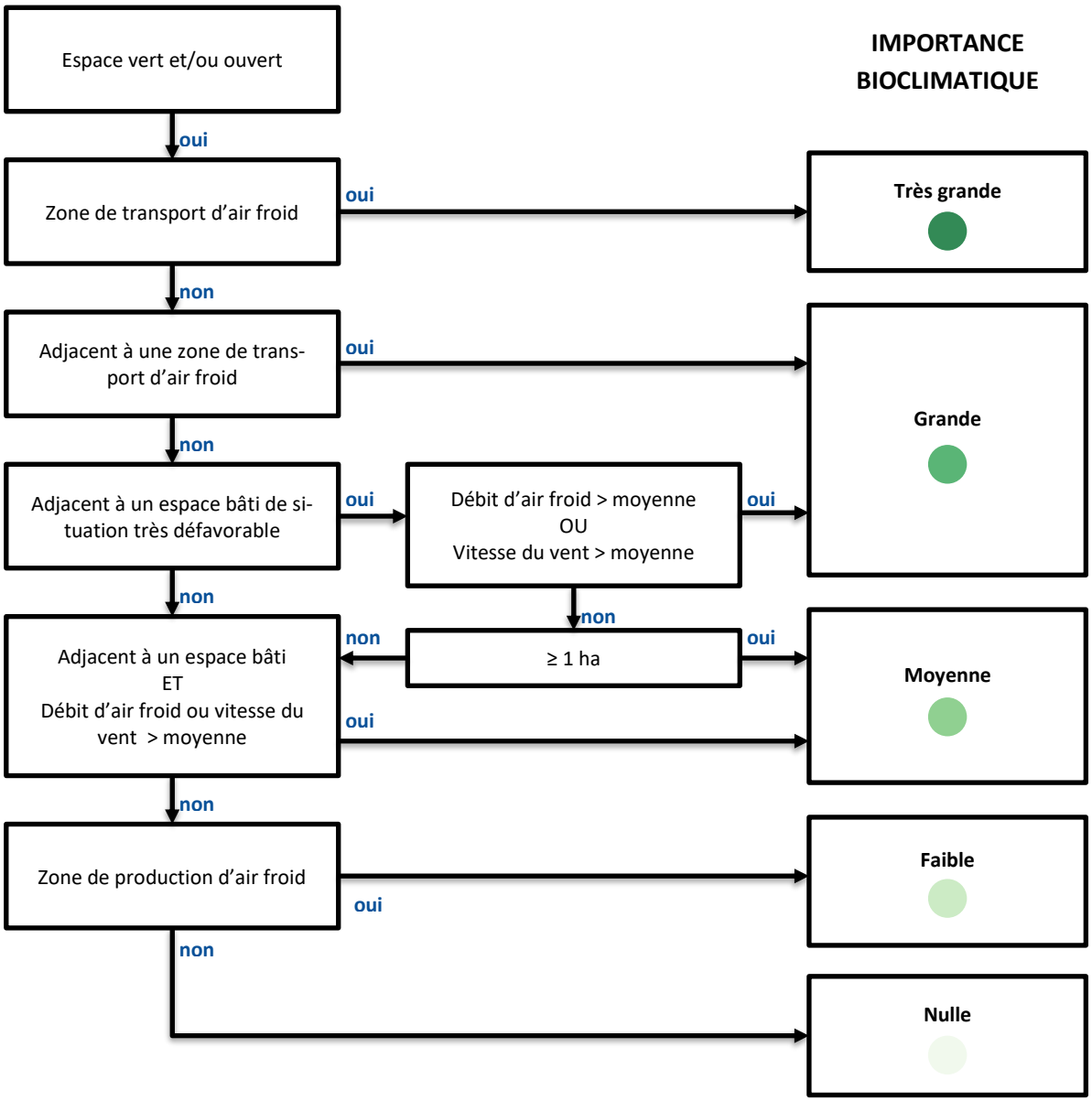


Figure 25 – Arbre de décision utilisé pour l'évaluation de l'importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation

4 Résultats

Les liens d'accès aux données sont à la partie *1.3*.

4.1 SITUATION DIURNE

4.1.1 Température physiologique équivalente

Rappel : la température physiologique équivalente (PET) est un indice qui permet d'évaluer le stress thermique subi par l'organisme durant la journée. Elle a été calculée à 14h, heure de rayonnement solaire maximal et de stress thermique maximal en conditions météorologiques autochtones. La PET à 14h correspond donc à la température ressentie au pic de rayonnement d'une journée d'été autochtone moyenne de la période considérée, ce qui se produit environ 30 % du temps durant les mois de juin, juillet et août.

4.1.1.1 ÉTAT DES LIEUX À P0

Ci-dessous sont présentées la carte cantonale de la température physiologique équivalente (PET) à P0 (*Figure 26*) ainsi qu'un extrait pour la ville du Locle (*Figure 27*) et la ville de Neuchâtel (*Figure 28*).

Avec cette vue d'ensemble, on observe que les valeurs sont très différentes d'un endroit à l'autre du canton et s'étendent sur une plage de valeur d'une trentaine de degrés.

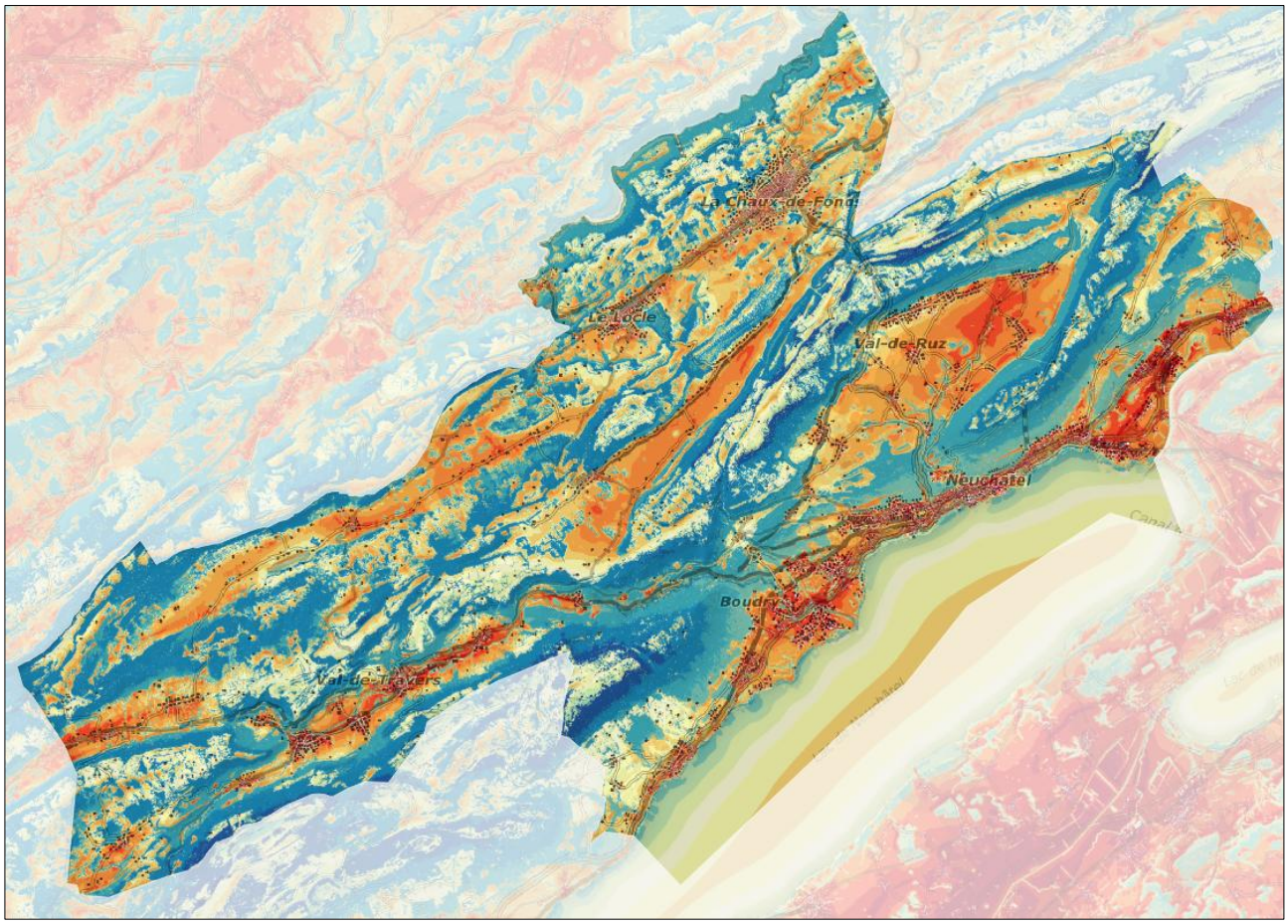


Figure 26 – Température physiologique équivalente, période P0

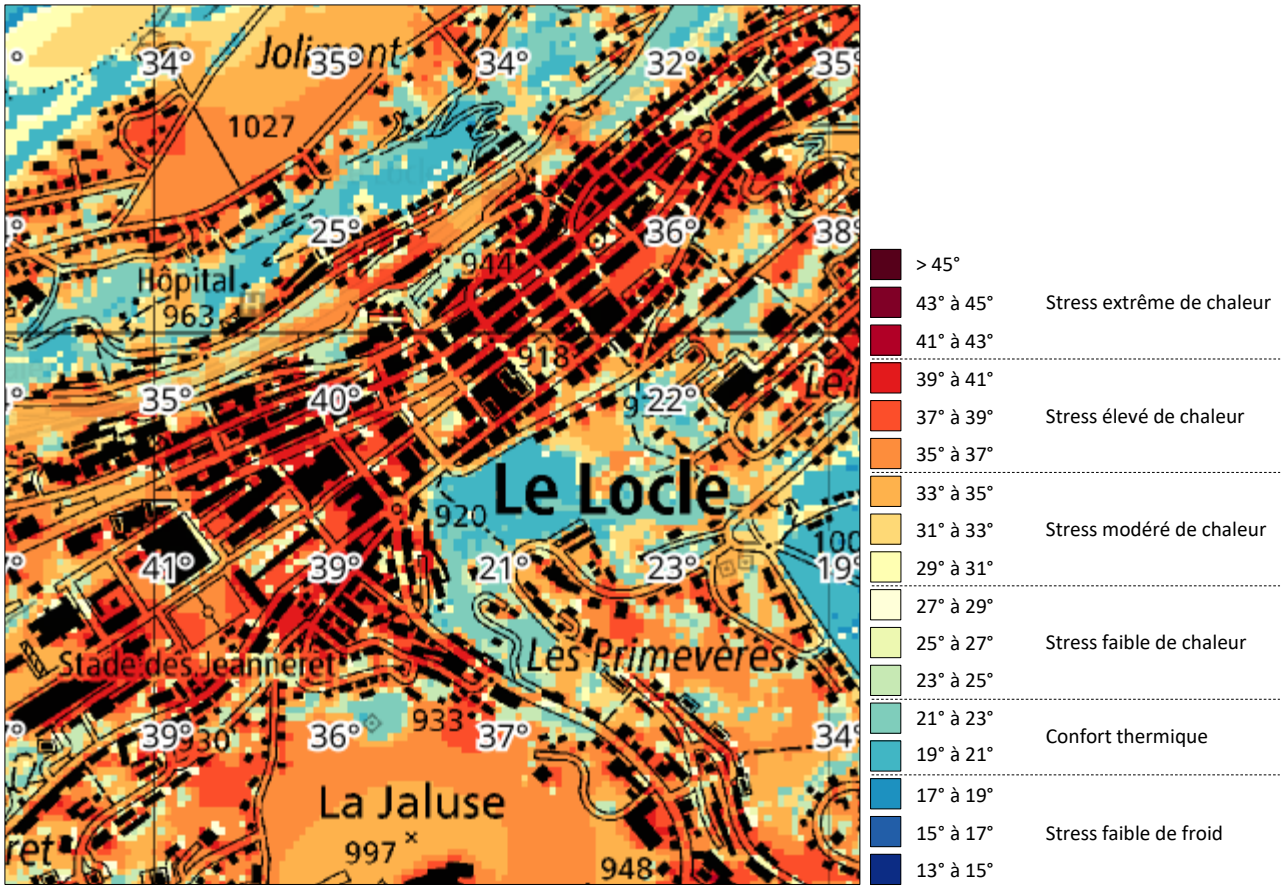


Figure 27 – Température physiologique équivalente au Locle, période P0

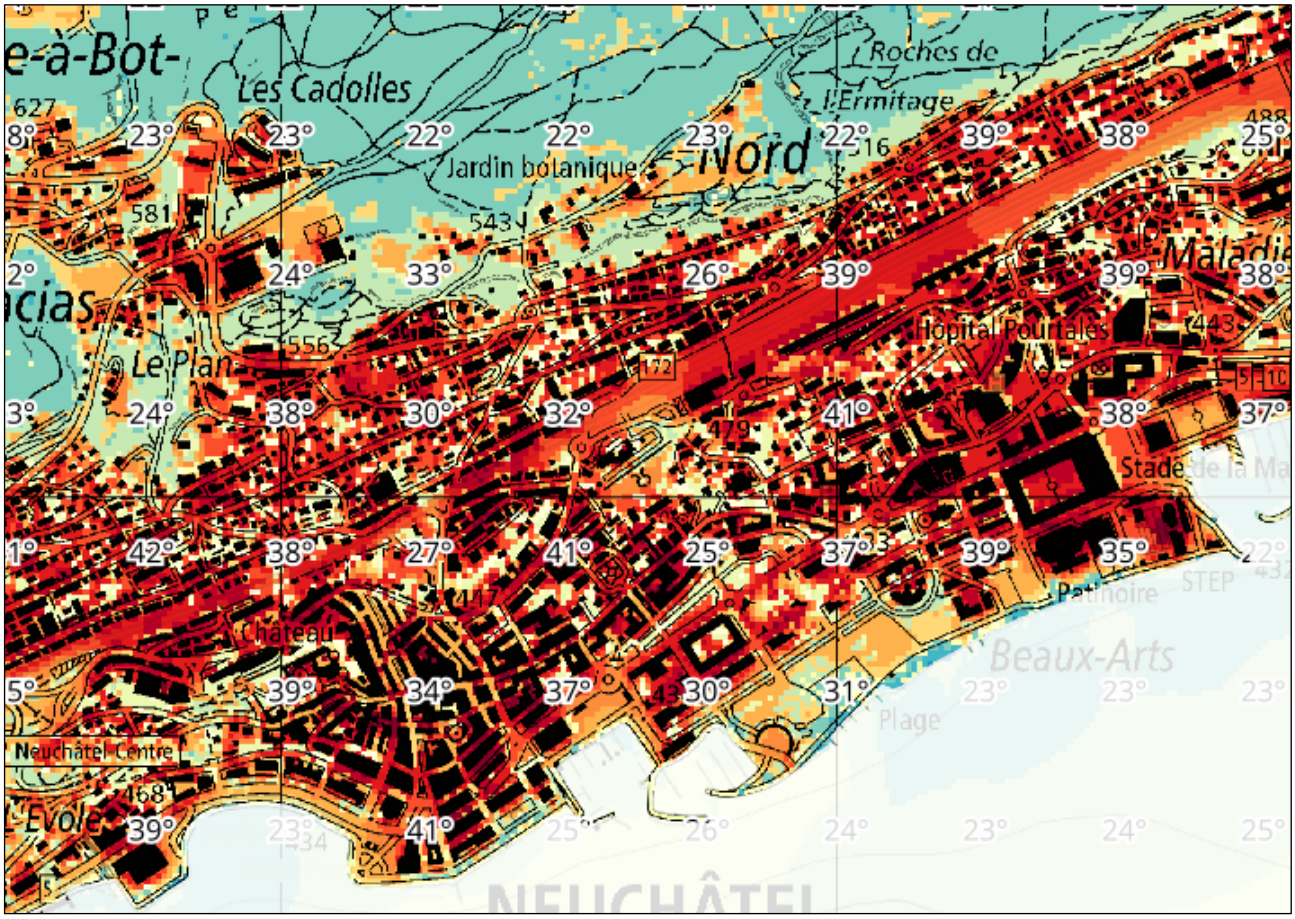


Figure 28 – Température physiologique équivalente à Neuchâtel, période P0

La variation des valeurs de PET dans le canton est liée à plusieurs facteurs.

- ***L'altitude***

Pour des lieux comparables, la PET est généralement plus élevée à basse altitude. Par exemple, le Bois de l'hôpital au nord de Neuchâtel, situé à environ 600 m d'altitude, affiche une valeur de l'ordre de 21 °C (P0) tandis que les forêts entourant le Mont Racine ou le Creux du Van, situées à environ 1200 m d'altitude, affichent une valeur de l'ordre de 15 °C (P0). Cet effet est toutefois atténué dans les zones non ombragées. Par exemple, la Place Pury à Neuchâtel se situe aux alentours de 38-39 °C (P0) et la Place de l'Hôtel de Ville à La Chaux-de-Fonds se situe aux alentours de 37-38 °C (P0). L'altitude permet toutefois d'expliquer que les pâturages au Creux du Van ou les zones non ombragées du lac des Taillères restent à un niveau de stress thermique faible avec des valeurs de PET de l'ordre de 28 °C (P0).

- ***L'occupation du sol***

Les surfaces vertes ont, globalement, des valeurs de PET plus faibles que les surfaces imperméables des zones urbanisées. La différence de PET entre les surfaces vertes non ombragées et les espaces bâtis n'est toutefois pas très grande, de l'ordre de quelques degrés la plupart du temps. Par exemple, au Val-de-Ruz, les surfaces agricoles varient entre 34 °C et 38 °C (P0), et le centre village de Savagnier est à 38-40 °C (P0). Toutefois, les quelques degrés supplémentaires de la PET dans les secteurs urbanisés sont importants, car ils font souvent basculer la situation vers un stress de chaleur fort, voire extrême, et rendent la situation physiologique critique pour les humains. C'est le cas dans tous les centres des villages du littoral et de l'Entre-Deux-Lacs, mais aussi de quelques villages du Val-de-Ruz et du Val-de-Travers ainsi que des villes du Locle et de La Chaux-de-Fonds. Les surfaces vertes ont des valeurs de PET très variables selon leur type, les forêts sont fraîches tandis que les surfaces agricoles chauffent beaucoup. L'écart de PET entre les surfaces agricoles et les forêts situées à proximité est de l'ordre de 10 à 15 °C (P0). Par exemple, dans les hauteurs de Bevaix, les surfaces agricoles ont des valeurs de l'ordre de 33 °C (P0) et la forêt de l'ordre de 21 °C (P0). Dans la vallée de La Brévine, les surfaces agricoles sont à 34-36 °C (P0) et les forêts voisines à 18-20°C (P0).

- ***L'ombrage***

Les zones urbaines non ombragées présentent des valeurs très élevées de PET, avec par exemple un niveau de stress thermique fort à la Place Pury à Neuchâtel ou à la Grande Fontaine à La Chaux-de-Fonds. Lorsque les bâtiments sont hauts, le phénomène s'accentue pour les rues et les cours intérieures situées au soleil, comme c'est le cas à l'Avenue de la Gare ou à la Place des Halles à Neuchâtel, à la rue Edouard-Guillaume à La Chaux-de-Fonds ou au Vieux-Bourg au Landeron, qui subissent un stress thermique extrême à P0 avec des valeurs de PET supérieures ou égales à 41°C. En revanche, pour les rues situées à l'ombre, la PET reste dans des valeurs correspondant à un stress modéré de chaleur, comme c'est le cas à la Rue du Seyon à Neuchâtel (33 °C à P0). L'ombrage des arbres est encore plus efficace, que ce soit pour les rues, les parcs ou les jardins privés, comme en témoignent l'Avenue du Mail et le Jardin Anglais à Neuchâtel, qui présentent un stress thermique faible (entre 23° et 27°). Le Parc Gallet et le Parc des Crêtets[15] à La Chaux-de-Fonds sont encore plus frais et se situent dans la tranche de confort thermique (entre 19° et 23°).

- ***Bord du lac***

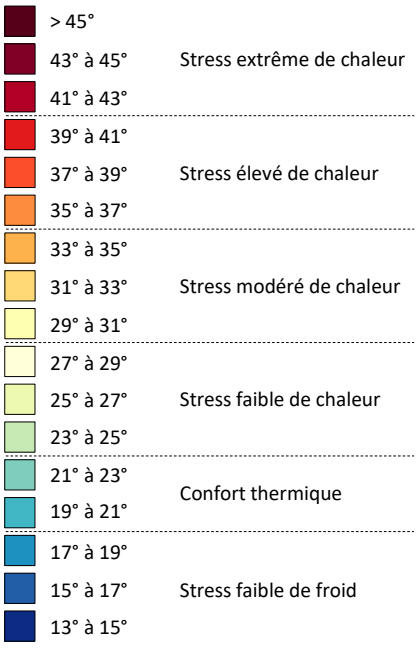
Au bord du lac, l'air est globalement plus frais que dans les terres. Ainsi, les zones ombragées sont ressenties encore plus fraîches au bord du lac qu'ailleurs, comme c'est le cas aux Rives du Lac à Colombier, aux Jeunes Rives à Neuchâtel ou encore à la Pointe du Grain à Bevaix, où la PET se situe dans la tranche de confort thermique (entre 19° et 23°). Cette brise bénéficie également aux bords de rive non ombragés, par exemple au Nid du Crô à Neuchâtel où la PET reste à un niveau de stress modéré (entre 29° et 33°).

[15] Le Parc Gallet et le Parc des Crêtets ont été fortement touchés par la tempête du 24 juillet 2023. Pour les périodes P1 et suivantes, le confort thermique qu'ils offrent est plus faible qu'à P0.

4.1.1.2 ÉVOLUTION DE P0 À P3

Ci-contre est présentée l'évolution de la PET, de P0 à P3 (*Figure 29*). Pour la période P1, les valeurs de la PET augmentent de manière généralisée, atteignant un maximum de 45 °C pour les espaces construits et 41 °C pour les espaces verts ouverts. Le stress extrême de chaleur est régulièrement atteint dans les zones urbaines, y compris dans le haut du canton ou dans les villages, de même que dans de nombreux espaces verts et ouverts du bas du canton. Dans les parcs ombragés et les forêts, l'augmentation est également présente, mais la situation thermique reste en dessous du seuil de stress thermique modéré.

Au milieu puis à la fin du siècle, la PET continue à augmenter dans l'ensemble du canton. Les zones soumises au stress extrême de chaleur sont de plus en plus nombreuses. Pour P2, c'est le cas de la majorité des centres-villes dans le haut du canton et d'une grande partie de la zone bâtie dans le bas du canton. Pour P3, il s'agit de presque toute la zone urbanisée. Les zones qui sont déjà en stress extrême à P0 ont parfois des valeurs de PET atteignant les 45 °C à P2, et 47 °C à P3. À P3, seules les forêts du haut du canton restent sous les 20 °C. Les parcs urbains ombragés offrent moins de confort, le stress thermique pourra y être modéré, voire élevé.



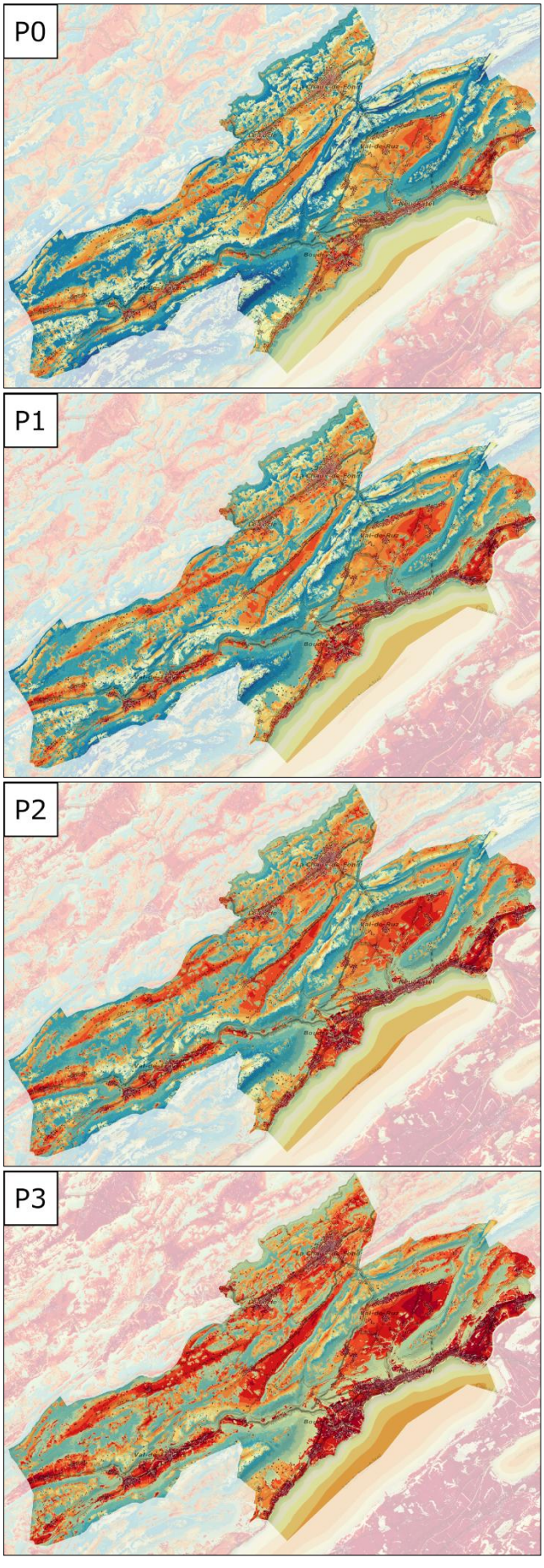


Figure 29 – PET, évolution de P0 à P3

La PET moyenne de 10 lieux caractéristiques du canton, ainsi que son évolution de P0 à P3, est disponible ci-dessous (*Tableau 21*), les lieux sont classés du plus chaud au plus frais.

N°	Lieu, commune	P0	P1	P2	P3
1	Vers la fontaine du Vieux-Bourg, Le Landeron 	40 °C stress fort	42 °C stress extrême	44 °C stress extrême	46 °C stress extrême
2	À la Place des Halles, Neuchâtel 	39 °C stress fort	41 °C stress fort	43 °C stress extrême	45 °C stress extrême
3	À la Place de la Grande Fontaine, La Chaux-de-Fonds 	39 °C stress fort	41°C stress fort	42°C stress extrême	43 °C stress extrême
4	Sur le terrain de foot du centre sportif, Couvet 	37 °C stress fort	39 °C stress fort	40 °C stress fort	41 °C stress fort
5	À l'entrée du Château des Monts, Le Locle 	36 °C stress fort	38 °C stress fort	39 °C stress fort	41 °C stress fort

N°	Lieu, commune	P0	P1	P2	P3
6	Sur le parking de La Vue-des-Alpes, Fontaines 	32 °C stress modéré	34 °C stress modéré	35 °C stress modéré	37 °C stress fort
7	Dans les jardins d'Evologia, Cernier 	31 °C stress modéré	32 °C stress modéré	33 °C stress modéré	35 °C stress modéré
8	Sur la rive sud du lac des Taillères, La Brévine 	27 °C stress faible	28 °C stress faible	29 °C stress faible	30 °C stress modéré
9	Au Creux du Van, Val-de-Travers / La Grande Béroche 	25 °C stress faible	26 °C stress faible	27 °C stress faible	29 °C stress faible
10	À l'ombre des arbres de la pointe du Grain, Bevaix 	21 °C confort thermique	22 °C confort thermique	24 °C stress faible	25 °C stress faible

Tableau 21 – Température physiologique équivalente moyenne de 10 lieux caractéristiques du canton et leur évolution de P0 à P3

Ci-dessous sont présentés les histogrammes de la température physiologique équivalente pour les zones urbanisées (*Figure 30*), les espaces verts non forestiers (*Figure 31*) et les forêts (*Figure 32*) de l'ensemble du canton, pour les 4 périodes.

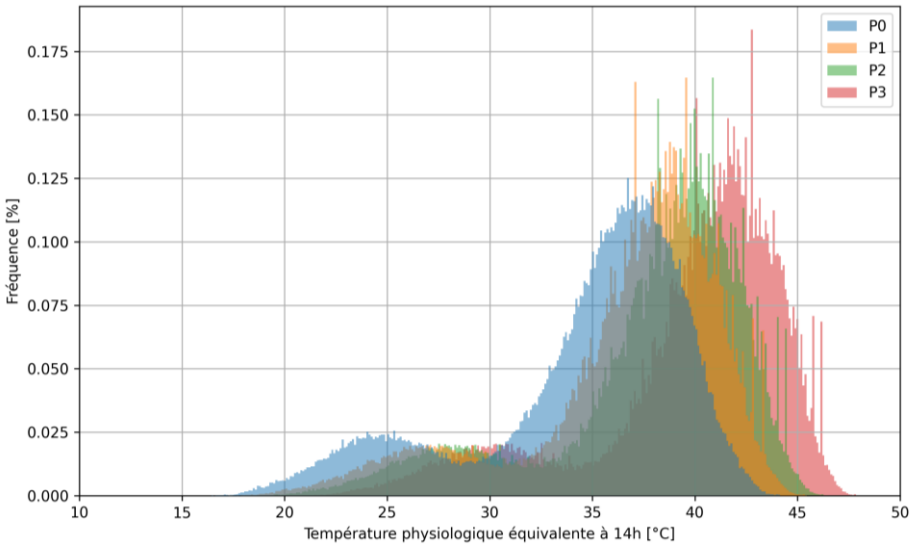


Figure 30 – Histogramme normalisé de la PET des zones urbanisées, de P0 à P3

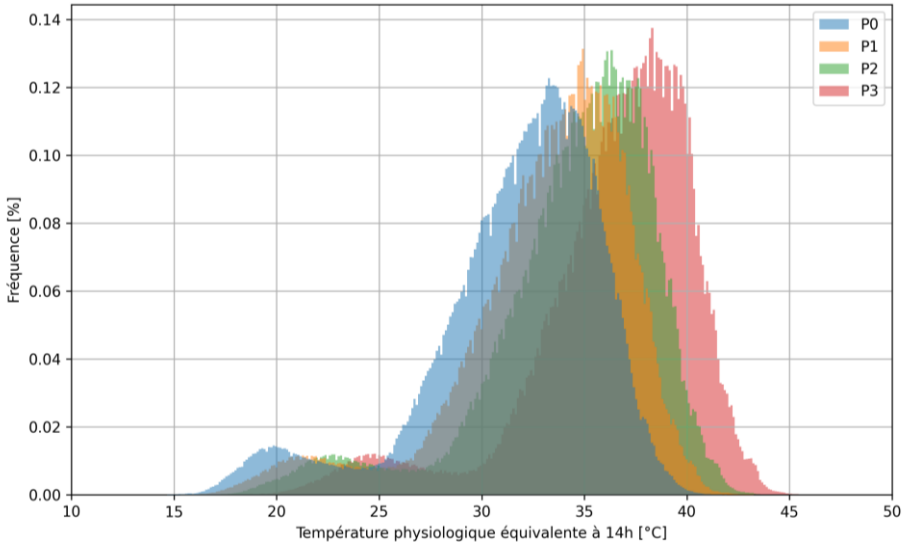


Figure 31 – Histogramme normalisé de la PET des espaces verts non forestier, de P0 à P3

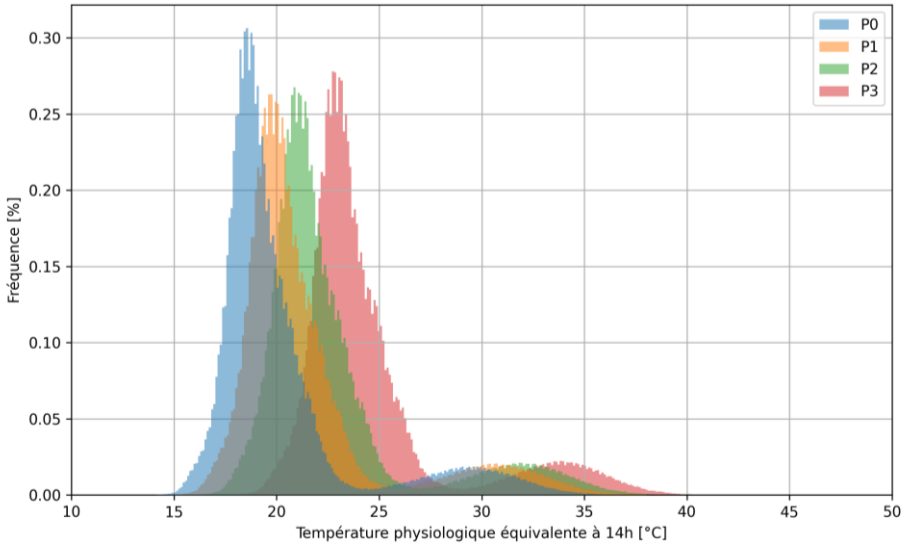


Figure 32 – Histogramme normalisé de la PET des forêts, de P0 à P3

Ces histogrammes montrent, pour les 3 types de zone, une distribution de valeurs dont la forme est similaire de P0 à P3, mais qui se décale de plusieurs degrés, avec une situation de plus en plus chaude au fil du temps. En zone urbaine, le pic principal de valeur passe de 37 °C (P0) à 42 °C (P3), c'est-à-dire d'un niveau de stress thermique élevé à un niveau extrême.

Ces 3 histogrammes présentent également chacun deux pics, l'un principal et l'autre secondaire. Les analyses ci-dessous ont été faites en observant la répartition géographique des valeurs des histogrammes.

En ce qui concerne les zones urbanisées, le pic principal, qui se situe aux alentours de 37 °C (P0), correspond aux secteurs situés en ville et sans ombrage. Le pic secondaire, situé aux alentours de 24 °C (P0), correspond aux secteurs situés en ville, mais se trouvant à l'ombre des arbres ou en périphérie des zones urbaines et donc en limite avec un autre type d'utilisation du sol.

Pour les espaces verts non forestiers, la situation est similaire. Le pic principal, à 33 °C (P0), correspond aux surfaces vertes elles-mêmes et le pic secondaire, à 20 °C (P0), correspond aux lisières de forêt ou de zones ombragées.

Enfin, concernant les forêts, le pic principal est le plus frais, celui situé à 18 °C (P0). Les valeurs qui constituent le second pic, à 29 °C (P0), correspondent aux zones sans arbres telles que les coupes pour le passage des lignes aériennes, les coupes d'entretien, les clairières, ou les pâturages boisés qui peuvent être faiblement ombragés comparé au cœur de la forêt.

4.1.1.3 EFFETS DU DÉVELOPPEMENT URBAIN

Dans les secteurs de développement urbain, l'augmentation de la PET entre P0 et P1 dépend fortement de l'occupation des sols. Dans les zones industrielles comme celle de Cressier, la part de constructions et installations est élevée et celle des espaces verts est faible, la PET dépasse donc régulièrement les 41 °C à P1. Dans les futures zones d'habitation, le stress thermique est en général élevé, mais pas extrême. La valeur de la PET à P1 des futures zones construites est similaire à celle des zones déjà construites de densité ou d'occupation similaire.

Avec l'occupation des sols prise en compte dans les secteurs de développement urbain à P1 (implantation aléatoire, voir partie *3.1.3.3*), les nouveaux bâtiments et aménagements ont un impact non négligeable sur la PET des zones urbaines voisines et contribuent à les réchauffer. L'implantation aléatoire simule de nombreux bâtiments individuels, ce qui augmente la quantité de façades présentes (et ajoute ainsi un rayonnement infrarouge) et fractionne les espaces verts. Dans ces conditions, les effets sur la PET sont visibles jusqu'à une distance de 100 m des secteurs de développement urbain. Ces résultats illustrent une situation dans laquelle l'implantation des constructions ne considère pas la question climatique, ce qui est peu réaliste, mais donne une idée des conséquences possibles. Pour analyser les effets concrets d'un développement urbain à l'échelle d'un quartier, une simulation plus précise est nécessaire.

4.1.2 Synthèse et analyse de la situation diurne

Les résultats de la PET indiquent que plusieurs facteurs l'influencent.

- L'altitude : la température étant un facteur prépondérant dans le calcul de la PET, l'altitude impacte cette dernière.
- L'occupation du sol : la végétation (avec ou sans ombrage) limite le stress thermique grâce à son faible albédo et sa capacité d'évapotranspiration. Au contraire, les matériaux urbains accumulent et diffusent la chaleur, s'additionnant au rayonnement solaire direct. Les structures urbaines induisant un piégeage radiatif amplifient ce phénomène. La différence de PET entre les surfaces agricoles et les secteurs largement imperméabilisés est toutefois faible à cause du rayonnement solaire très intense dans les deux cas.

- L'ombrage : réduisant drastiquement le rayonnement solaire, il est particulièrement efficace pour diminuer la PET. Les rues ombragées sont donc dans des conditions de stress thermique plus faible que les rues exposées au soleil. Les arbres sont encore plus efficaces, car, en plus de faire obstacle au rayonnement, leur capacité d'évapotranspiration permet de rafraîchir l'air davantage.
- Le bord du lac : l'air y est plus frais grâce au réchauffement de l'eau qui absorbe la chaleur de l'air ainsi qu'à la brise de lac, ce qui atténue la sensation de chaleur.

Ainsi, les forêts, les zones de haute altitude et les parcs ombragés au bord du lac offrent le meilleur confort thermique tandis que les places imperméables et les rues exposées au soleil et bordées de bâtiments hauts et contigus sont dans les conditions d'un stress thermique extrême. Ces phénomènes restent valables quelle que soit la période considérée et se produisent en parallèle du réchauffement climatique.

Le dérèglement climatique induit une augmentation générale des valeurs de la PET et donc un élargissement des secteurs atteignant le seuil de stress extrême de chaleur en conditions autochtones. À P0, il s'agit de quelques rues et places des principaux centres urbains des communes du littoral, à P1 cela concerne une large partie des zones urbanisées du littoral, de l'Entre-Deux-Lacs et du Val-de-Travers, et à P3, presque toutes les zones urbanisées du canton franchissent le seuil du stress extrême de chaleur, certaines atteignant les 47 °C. En moyenne, ces conditions se produisent durant 30 jours sur les mois de juin, juillet et août.

L'ombrage, en particulier par des arbres, est le moyen le plus efficace pour réduire les valeurs de la PET et diminuer le stress thermique subi par les êtres humains. En ville, le ressenti est entre 10 et 15 °C inférieur à l'ombre des arbres qu'au soleil. Cela nécessite toutefois que les arbres disposent de suffisamment d'espace pour se développer et d'eau pour l'évapotranspiration.

4.2 SITUATION NOCTURNE

Rappel : les données de la situation nocturne ont été calculées à 4h du matin, heure supposée du refroidissement maximal en conditions météorologiques autochtones. Il s'agit donc de la température, de l'effet d'îlot de chaleur et des courants d'air froid au refroidissement maximal d'une nuit d'été autochtone moyenne de la période considérée, ce qui concerne environ 30 % des nuits de juin, juillet et août.

4.2.1 Température

Rappel : la température nocturne, calculée à 2 m du sol, permet d'évaluer les conditions de sommeil de la population, raison pour laquelle l'attention est surtout portée sur les zones urbanisées pour ces données. Les résultats tiennent compte du rafraîchissement des vents nocturnes.

4.2.1.1 ÉTAT DES LIEUX À P0

La carte cantonale de la température nocturne à P0 est présentée ci-dessous (*Figure 33*) ainsi qu'un extrait pour le centre-ville de La Chaux-de-Fonds (*Figure 34*), Milvignes (*Figure 35*) et Le Landeron (*Figure 36*).

La vue d'ensemble de la carte cantonale permet de cerner les zones fraîches du canton, majoritairement les espaces verts ou ouverts, et les espaces les plus chauds, qui sont les secteurs urbanisés. Les valeurs minimales sont atteintes sur les sommets non boisés comme Tête de Ran ou le Creux du Van, où la température descend en dessous des 10 °C (P0). Les valeurs maximales sont atteintes dans les centres urbains du littoral, comme au centre-ville de Neuchâtel avec une valeur de 19 °C (P0).

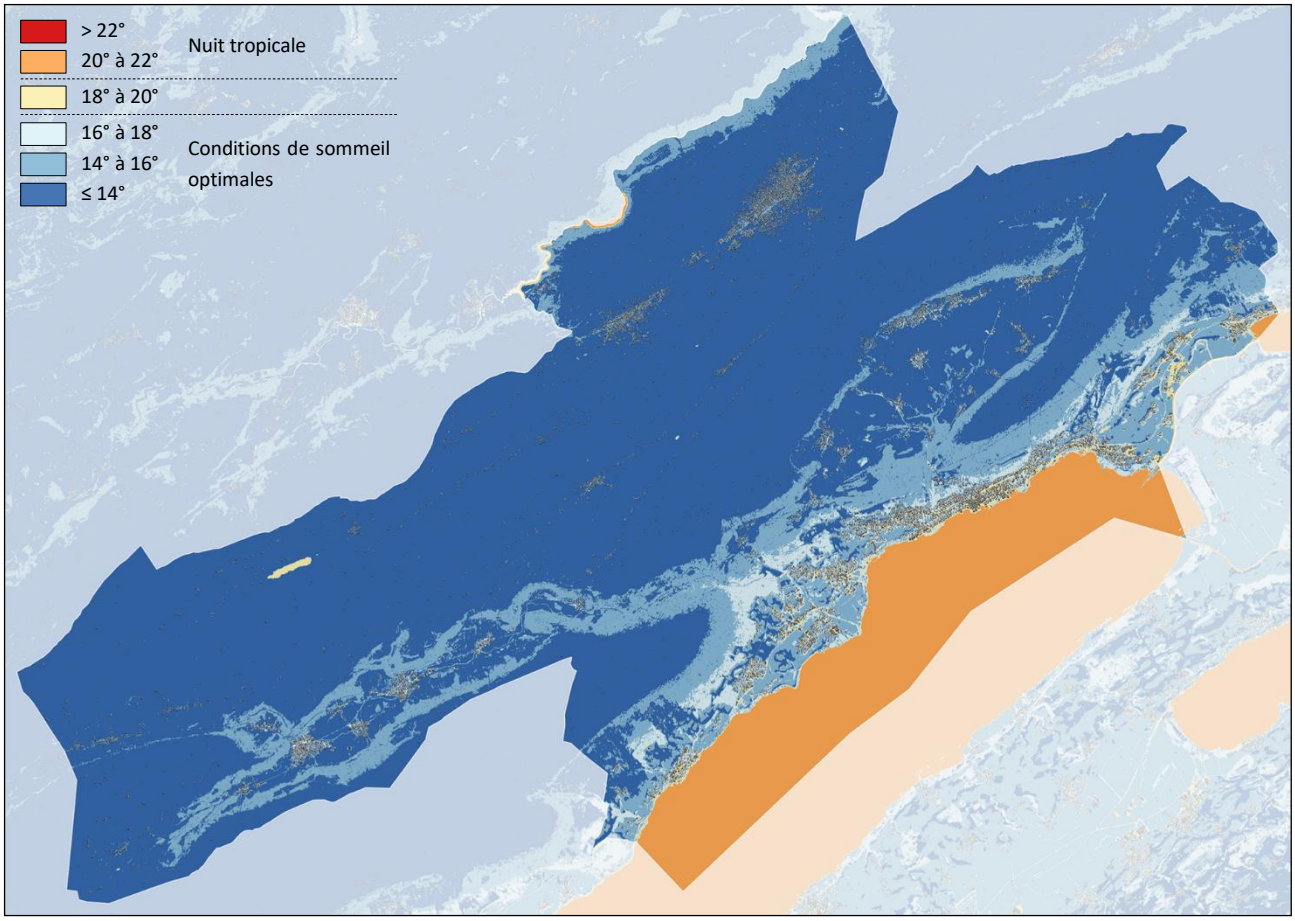


Figure 33 – Température nocturne de l'air, période P0

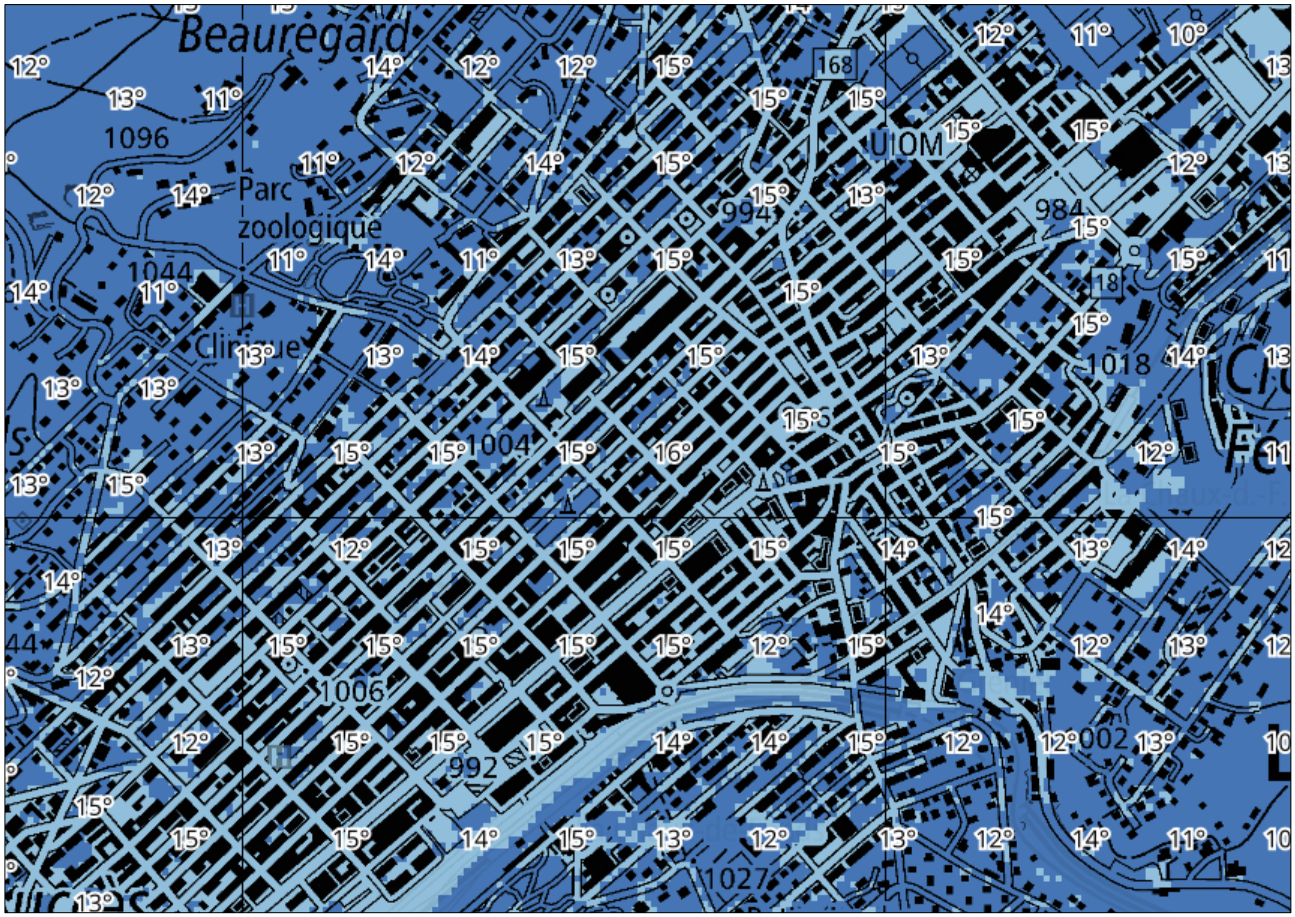


Figure 34 – Température nocturne de l'air à La Chaux-de-Fonds, période P0

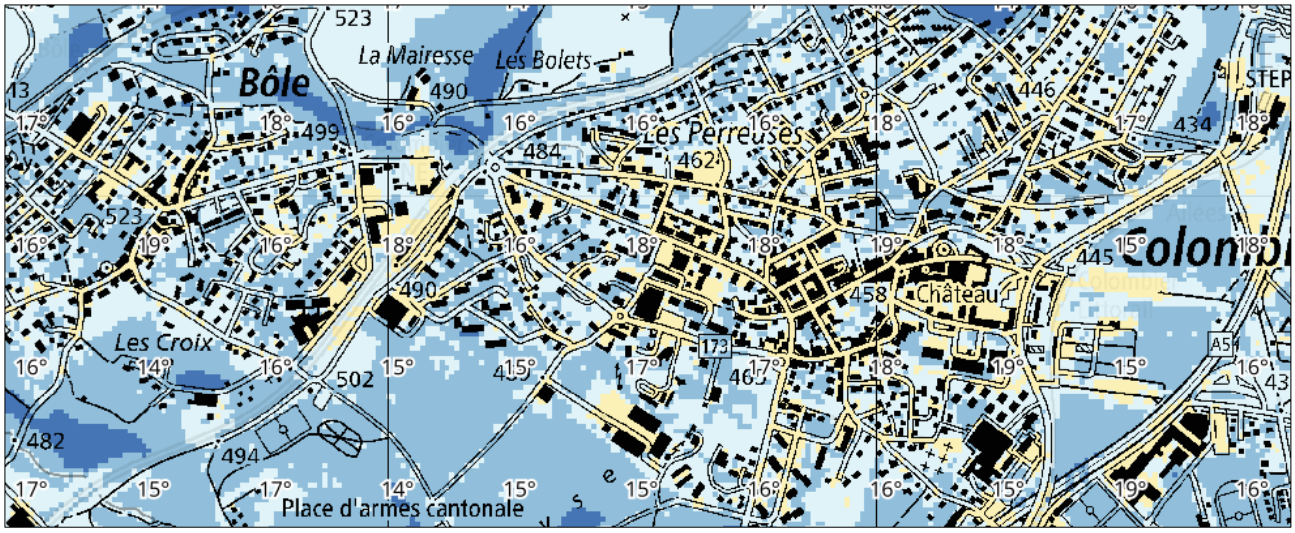


Figure 35 – Température nocturne de l'air à Milvignes, période P0

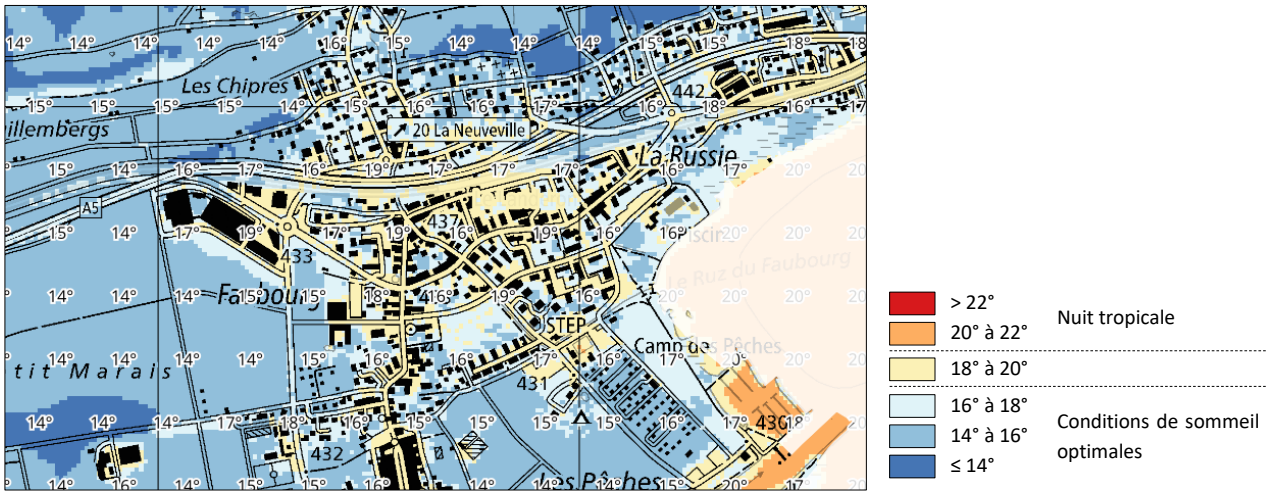


Figure 36 – Température nocturne de l'air au Landeron, période P0

Comme pour la PET, plusieurs facteurs influencent la température nocturne.

- ***L'altitude***

Pour des lieux comparables, la température est plus élevée à des altitudes basses. Par exemple, au centre de Chézard-Saint-Martin (760 m), la température est plus faible qu'à Corcelles-Cormondrèche (550 m), pour des quartiers comparables.

- ***L'occupation du sol***

Les différences de température entre les différentes occupations du sol sont du même ordre de grandeur dans tout le canton. Par exemple, les vignes de Hauterive, Saint-Blaise ou Corcelles-Cormondrèche sont aux alentours de 15 °C (P0), le Bois de l'Hôpital au nord de Neuchâtel reste aux alentours de 17 °C (P0) et le centre-ville de Neuchâtel, autour de la gare de Neuchâtel ou de la Maladière, la température reste à 19 °C (P0). Au Val-de-Ruz, les champs cultivés sont aux alentours de 12-13 °C (P0), les petites parcelles de forêt sont autour de 15°C et les centres-villages les plus denses sont autour de 16 °C (P0). Au Locle, les champs sont autour de 10 °C (P0), les forêts autour de 13 °C (P0) et le centre-ville autour de 16 °C (P0).

Les parcs ou les espaces ouverts à l'intérieur des villes bénéficient également d'un rafraîchissement important, comme le cimetière de Beauregard à Neuchâtel ou le centre sportif de La Charrière à La Chaux-de-Fonds, qui descendent à une température d'environ 3 °C de moins que les routes et les rues principales environnantes.

L'influence de l'occupation des sols sur la température nocturne s'explique notamment par l'effet d'îlot de chaleur, qui provoque une surchauffe des zones urbaines, particulièrement marquée la nuit (voir partie *2.3.1* pour les explications théoriques et partie *4.2.2* pour les résultats).

- ***La structure urbaine***

Plus la structure urbaine est dense, avec des bâtiments hauts et contigus ainsi qu'une forte part de surface imperméable, plus la température est élevée, a fortiori lorsque l'implantation des bâtiments fait obstacle aux courants d'air froid (voir partie *2.3.2* pour les explications théoriques et partie *4.2.3* pour les résultats). Cela s'observe bien dans les 6 secteurs illustrés ci-dessus, avec des différences de 3 à 4°C entre les rues des centres et les secteurs périphériques.

- ***Le bord du lac***

Sur le lac de Neuchâtel, la température de l'air reste élevée, aux alentours de 20-21 °C (P0), mais cela ne semble pas impacter les terres au-delà de la rive elle-même.

4.2.1.2 ÉVOLUTION DE P0 À P3

Les cartes ci-dessous montrent l'évolution de la température nocturne de P0 à P3 (*Figure 37*) au niveau cantonal.

On y constate une augmentation généralisée des températures de P0 à P3, qui impacte tous les lieux du canton (sommets non boisés, forêts, routes, zones urbaines, etc.) de manière plutôt homogène. Sur le lac, la température augmente également, mais de manière moins prononcée que sur les terres. Ainsi, les valeurs maximales de la température nocturne, situées dans les zones urbanisées les plus denses du littoral, atteignent 21 °C à P1, 22 °C à P2 et 23 °C à P3, les conditions d'une nuit tropicale y sont donc remplies pour ces 3 périodes.

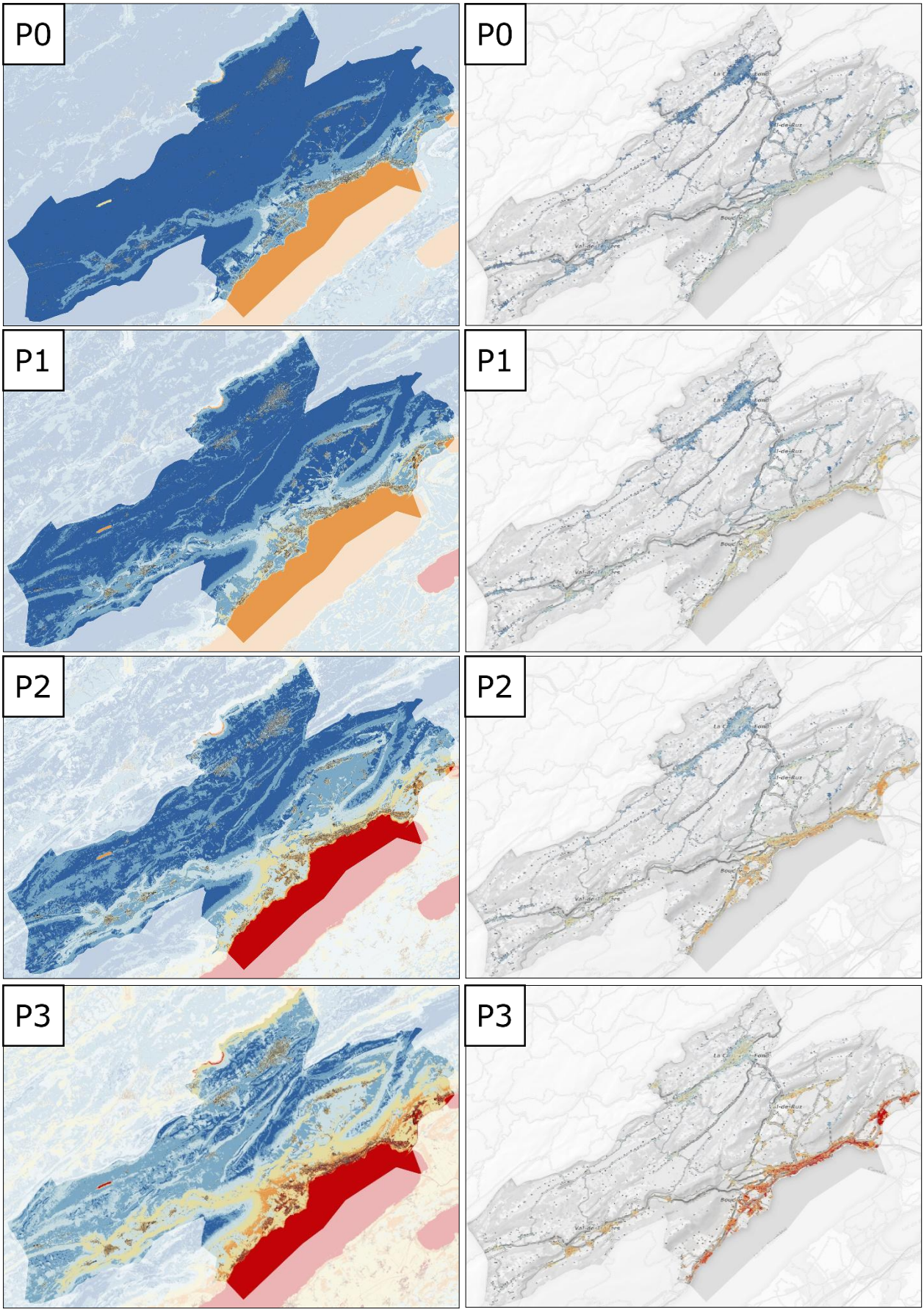


Figure 37 – Température nocturne de l'air pour le canton (à gauche) et les zones urbanisées (à droite), évolution de P0 à P3

Les diagrammes ci-dessous montrent la part de chaque température dans les zones urbanisées (*Figure 38*).

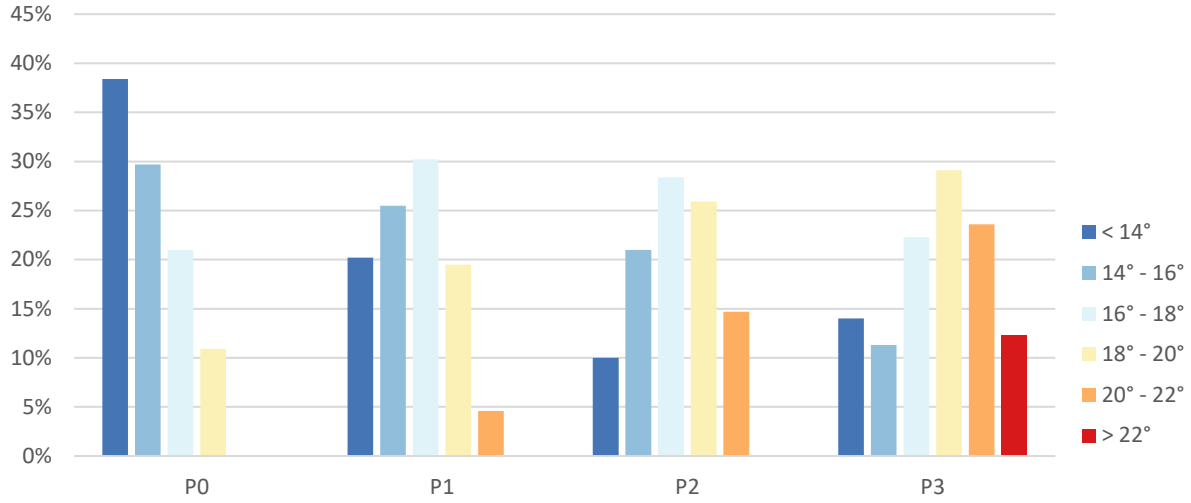


Figure 38 – Histogrammes des températures nocturnes de l'air dans les zones urbanisées, de P0 à P3

On observe que le nombre de secteurs pour lesquels une nuit d'été autochtone moyenne sera une nuit tropicale va considérablement augmenter au cours du siècle. Inexistantes à P0, les nuits tropicales concernent 5 % des zones urbanisées à P1, 15 % à P2 et 36 % à P3 (*Tableau 22*). À P3, dans les zones urbaines du littoral et de l'Entre-Deux-Lacs, seuls les secteurs situés en périphérie restent en dessous des 20 °C.

Période	Zones urbanisées ≥ 20 °C	Zones urbanisées concernées par des nuits tropicales
P0	0%	• Aucune
P1	5%	• Centres urbains les plus denses du littoral et de l'Entre-Deux-Lacs
P2	15%	• Centres urbains du littoral et de l'entre-deux-lacs • Centres urbains les plus denses de quelques villages du Val-de-Travers
P3	36 %	• Quasi-totalité des zones urbanisées du littoral et l'Entre-Deux-Lacs • Centres urbains du Val-de-Travers • Centres urbains du Val-de-Ruz • Zones les plus denses du Locle

Tableau 22 – Zones urbanisées concernées par des nuits tropicales

4.2.1.4 EFFETS DU DÉVELOPPEMENT URBAIN

Les secteurs de développement, qui, la majorité du temps, passent d'espaces verts et ouverts (P0) à des zones urbanisées (P1), subissent une augmentation de la température nocturne plus importante qu'ailleurs, car l'effet des constructions et aménagements s'ajoute au réchauffement climatique. Là encore, l'occupation des sols prise en compte dans les secteurs de développement urbain à P1 (implantation aléatoire, voir partie *3.1.3.3*) induit une prévision approximative, car les effets de l'aménagement d'un nouveau secteur sur la température nocturne dépendent des courants d'air à cet endroit. Ces résultats illustrent une situation dans laquelle l'implantation ne considère pas la question climatique, ce qui est peu réaliste, mais donne une idée des conséquences possibles. Pour analyser les effets concrets d'un développement urbain, une simulation plus précise est nécessaire.

Dans certains cas, on peut également observer une diminution de la température de l'air, par exemple, dans les secteurs de développement le long de la voie ferrée à La Chaux-de-Fonds, où la situation future suppose un plus grand pourcentage d'espaces verts que la situation actuelle, ce qui correspond à une désimperméabilisation partielle des sols.

4.2.2 Effet d'îlot de chaleur

Rappel : l'effet d'îlot de chaleur est la différence de température entre celle prévalant dans la zone urbanisée et la température moyenne des espaces verts et ouverts situés dans la même tranche d'altitude. Il permet de mettre en évidence la surchauffe nocturne des zones urbanisées pour une nuit d'été autochtone moyenne de la période considérée. Il a été calculé pour P0 et P1 et tient compte du rafraîchissement des vents nocturnes.

Les cartes ci-dessous montrent l'effet d'îlot de chaleur de plusieurs lieux du canton (*Figure 39* à *Figure 43*).



Figure 39 – Effet d'îlot de chaleur à La Chaux-de-Fonds, période P0

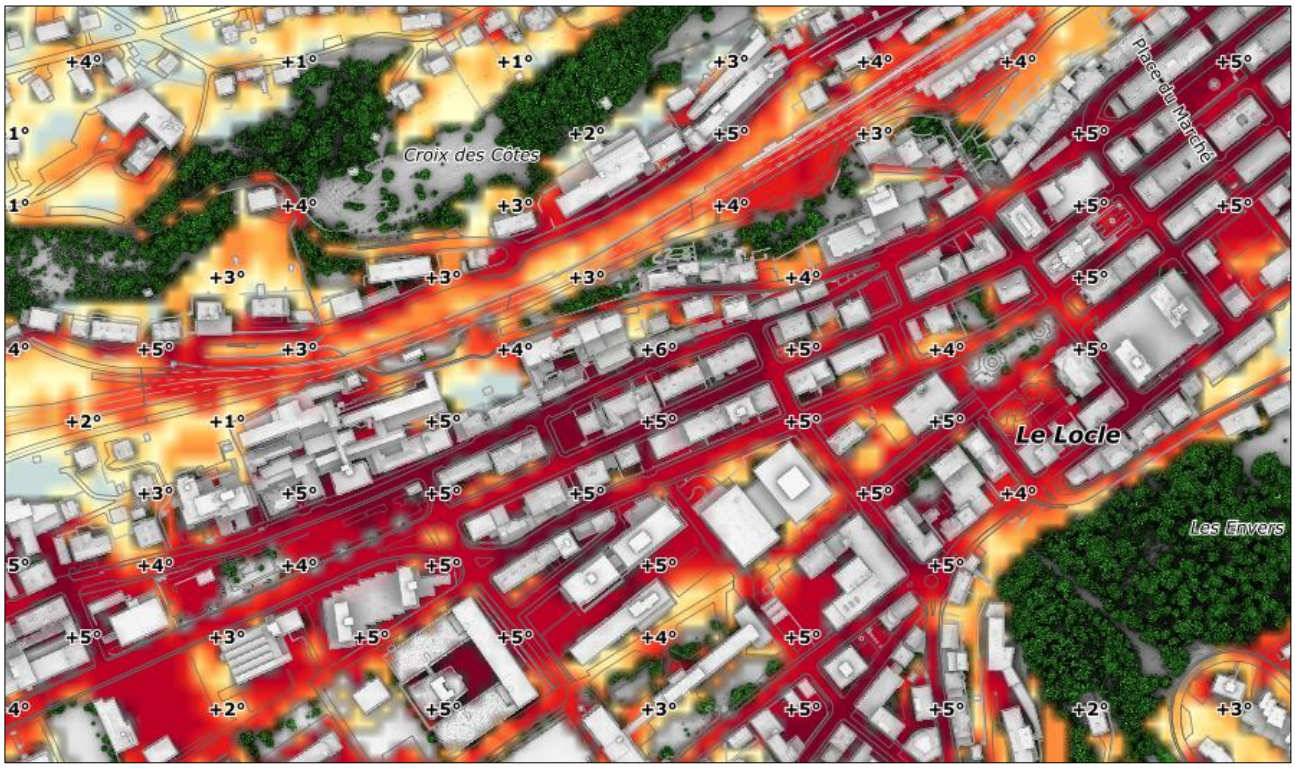


Figure 40 – Effet d'îlot de chaleur au Locle, période P0

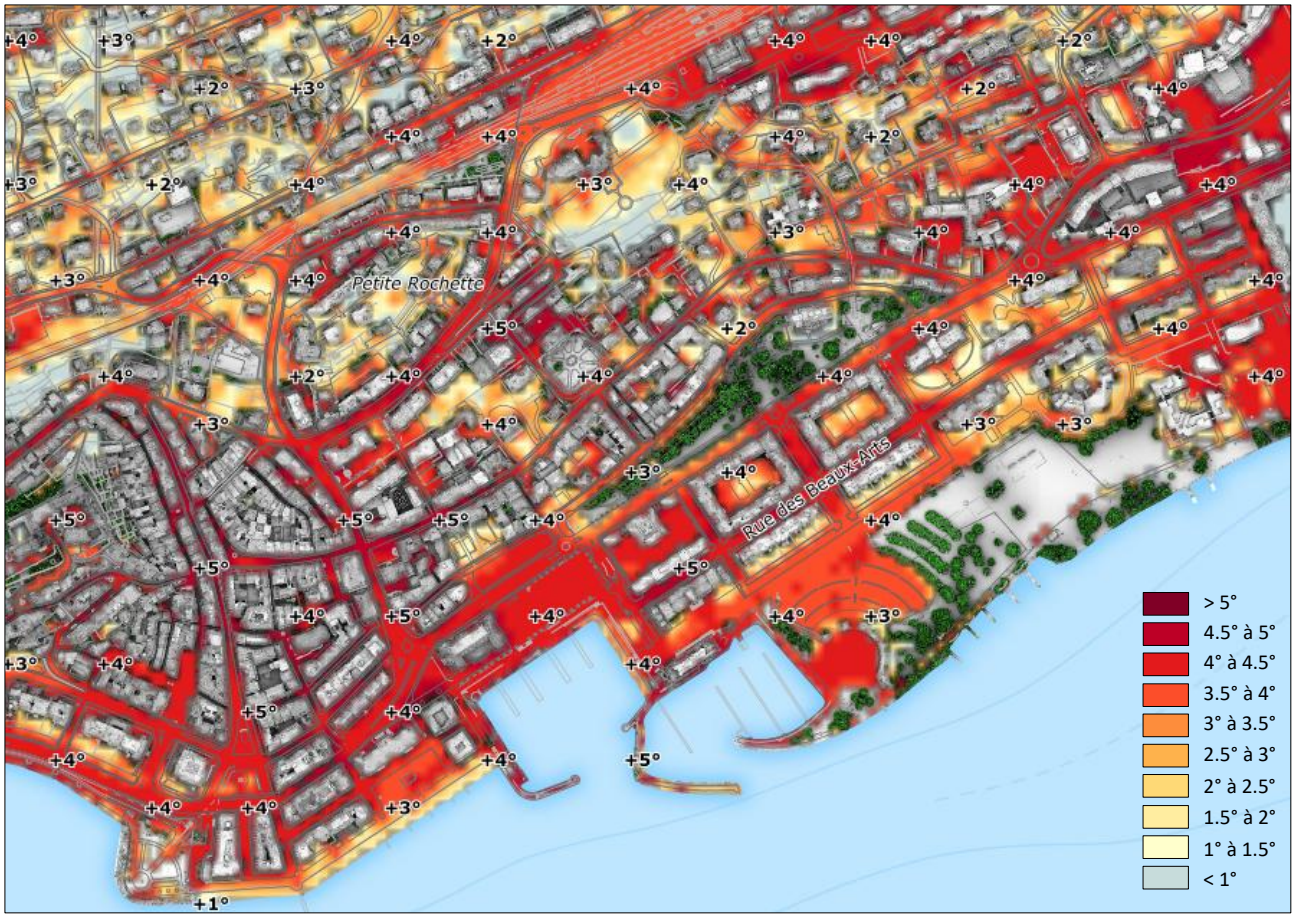


Figure 41 – Effet d'îlot de chaleur à Neuchâtel, période P0

L'effet d'îlot de chaleur est peu dépendant de l'altitude. Par exemple, l'effet d'îlot de chaleur atteint +5 °C dans les centres de Neuchâtel, du Locle et de La Chaux-de-Fonds.

Les centres très denses, avec des rues étroites, des bâtiments hauts et une majorité de surfaces imperméables, montrent les valeurs les plus élevées, atteignant les +5 °C comme c'est le cas à l'Avenue Léopold-Robert à La Chaux-de-Fonds, à la Place des Halles ou autour de La Maladière à Neuchâtel. La rue des Billodes au Locle atteint même +6 °C. Les centres des villages présentent aussi des valeurs élevées, comme c'est le cas dans les centres de Couvet et Cernier qui atteignent les +5 °C.

Dans les quartiers résidentiels où la part de végétation est plus importante, l'effet d'îlot de chaleur est plus faible. On observe des valeurs aux alentours de +1 ou +2 °C, comme dans les hauts de Corcelles ou de Peseux, à Pierre-à-Bot dans les hauts de Neuchâtel, dans la partie sud de Cernier ainsi qu'à la périphérie des villes du Locle et de La Chaux-de-Fonds.

Les quartiers intermédiaires, avec des bâtiments à plusieurs niveaux et espacés, présentent généralement un degré moyen d'imperméabilisation du sol. L'effet d'îlot de chaleur oscille alors entre +2 °C et +4 °C, comme c'est le cas pour une bonne partie du village de Couvet, mais aussi pour tout le nord de Neuchâtel ou le quartier du Mail, à Neuchâtel également.

Les zones industrielles ou commerciales ainsi que les places, avec de grandes surfaces imperméables, montrent aussi des valeurs importantes, mais l'attention est ici portée sur les secteurs habités, dans la mesure où l'effet d'îlot de chaleur est étudié la nuit et non la journée.

L'effet de l'îlot de chaleur urbain à P1 est, dans une large mesure, semblable à celui à P0. Des différences sont constatées surtout dans les secteurs de développement urbain, où l'effet d'îlot de chaleur à P1 est similaire aux quartiers proches déjà existants et dont la structure urbaine est comparable.

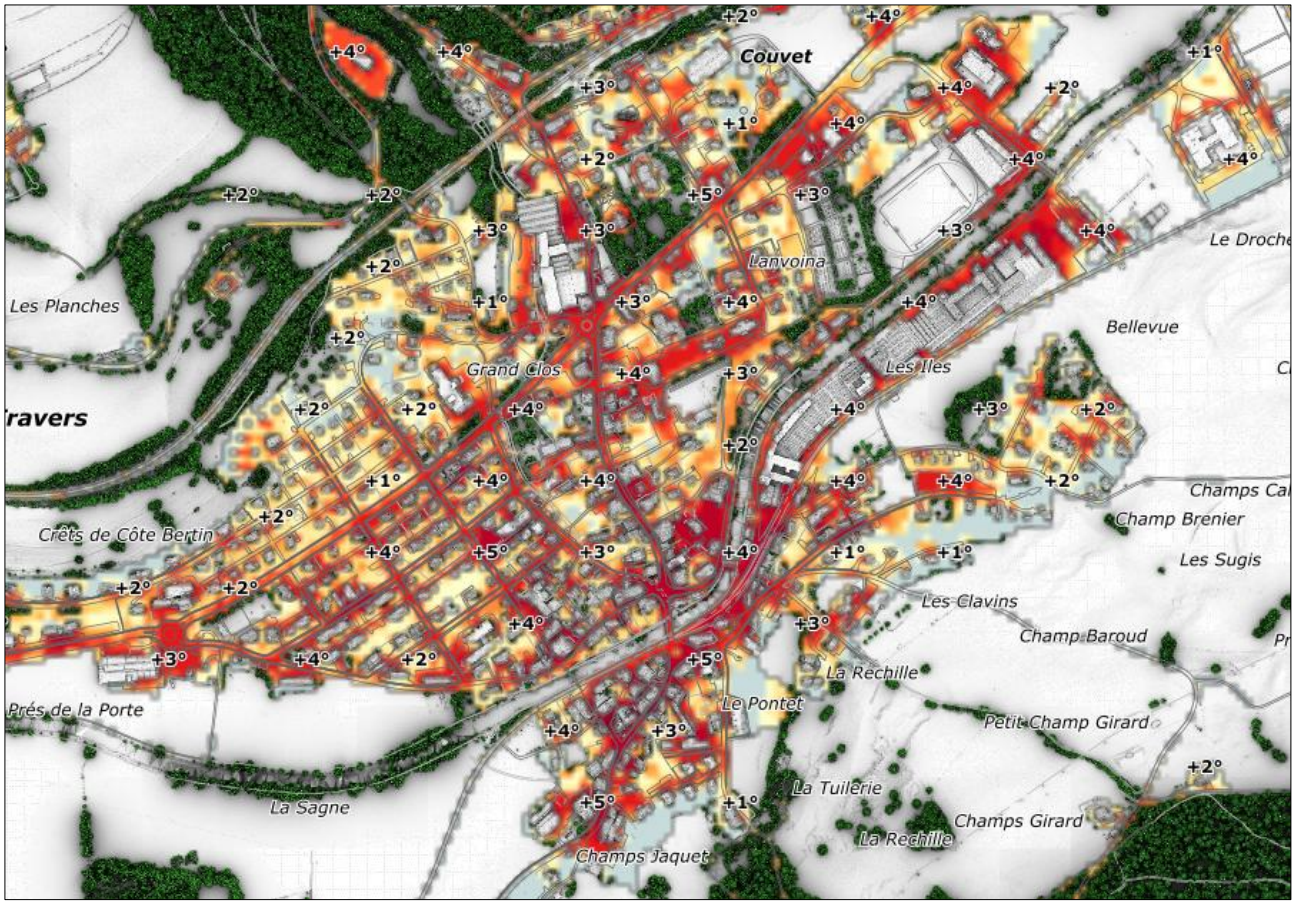


Figure 42 – Effet d'îlot de chaleur à Couvet, période P0

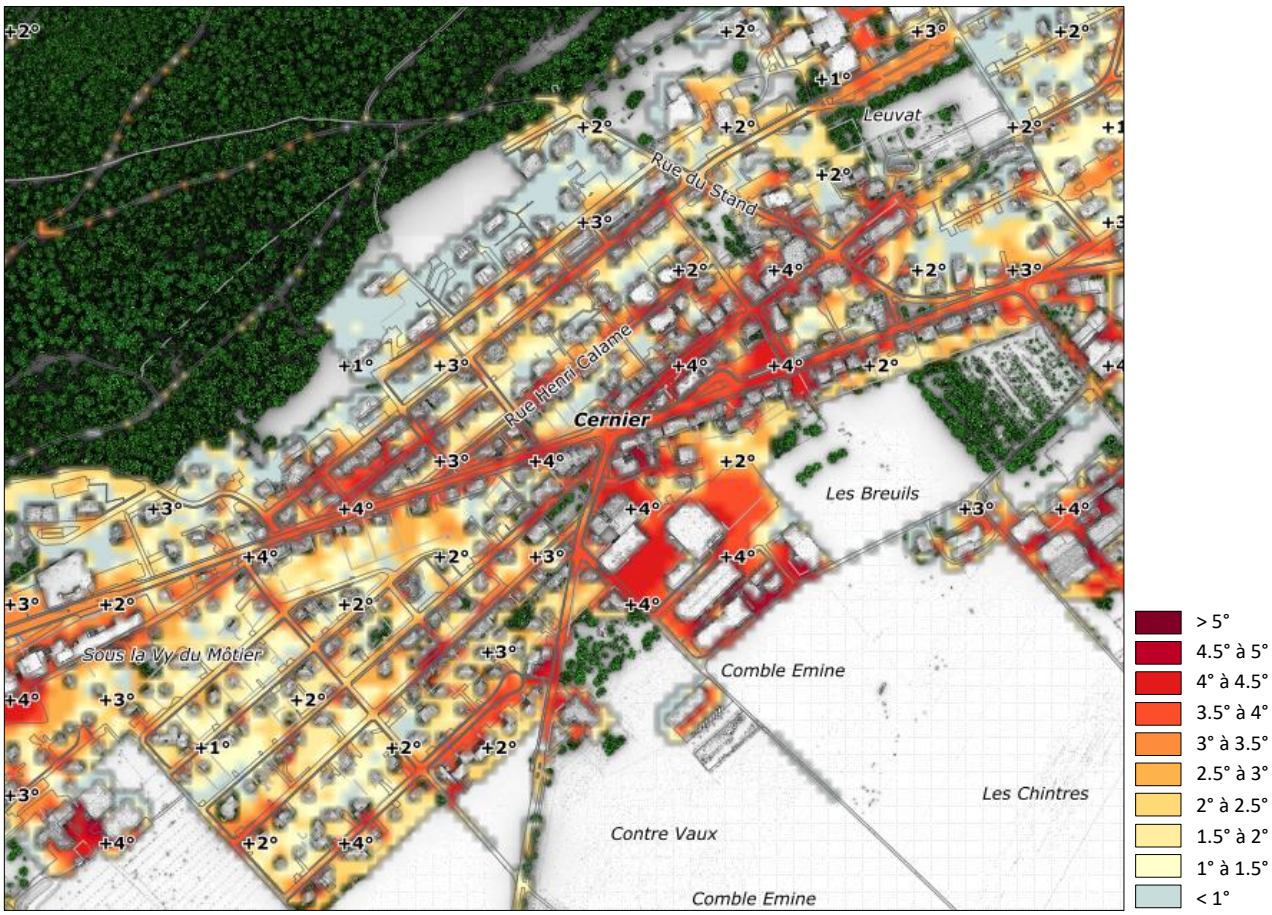


Figure 43 – Effet d'îlot de chaleur à Cernier, période P0

4.2.3 Courants d'air froid

Rappel : la vitesse et la direction du vent ainsi que la densité du débit d'air froid permettent de décrire les mouvements d'air froid nocturnes qui ventilent les zones urbaines. Ces données, couplées aux données de taux de production d'air froid, d'altimétrie et d'occupation des sols ont permis d'identifier les principales zones de production et d'impact d'air froid ainsi que les principales trajectoires d'écoulement de l'air froid.

4.2.3.1 ÉTAT DES LIEUX À P0

4.2.3.1.1 VITESSE DU VENT ET DENSITÉ DU DÉBIT D'AIR FROID

Ci-dessous sont décrits les principaux phénomènes de vents, à l'échelle d'une région ou d'une commune. Les phénomènes de très petite étendue, par exemple le vent dans une avenue, ne sont pas explicités. Ces informations peuvent toutefois être trouvées dans les rasters des vents[16], qui donnent une valeur de vitesse et de direction du vent pour chaque pixel.

La vitesse du vent est influencée par plusieurs facteurs.

- ***La pente***

La carte ci-dessous montre les vents d'une vitesse supérieure à 0.5 m/s (*Figure 44*).

Les vents les plus forts, avec des valeurs supérieures à 2 m/s, se situent en bas des pentes les plus grandes et les plus prononcées. C'est par exemple le cas à l'ouest du Val-de-Ruz avec des courants en provenance du Mont Racine et de Tête de Ran, aux abords de Lignières et du Landeron avec des vents en provenance de Chasseral et de Serroue ou encore dans les villages de la Grande Béroche avec des vents en provenance de la Montagne de Boudry. Des vents forts sont également présents au-dessus du lac, au niveau de La Grande Béroche, Bevaix, Monruz, Hauterive et Saint-Blaise.

Les vents un peu plus faibles, avec des valeurs entre 1 et 2 m/s, sont présents dans tous les villages entourés de collines ou de coteaux, comme c'est le cas dans de nombreux endroits du canton : au Val-de-Travers ainsi que dans les villages situés plus à l'ouest, dans tous les villages du Val-de-Ruz, dans les vallées de La Sagne et de La Brévine, dans la périphérie du Locle et de La Chaux-de-Fonds, dans les villages de l'Entre-Deux-Lacs, à Rochefort, ainsi que dans plusieurs localités du littoral comme Bevaix, Boudry, Cortaillod, Corcelles-Cormondrèche ou Saint-Blaise. Ces vents sont également présents au-dessus du lac, à la hauteur de Milvignes et de la ville de Neuchâtel.

Les vents plus faibles, avec des valeurs entre 0.5 et 1 m/s, sont présents aux abords de toutes les communes, y compris Neuchâtel.

Les vents plus faibles ne sont pas illustrés ici. En dessous de 0.1 m/s, le vent n'est pas considéré comme efficace pour rafraîchir une zone (Oke, 1987).

La majorité du temps, la vitesse du vent est corrélée à la densité du débit d'air froid. Ainsi, les débits d'air froid les plus élevés, avec des valeurs de l'ordre de 150 $m^3/(m \cdot s)$, se situent là où les vitesses de vent sont les plus élevées.

[16] Données disponibles sur demande.

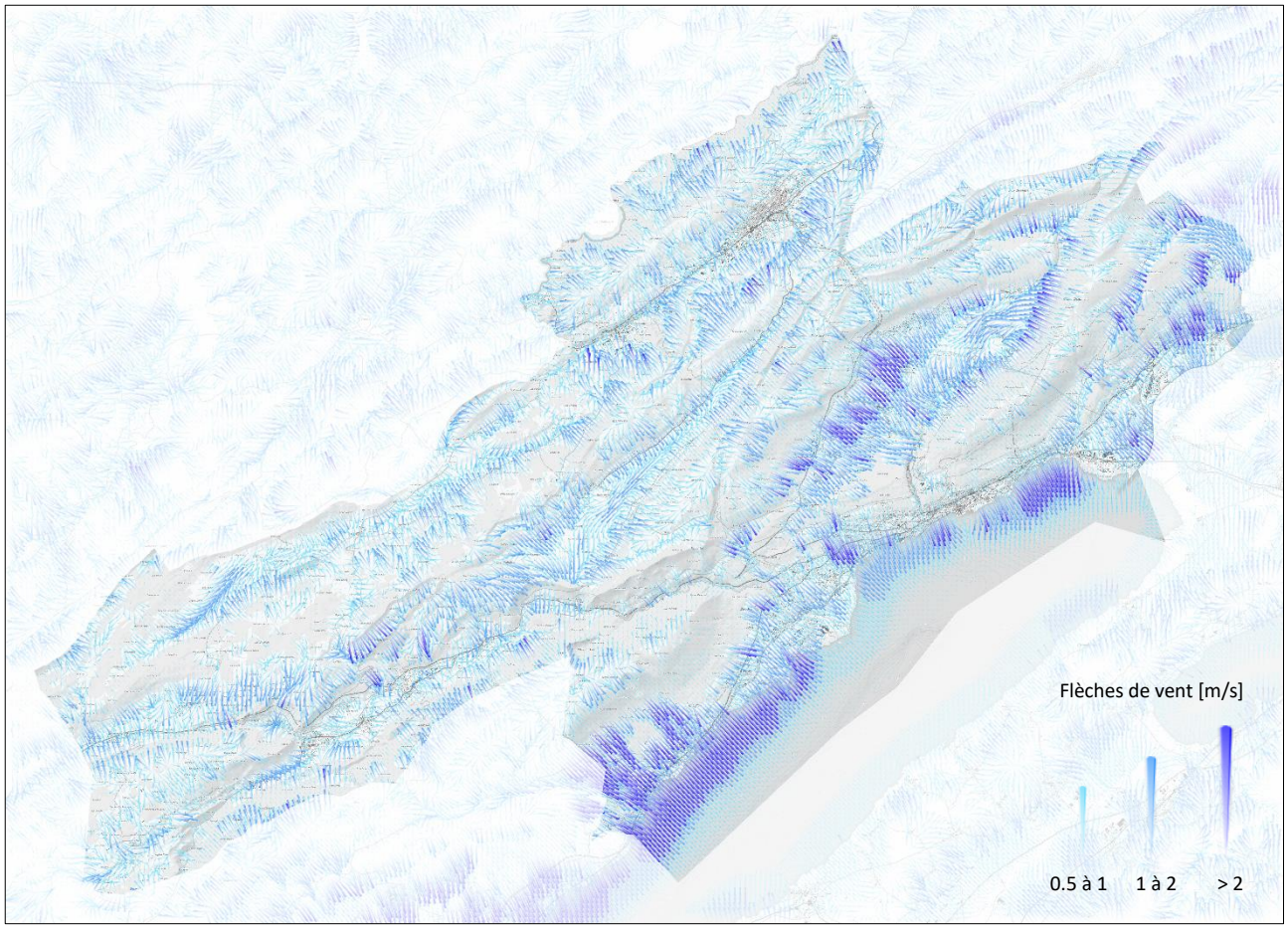


Figure 44 – Flèches des vents supérieurs à 0.5 m/s, agrégées à 200 m, période P0

- ***La rugosité***

Les collines et montagnes du canton sont majoritairement boisées, ce qui réduit la vitesse du vent dans ces endroits, calculée à 2 m au-dessus du sol. Dans les forêts du canton, la vitesse du vent est généralement sous le seuil de 0.3 m/s et la densité du débit d'air froid est inférieure à 20 $m^3/(m \cdot s)$, comme celles de Chaumont, des hauteurs de Boudry ou des hauteurs de Brot-Dessous. Le transport d'air froid y est ralenti, mais n'est pas complètement arrêté et il reprend dès que la rugosité diminue.

Dans les zones urbanisées, le vent est en général plus faible, de même que le débit d'air froid, mais cela reste très variable d'une zone à une autre. Ci-dessous, deux cas sont présentés : Bevaix (*Figure 45*) et la partie ouest du Val-de-Ruz (*Figure 46*).

À Bevaix, on observe que le débit d'air froid et le vent sont faibles au nord-ouest du village, dans la zone boisée. Lorsque la rugosité diminue, la vitesse du vent et le débit augmentent (au niveau des Champs Légers et de la Combe de Vauroux). Aux abords du village, le débit d'air froid se maintient puis diminue au plein centre du village. L'air froid pénètre bien dans toute la moitié nord-ouest du village.

Des observations similaires peuvent être faites au Val-de-Ruz. L'air froid, très ralenti dans les pentes boisées du Mont Racine et de Tête de Ran, gagne en force au sortir de la forêt. Il trouve alors un passage privilégié entre les villages, dans les zones soit complètement dégagées, comme entre Les Hauts-Geneveys et Fontainemelon, soit dans des zones moins denses et moins larges, comme entre Fontainemelon et Cernier, ou entre Cernier et Chézard-Saint-Martin. Le vent et le débit d'air froid gagnent en intensité entre les Hauts-Geneveys et Fontaines, ce qui permet à l'air froid de pénétrer largement dans le village de Fontaine. La partie ouest de Fontainemelon et la partie nord-ouest de Chézard-Saint-Martin sont très bien pénétrées par l'air froid tandis que les centres des Hauts-Geneveys et de Cernier le sont très peu.

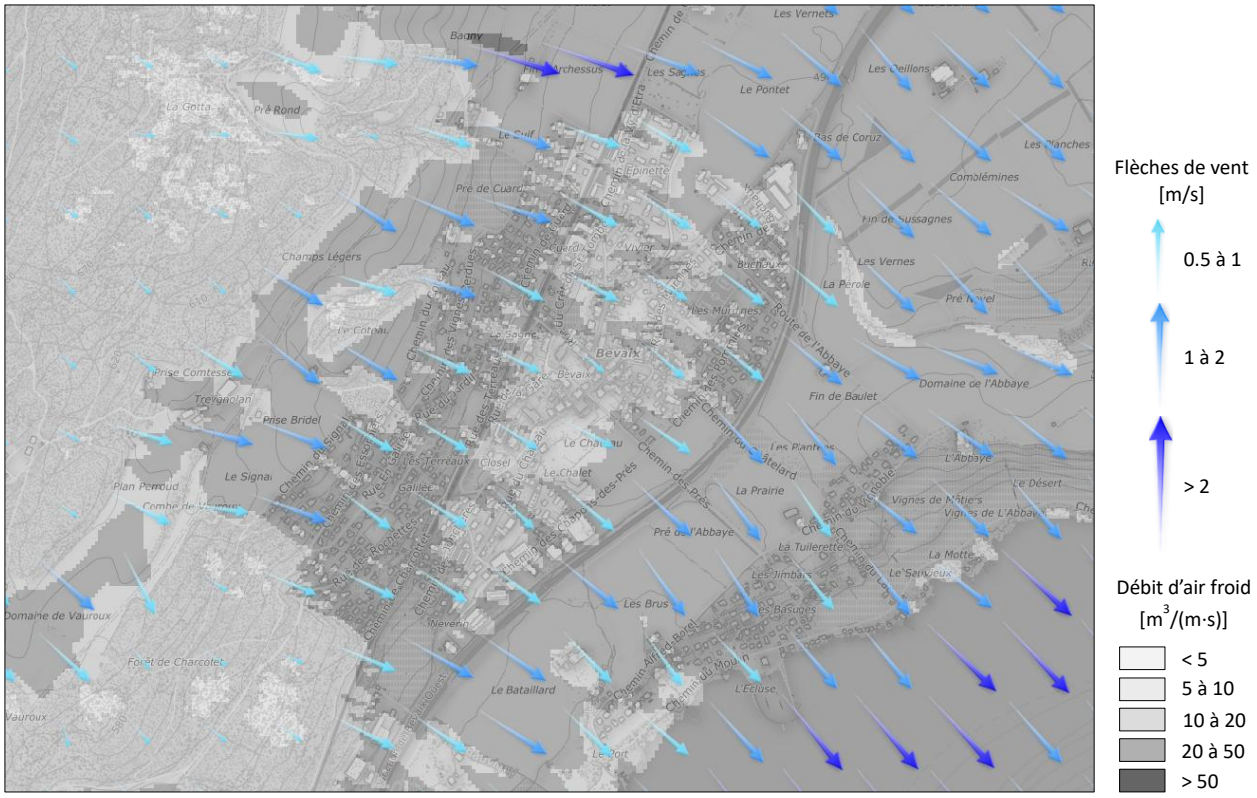


Figure 45 – Débit d'air froid et vents supérieurs à 0.5 m/s à Bevaix, période P0

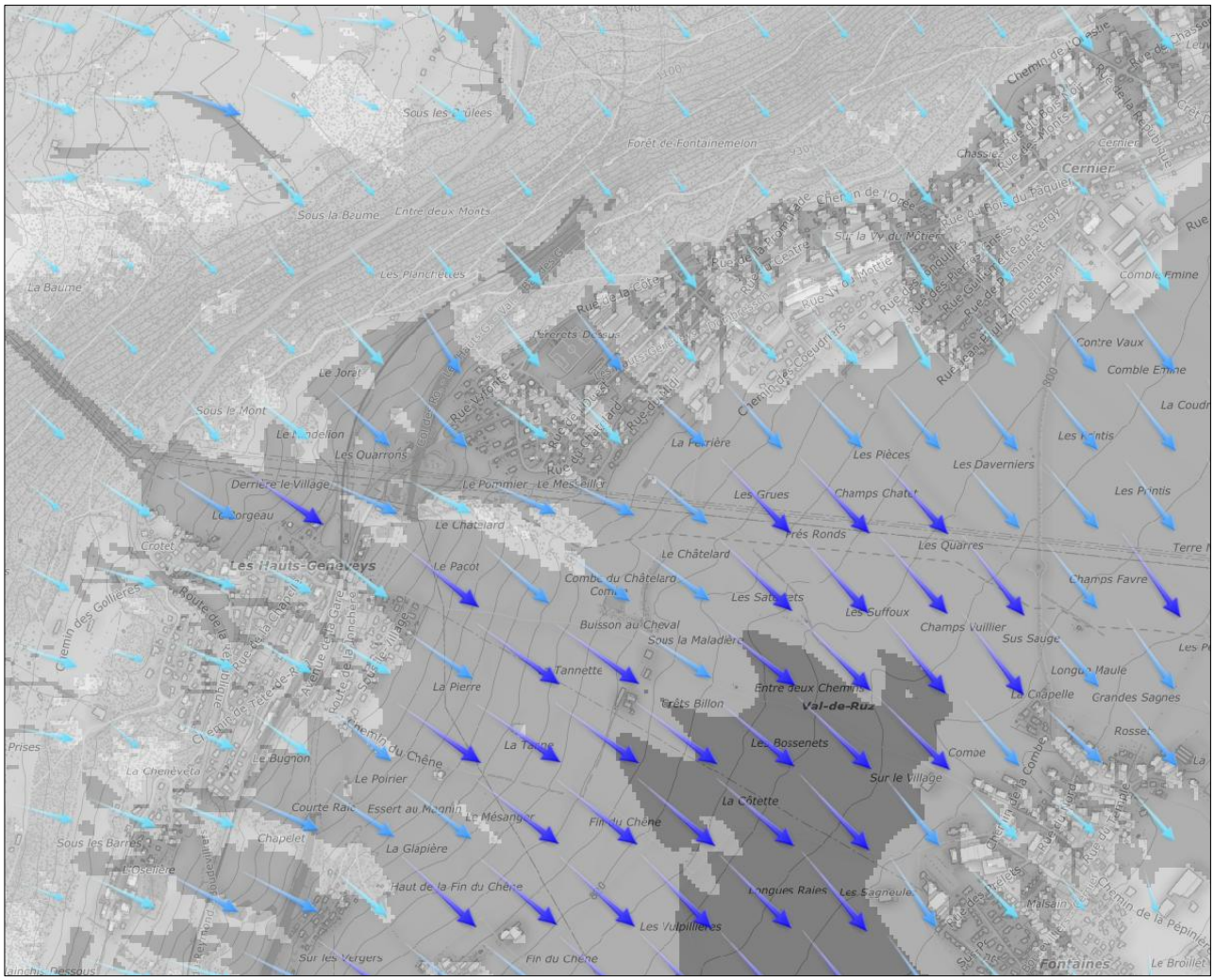


Figure 46 – Débit d'air froid et vents supérieurs à 0.5 m/s au Val-de-Ruz, période P0

4.2.3.1.2 ZONES DE PRODUCTION D'AIR FROID

Ci-dessous, la carte des zones de production d'air froid du canton (*Figure 47*) montre que ces zones sont nombreuses, en raison des larges espaces occupés par des terres agricoles et des forêts.

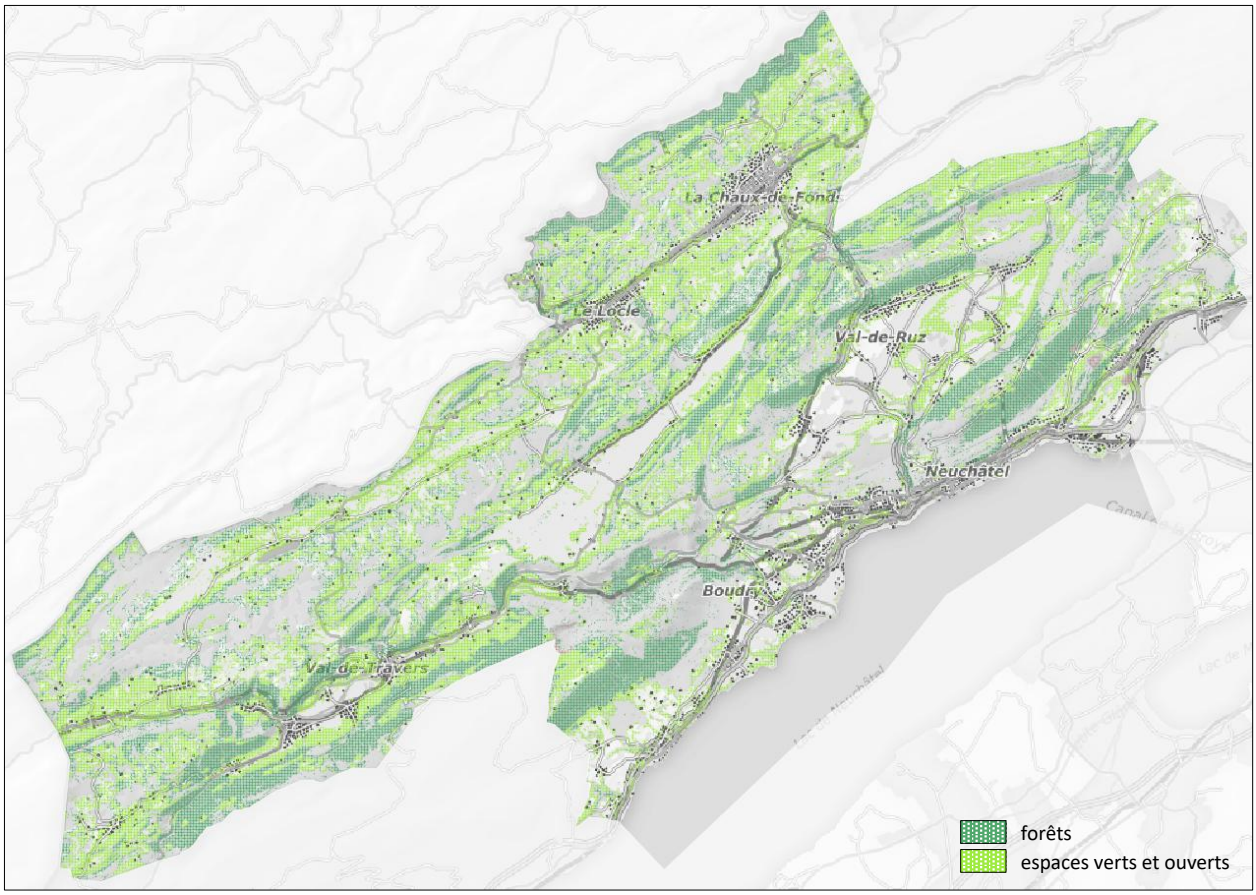


Figure 47 – Zones de production d'air froid, période P0

4.2.3.1.3 TRAJECTOIRES D'ÉCOULEMENT D'AIR FROID

Les couloirs d'air froid sont souvent situés aux abords des communes. Étant donné que les brises de pentes sont fréquentes dans le canton, les couloirs d'air froid sont particulièrement nombreux. C'est par exemple le cas à La Chaux-de-Fonds, à cause de la structure des espaces bâtis et la situation du centre-ville (situé dans la vallée).

Les zones d'écoulement d'air froid sont nombreuses dans le canton en raison de la topographie et de la présence du lac, qui induisent des brises de pente et des brises de terre importantes. Elles ont souvent lieu en amont des zones urbanisées, comme c'est le cas dans les hauts de Saint-Aubin, Corcelles-Cormondrèche ou Neuchâtel, mais aussi dans les espaces ouverts du littoral, proches des espaces bâtis, par exemple à Bevaix, Boudry ou Marin-Epagnier. Sur le littoral, la brise de terre et la brise de pente se superposent.

La plupart des brises de parc se superposent à un ou plusieurs autres types de brise, plus puissantes, rendant ces premières difficiles à identifier. Ainsi, seuls deux espaces verts urbains montrent un transport d'air froid significatif vers les constructions environnantes, l'un dans le quartier du Mail à Neuchâtel, et l'autre derrière la salle polyvalente du Locle à la Route du Communal.

4.2.3.1.4 ZONES D'IMPACT D'AIR FROID

La carte des zones d'impact d'air froid (*Figure 48*) montre qu'un grand nombre de communes sont bien traversées par de l'air froid. Ce sont surtout les centres très denses qui n'en bénéficient pas, tels que Neuchâtel, Le Locle ou La Chaux-de-Fonds. Certains villages sont également peu ventilés, comme Couvet,

Môtiers, La Brévine, Les Verrières ou la Côte-aux-Fées. Sur le littoral par exemple, la situation est très variable avec Corcelles-Cormondrèche qui est très ventilé alors que les centres de Peseux ou de Neuchâtel le sont très peu (*Figure 49*).

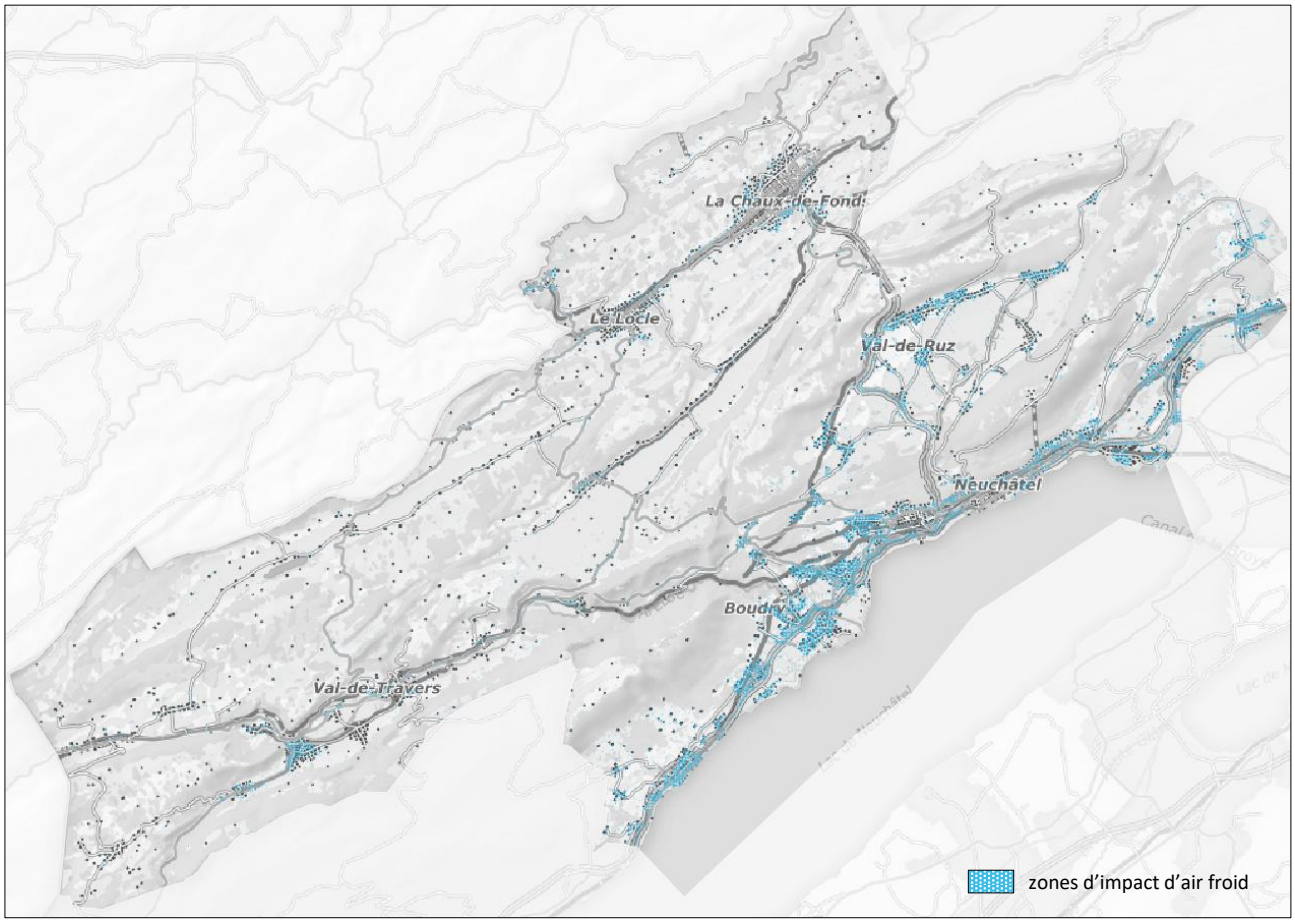


Figure 48 – Zones d'impact d'air froid, période P0



Figure 49 – Zones d'impact d'air froid sur le littoral entre Corcelles-Cormondrèche et Neuchâtel, période P0

4.2.3.2 ÉVOLUTION DE P0 À P3

Pour les périodes futures, le champ de vent et le débit d'air froid changent peu par rapport à P0. Les principaux changements hors des secteurs de développement sont liés à la prédiction que la hauteur de la canopée va globalement diminuer (voir partie *3.1.3.4.1*). Cette réduction de la rugosité favorise le transport de l'air froid. En conséquence, la vitesse du vent et le débit d'air froid augmentent légèrement à partir de P1.

4.2.3.3 EFFETS DU DÉVELOPPEMENT URBAIN

Dans les secteurs de développement urbain, l'implantation aléatoire des bâtiments ne permet qu'une modélisation approximative, car la disposition concrète des obstacles à l'écoulement (bâtiments, arbres, talus) exerce une influence directe sur les flux d'air. Les conséquences des futurs développements urbains sur l'écoulement de l'air froid doivent être analysées de façon plus détaillée, selon l'implantation réelle des bâtiments, car cela offre des perspectives d'optimisation intéressante.

Dans les résultats, la rugosité nouvellement présente à P1 dans les secteurs de développement urbain altère l'écoulement d'air, ce qui peut réduire le vent de manière significative (réduction de 10 % ou plus) dans un périmètre allant jusqu'à 500 m. Dans certains cas, des couloirs d'air froid disparaissent, comme à La Chaux-de-Fonds. Dans d'autres cas, le débit d'air froid change simplement de trajectoire et contourne les nouvelles constructions comme à Boudry, ce qui peut localement canaliser l'air et augmenter le débit d'air froid jusqu'à 20 %. À l'échelle du canton, les développements n'ont toutefois qu'un faible impact sur la ventilation nocturne car les flux d'air froid sont principalement dus à la pente et au lac, qui induisent des brises d'une force suffisante pour perdurer malgré une augmentation de la rugosité.

4.2.4 Synthèse et analyse de la situation nocturne

Les résultats de la température nocturne indiquent que plusieurs facteurs l'influencent.

- L'altitude : il fait globalement plus frais dans le haut du canton.
- L'occupation du sol : les espaces verts rafraîchissent beaucoup durant la nuit, surtout s'ils sont dégagés, comme les terres agricoles. En forêt, la canopée réduit le débit d'air froid à 2 m du sol. Les zones urbanisées restent globalement plus chaudes.
- La structure urbaine : les zones urbanisées de faible rugosité sont plus fraîches.

Cela s'explique par l'effet d'îlot de chaleur, qui induit une surchauffe des zones urbanisées, en raison, d'une part, de leur fort degré d'imperméabilisation (les matériaux restituent la chaleur), et, d'autre part, de la structure urbaine qui fait souvent obstacle aux courants d'air dans les zones urbanisées (l'air froid ne parvient pas jusqu'aux centres urbains).

En termes d'échanges d'air froid, la topographie du canton favorise les brises de pentes, qui bénéficient à la plupart des communes. En effet, les zones urbanisées du canton sont, globalement, peu étendues dans le sens de la pente (p.ex. le littoral s'étend davantage de sud-ouest en nord-est que de nord-ouest en sud-est, qui est le principal sens de la pente). Cela permet à l'air froid issu des brises de pente de relativement bien pénétrer la majorité des localités. Seuls les centres denses sont peu ventilés (Neuchâtel, Le Locle, La Chaux-de-Fonds).

Le dérèglement climatique a un impact important sur les températures nocturnes, qui subissent une augmentation générale de P0 à P3. En particulier, la part de la zone urbanisée concernée par des nuits tropicales, qui est de 0 % à P0, augmente pour atteindre 5 % à P1, 15 % à P2 et 36 % à P3. À P3, les seuls espaces du littoral qui restent en dessous des 20°C sont les espaces verts. Le dérèglement climatique a toutefois peu d'influence sur les échanges d'air froid. La réduction de la hauteur de la canopée prévue à partir de P1 impacte légèrement l'écoulement d'air, en provoquant une augmentation du débit d'air froid au-dessus des forêts.

L'effet d'îlot de chaleur n'est pas lié au changement climatique mais à la structure urbaine, il existe déjà à P0 et dans toutes les villes. Avec le dérèglement climatique, l'effet d'îlot de chaleur changera peu car les températures vont augmenter aussi bien dans les zones urbanisées que les espaces verts et ouverts. Dans les secteurs de développement urbain, l'implantation des bâtiments devra prendre en compte les courants nocturnes afin de préserver au maximum leurs fonctions climatiques actuelles et limiter la surchauffe nocturne des zones urbanisées.

4.3 CARTES D'ÉVALUATION BIOCLIMATIQUE

4.3.1 Évaluation des espaces d'action

La légende de la situation bioclimatique relative des espaces d'action est disponible ci-dessous (*Tableau 23*).

Situation bioclimatique relative	**Description pour la situation diurne**	**Description pour la situation nocturne**
Largement meilleure que la moyenne	Espace* où la PET à 14h est nettement inférieure à la moyenne cantonale*	Espace* où la température à 4h est nettement inférieure à la moyenne cantonale*
Meilleure que la moyenne	Espace* où la PET à 14h est inférieure à la moyenne cantonale*	Espace* où la température à 4h est inférieure à la moyenne cantonale
Dans la moyenne	Espace* où la PET à 14h est dans la moyenne cantonale	Espace* où la température à 4h est dans la moyenne cantonale*
Moins bonne que la que la moyenne	Espace* où la PET à 14h est supérieure à la moyenne cantonale	Espace* où la température à 4h est supérieure à la moyenne cantonale*
Largement moins bonne que la moyenne	Espace* où la PET à 14h est nettement supérieure à la moyenne cantonale	Espace* où la température à 4h est nettement supérieure à la moyenne cantonale*
**Espace = espace bâti ou espace de transport* **moyenne cantonale = moyenne cantonale du type d'espace considéré*		

Tableau 23 – Légende des cartes de la situation bioclimatique relative des espaces d'action

Les résultats pour les espaces bâtis et les résultats pour les espaces de transport ne peuvent pas être comparés car la moyenne cantonale de référence a été calculée séparément pour ces deux types d'espace. En conséquence, les classes d'évaluation ne correspondent pas aux mêmes températures, que ce soit le jour ou la nuit. Par exemple, la classe « meilleure que la moyenne » de la situation diurne correspond à une PET à 14h comprise entre 31.3 °C et 33.8 °C pour les espaces bâtis, et à une PET à 14h comprise entre 26.9 °C et 30.3 °C pour les espaces de transport.

4.3.1.1 SITUATION DIURNE

4.3.1.1.1 ÉTAT DES LIEUX À P0

Ci-dessous sont présentés des extraits de la carte d'évaluation diurne des espaces de transport et des espaces bâtis à Neuchâtel (*Figure 50, Figure 51*) et au Locle (*Figure 52*, *Figure 53*).

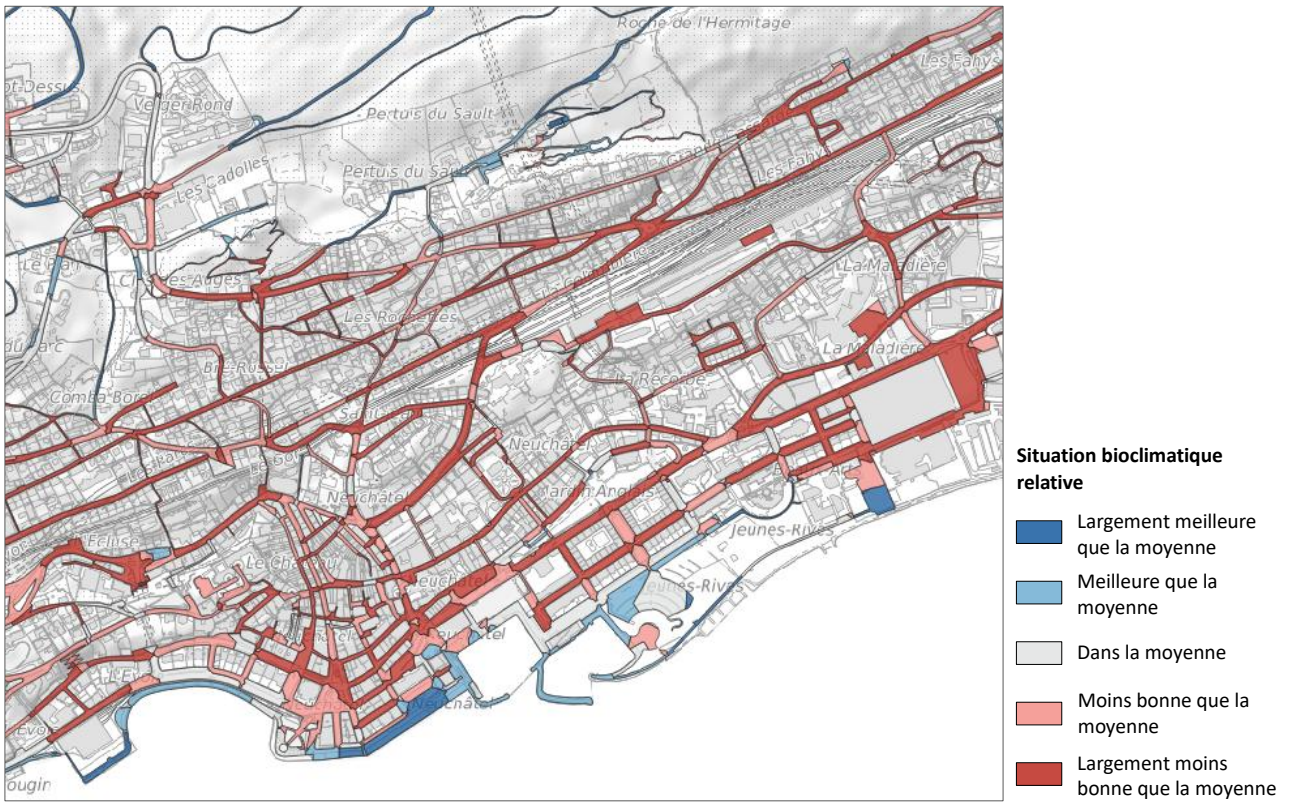


Figure 50 – Évaluation diurne des espaces de transport à Neuchâtel, à P0

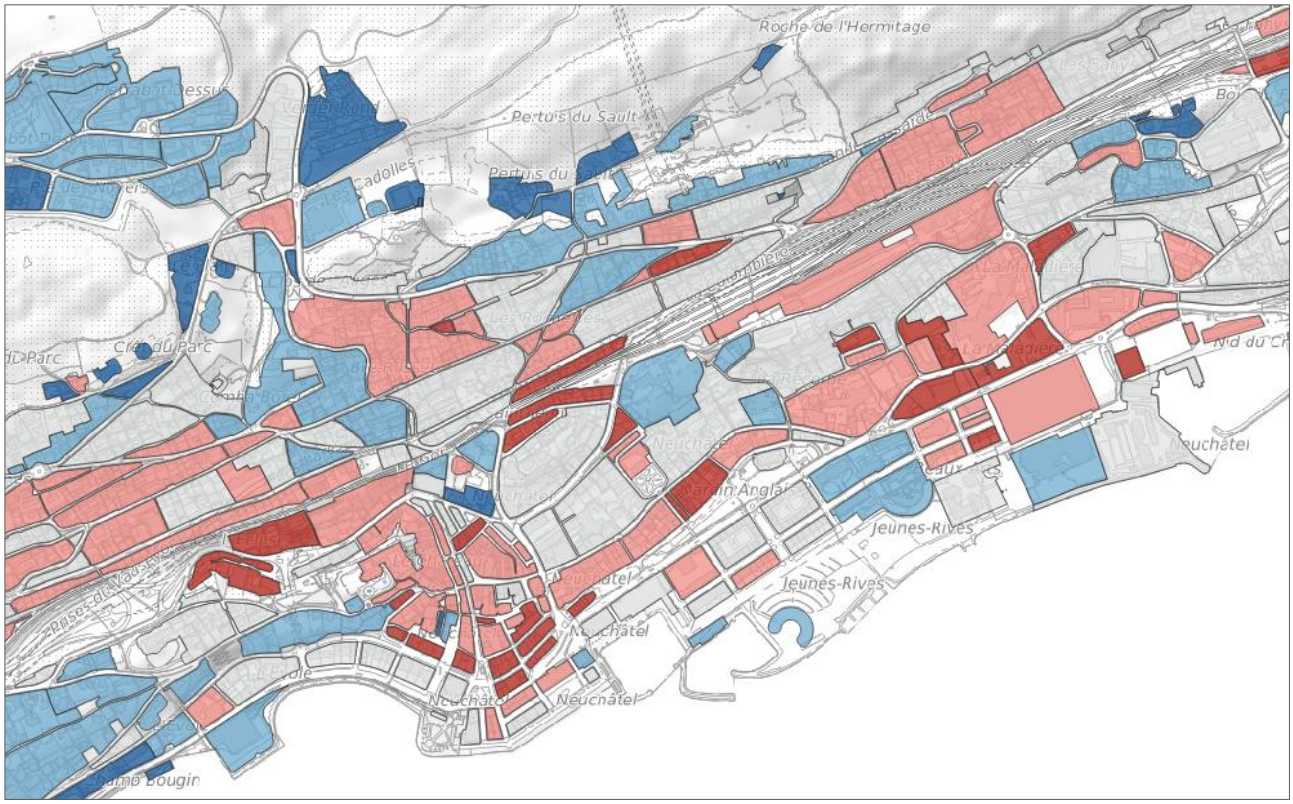


Figure 51 – Évaluation diurne des espaces bâtis à Neuchâtel, à P0

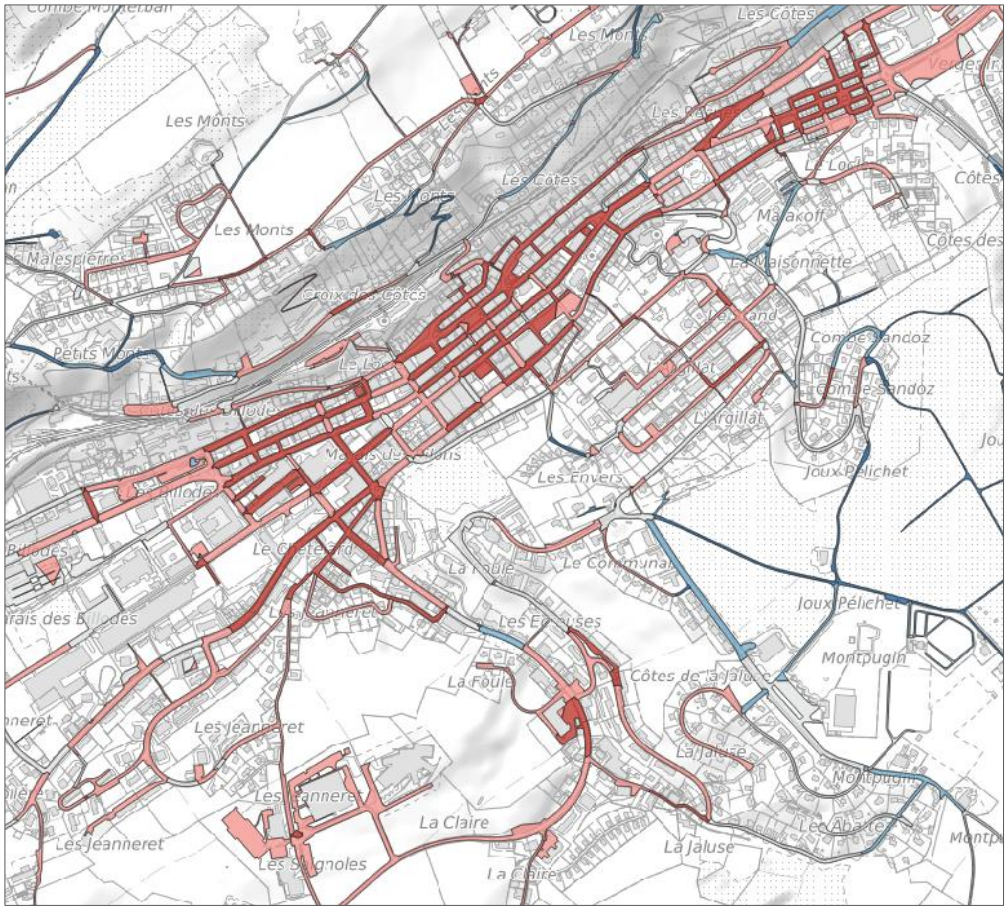


Figure 52 – Évaluation diurne des espaces de transport au Locle, à P0

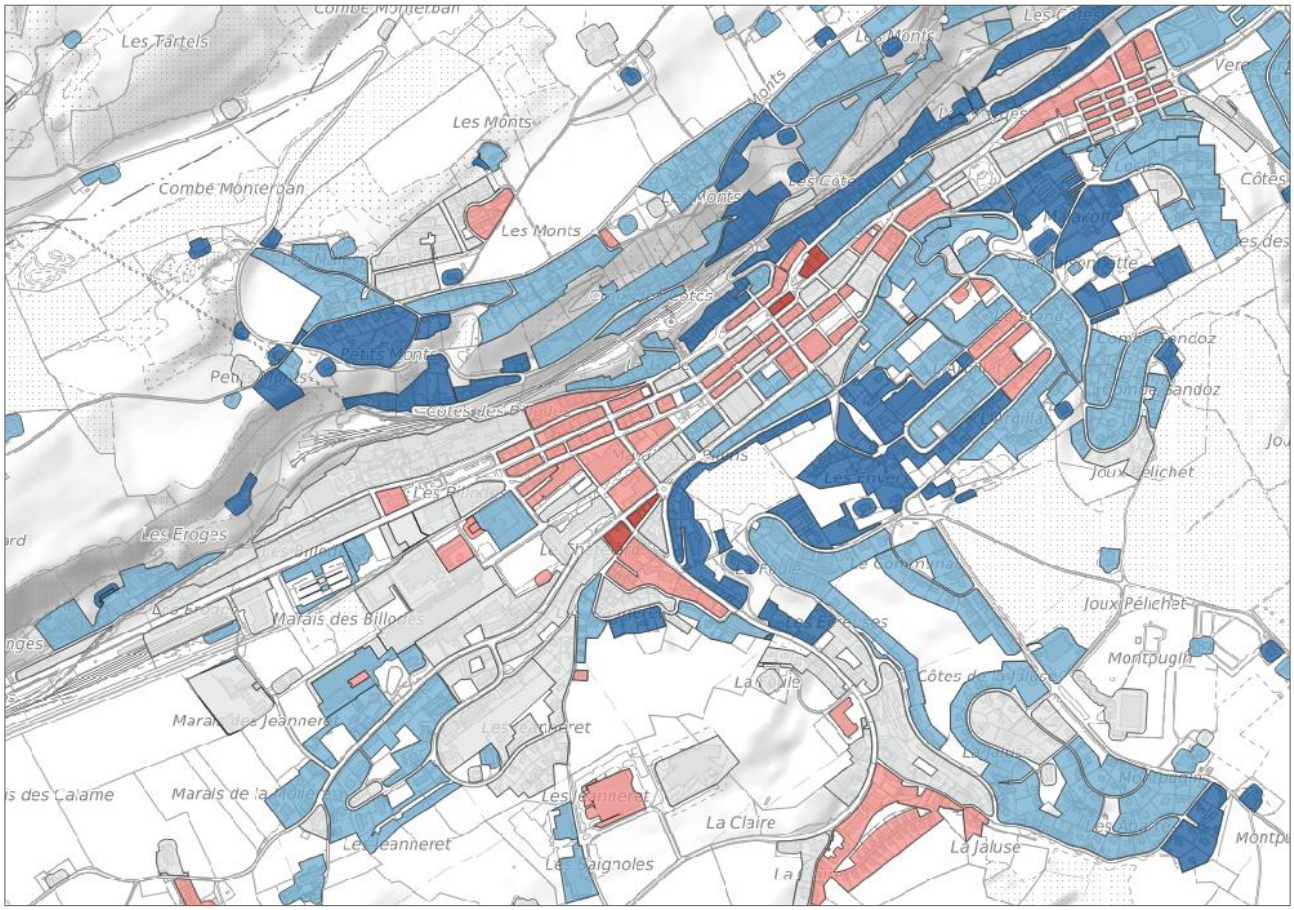


Figure 53 – Évaluation diurne des espaces bâtis au Locle, à P0

4.3.1.1.2 ÉVOLUTION DE P0 À P1

L'évolution de la part de chaque niveau d'évaluation des espaces bâtis entre P0 et P1 est disponible ci-dessous, pour la situation diurne (*Figure 54*).

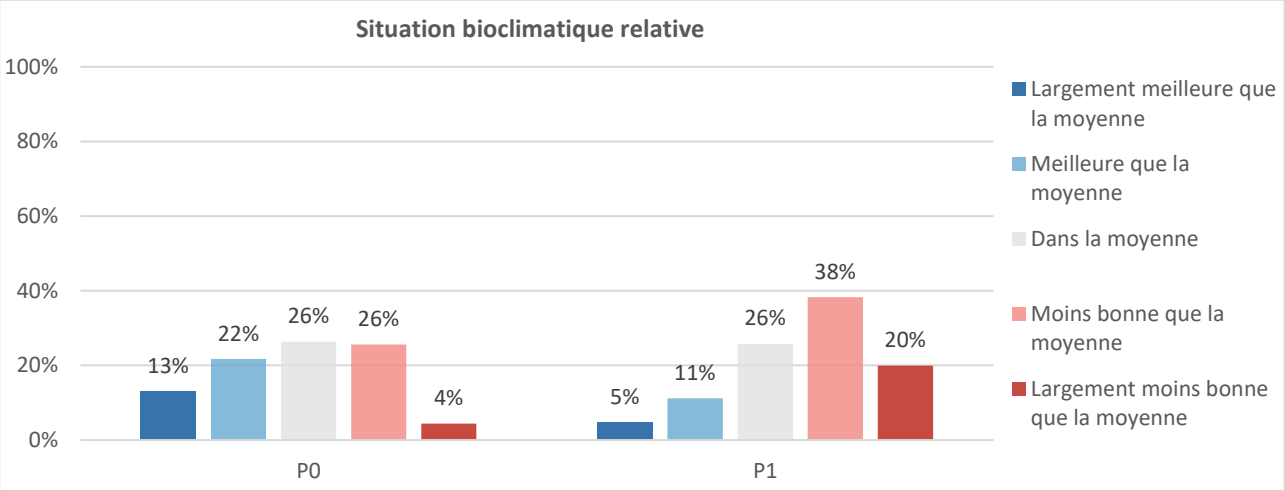


Figure 54 – Histogramme de l'évaluation diurne des espaces bâtis à P0 et P1

Les cartes ci-dessous illustrent l'évolution de la situation bioclimatique relative diurne des espaces bâtis de P0 à P1, pour Neuchâtel (*Figure 55*) et Le Locle (*Figure 56*).

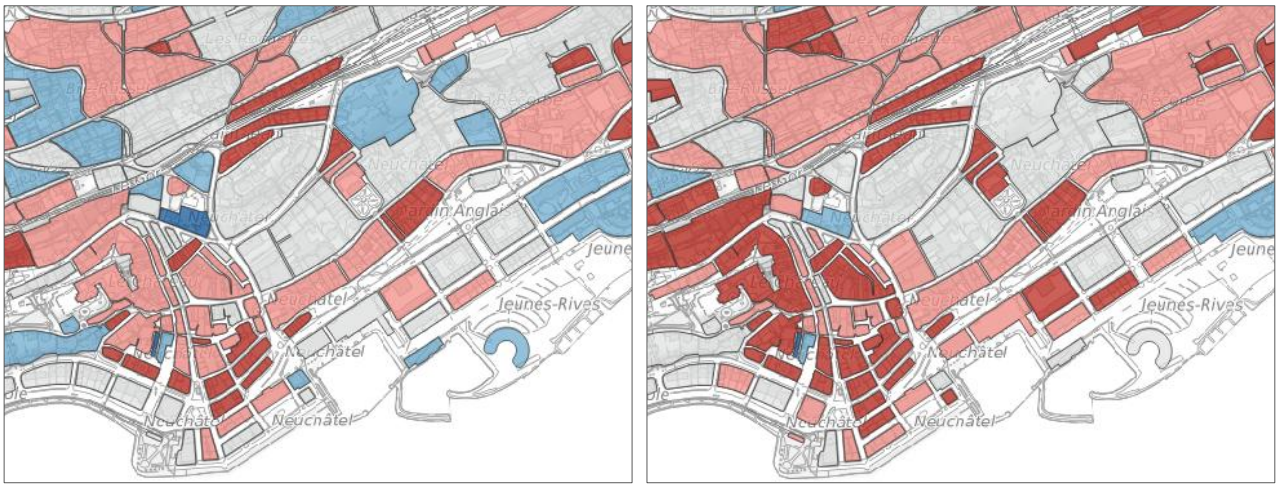


Figure 55 – Situation diurne des espaces bâtis à Neuchâtel, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)

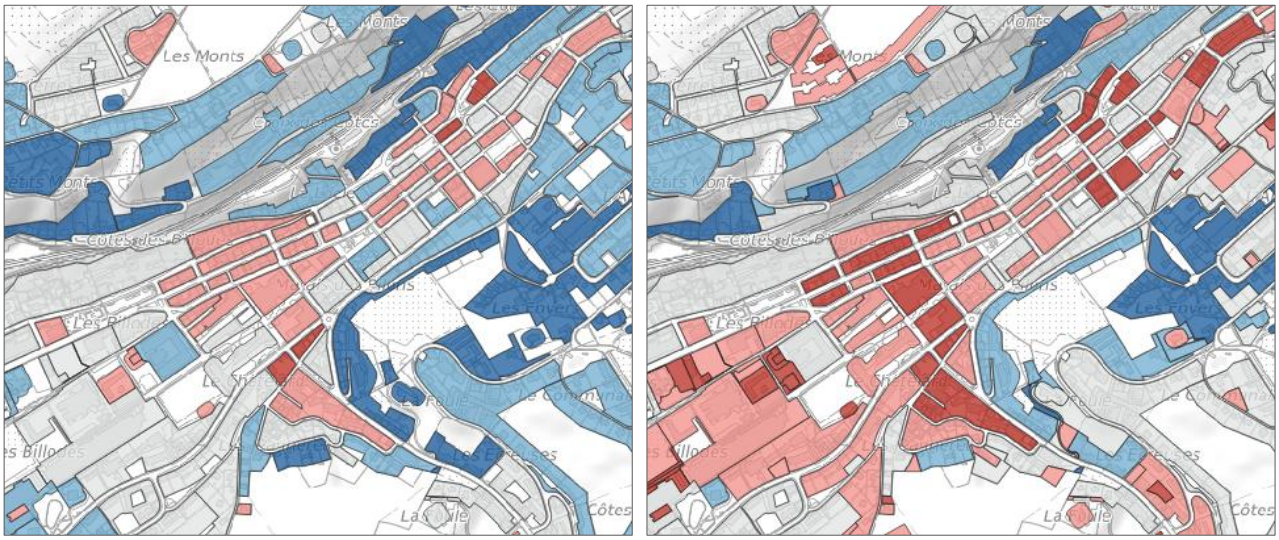


Figure 56 – Situation diurne des espaces bâtis au Locle, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)

4.3.1.2 SITUATION NOCTURNE

4.3.1.2.1 ÉTAT DES LIEUX À P0

Ci-dessous sont présentés des extraits de la carte d'évaluation nocturne des espaces bâtis et des espaces de transport à Neuchâtel (*Figure 57, Figure 58*) et au Locle (*Figure 59*, *Figure 60*). Une hachure permet de distinguer les espaces bâtis non habités (catégorie « autre activité humaine » de la couche d'utilisation du sol), qui présentent un risque moindre dans la situation nocturne étant donné que personne n'y dort.

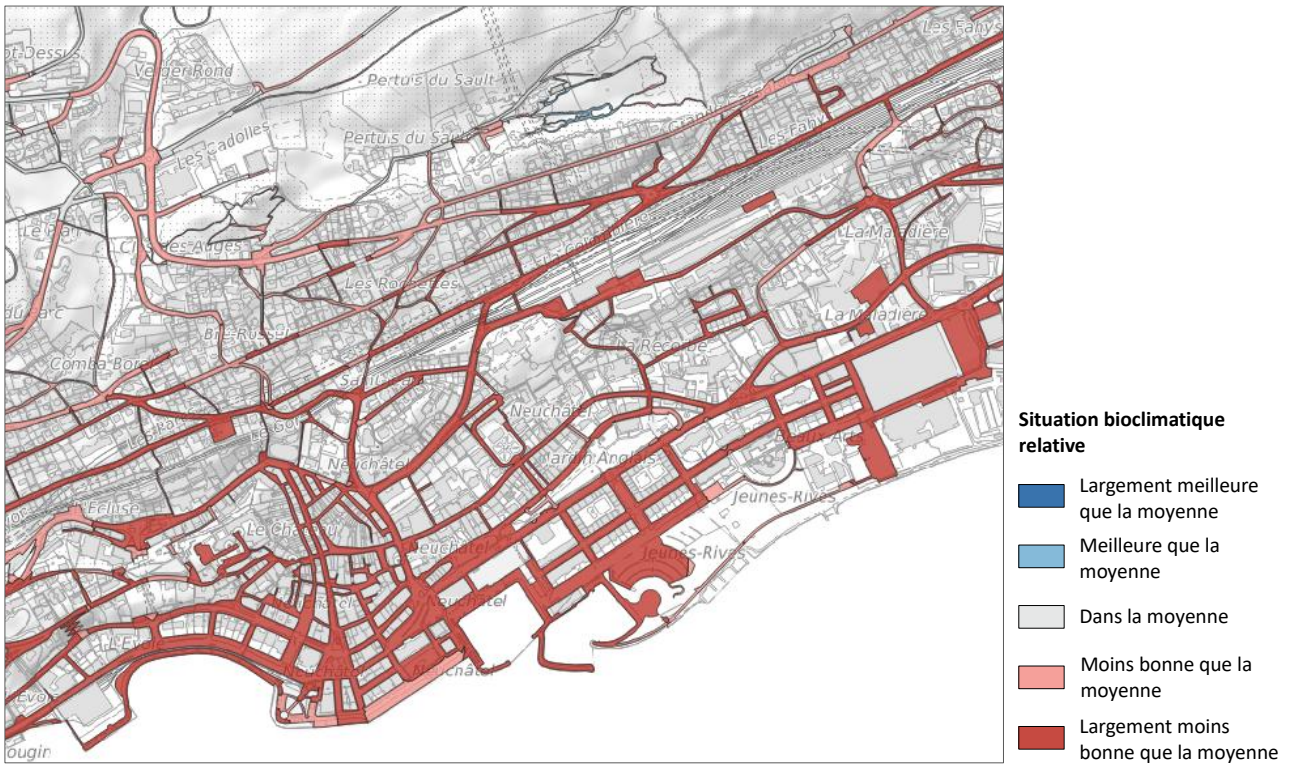


Figure 57 – Évaluation nocturne des espaces de transport à Neuchâtel, à P0

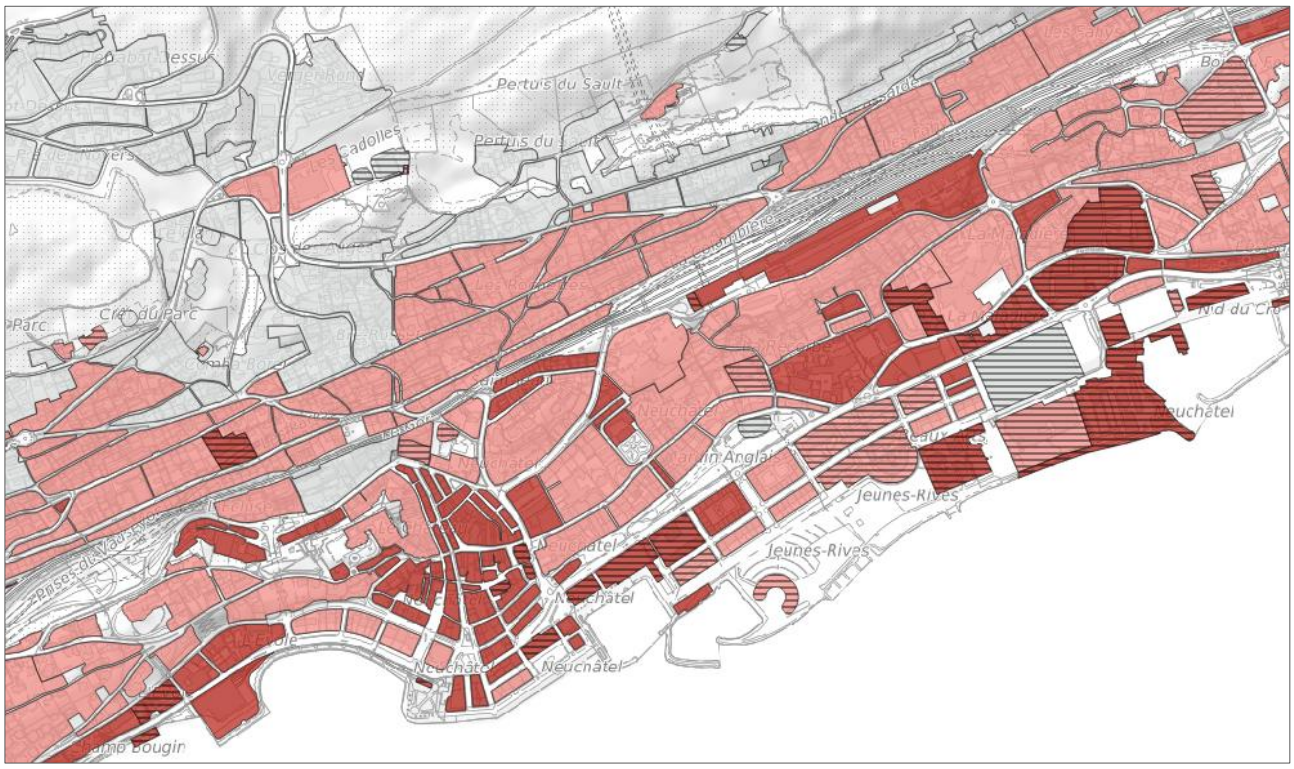


Figure 58 – Évaluation nocturne des espaces bâtis à Neuchâtel, à P0

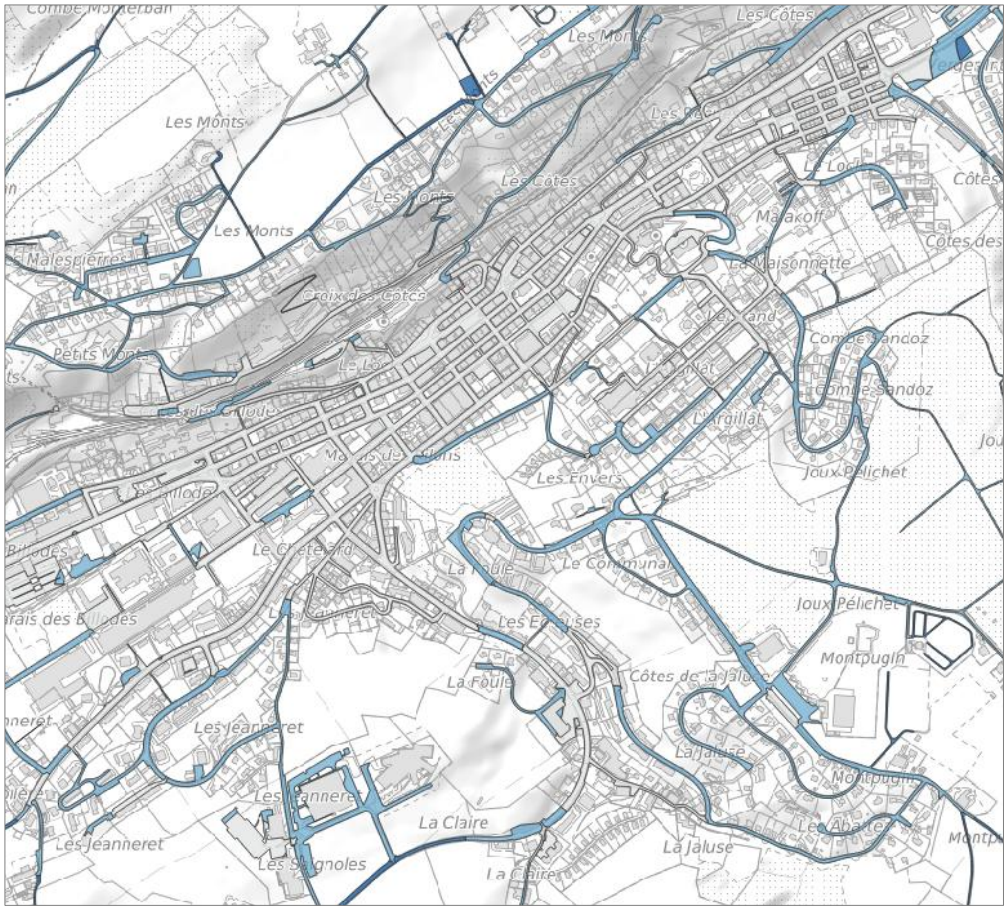


Figure 59 – Évaluation nocturne des espaces de transport au Locle, à P0

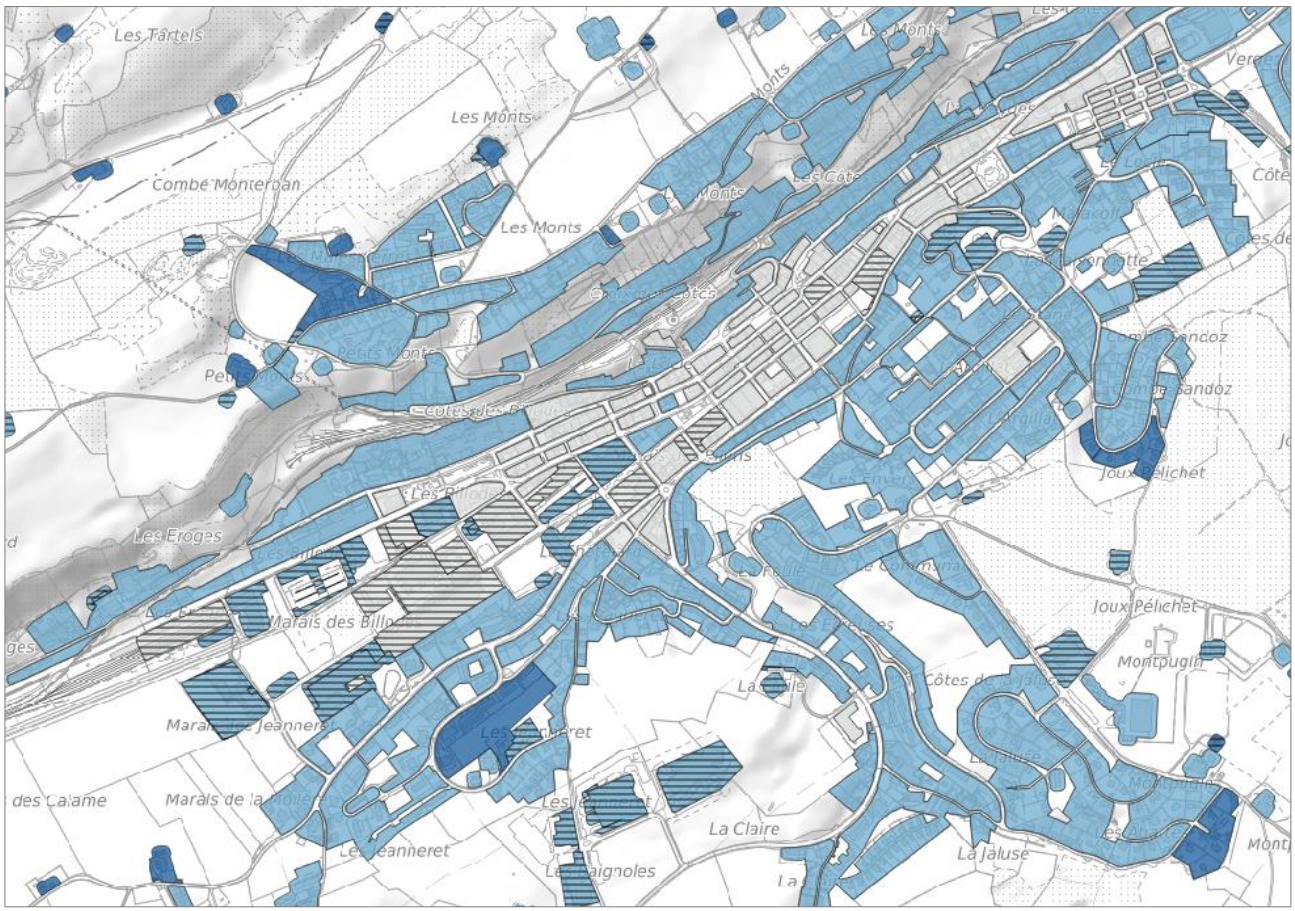


Figure 60 – Évaluation nocturne des espaces bâtis au Locle, à P0

4.3.1.2.2 ÉVOLUTION DE P0 À P1

L'évolution de la part de chaque niveau d'évaluation des espaces bâtis entre P0 et P1 est disponible ci-dessous, pour la situation nocturne (*Figure 61*).

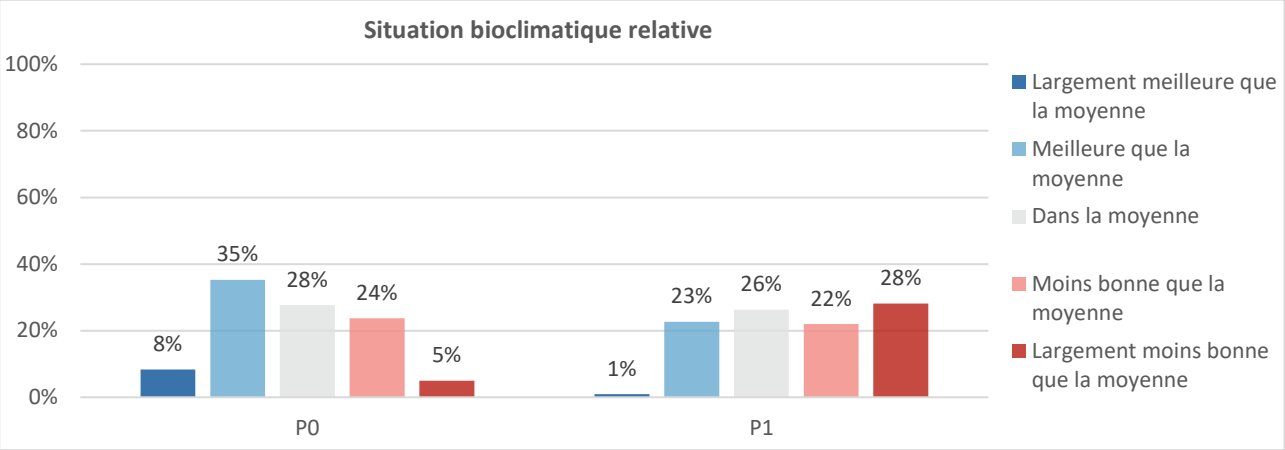


Figure 61 – Histogramme de l'évaluation nocturne des espaces bâtis

Les cartes ci-dessous illustrent l'évolution de la situation bioclimatique relative nocturne des espaces d'action de P0 à P1, pour Neuchâtel (*Figure 62*) et Le Locle (*Figure 63*). Les hachures correspondent aux espaces bâtis non habités.

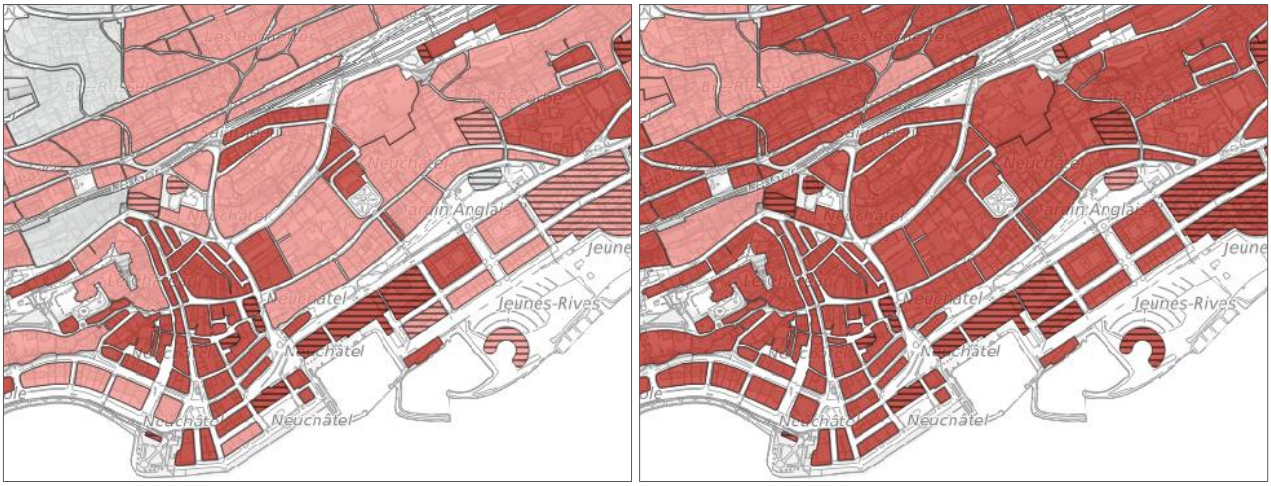


Figure 62 – Situation nocturne des espaces bâtis à Neuchâtel, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)

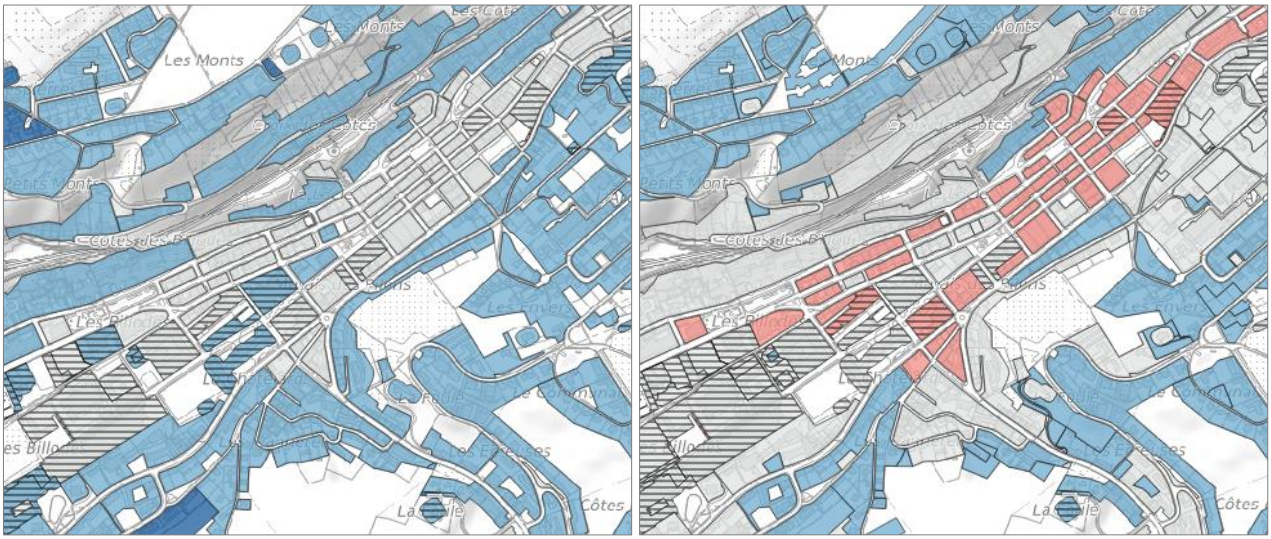


Figure 63 – Situation nocturne des espaces bâtis au Locle, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)

4.3.2 Évaluation des espaces de compensation

4.3.2.1 SITUATION DIURNE

La légende de l'importance bioclimatique diurne des espaces de compensation est disponible ci-dessous (*Tableau 24*).

Importance	Accessibilité	Situation bioclimatique relative	
		de l'espace de compensation	de l'espace d'action le plus proche
Très grande	Très bonne	Largement meilleure que la moyenne	Largement moins bonne que la moyenne
Grande			
Moyenne			
Faible			
Nulle	Mauvaise	Largement moins bonne que la moyenne	Largement meilleure que la moyenne

Tableau 24 – Légende de la carte d'importance bioclimatique diurne des espaces de compensation

4.3.2.1.1 ÉTAT DES LIEUX À P0

Ci-dessous sont présentés des extraits de la carte d'évaluation diurne des espaces de compensation à Neuchâtel (Figure 64) et au Locle (*Figure 65*).

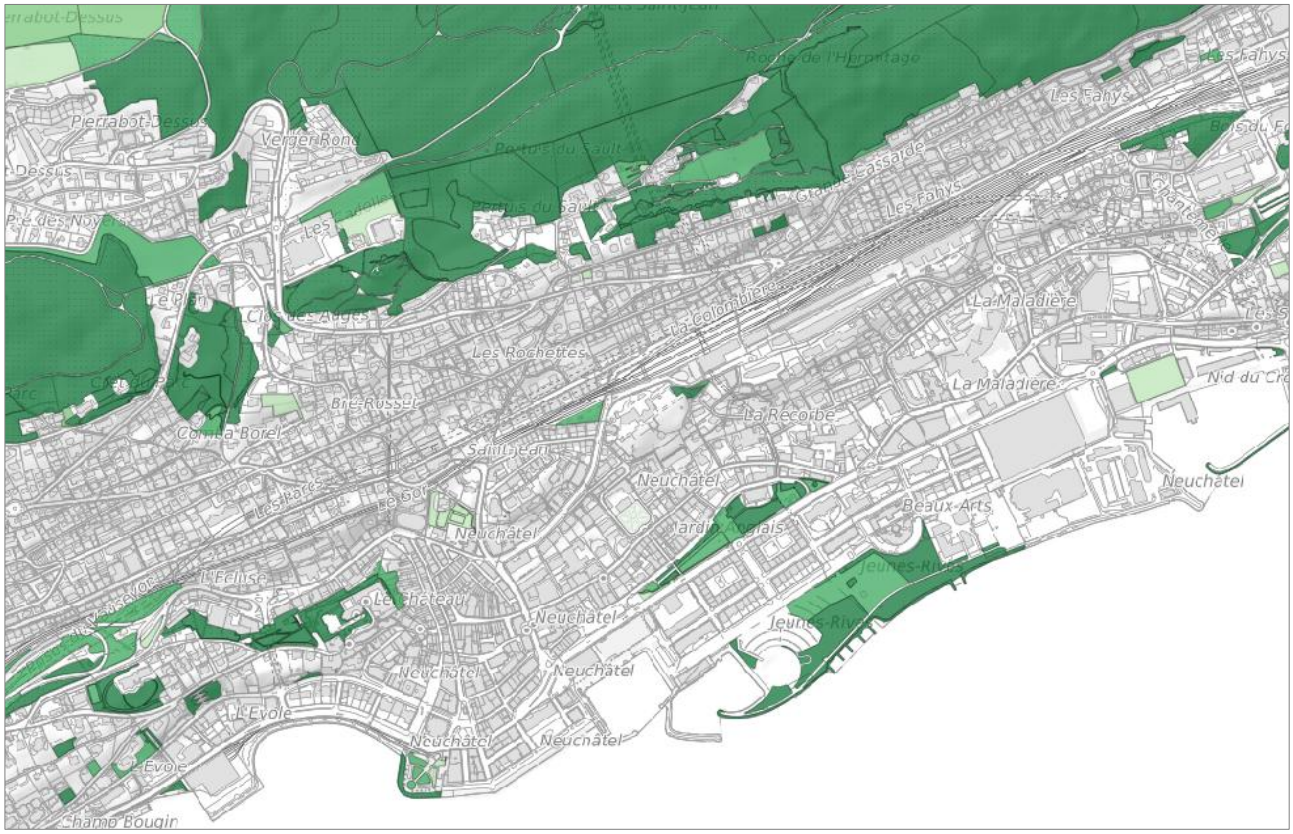


Figure 64 – Évaluation diurne des espaces de compensation à Neuchâtel, à P0



Figure 65 – Évaluation diurne des espaces de compensation au Locle, à P0

À P0, les espaces de compensation importants et très importants sont de deux types. D'une part, ce sont les forêts situées très proches de l'espace urbain, comme la forêt de Chaumont ou les forêts situées autour des villages du Val-de-Travers, ou encore celles situées au nord du Val-de-Ruz. D'autre part, ce sont les parcs urbains très ombragés ou aux abords directs du lac, comme le Parc Gallet et le Parc des Crêtets à La Chaux-de-Fonds ou le Jardin Anglais et les Jeunes Rives à Neuchâtel. Ces espaces ont l'avantage d'être facilement voire très facilement accessibles à pied depuis l'espace d'action, offrant ainsi des lieux de refuge pour la population durant les journées très chaudes.

Les autres forêts, plus éloignées des centres urbains, sont d'importance moyenne. Elles sont très nombreuses et même si elles n'offrent pas un lieu de refuge directement accessible à pied, il est possible de s'y rendre par d'autres moyens et de bénéficier de leur fraîcheur.

Les espaces d'importance faible ou nulle sont les espaces verts sans ombrage tels que les surfaces agricoles, qui ne constituent en aucun cas des lieux de refuge pour la population durant la journée.

4.3.2.1.2 ÉVOLUTION DE P0 À P1

L'évolution de la part de chaque niveau d'évaluation des espaces de compensation entre P0 et P1 est disponible ci-dessous, pour la situation diurne (*Figure 66*).

À P1, la part des espaces de compensation d'importance grande ou très grande augmente. Cela s'explique par le fait que la situation bioclimatique relative des espaces d'action se dégrade à P1, rendant ainsi les espaces verts voisins plus importants comme lieux de refuge. En parallèle, la part des espaces verts d'importance faible ou nulle augmente également. Ce sont principalement les zones agricoles, qui ont un couvert végétal bas et non ombragé. Comme la PET augmente entre P0 et P1, la situation bioclimatique relative de l'espace de compensation diminue et donc son importance également. L'espace agricole du Val-

de-Ruz et des environs de Boudry et Cortaillod illustrent bien cela. Le développement urbain implique que les espaces verts sont plus nombreux à se trouver proches des habitations, ce qui entraîne une augmentation de leur importance.

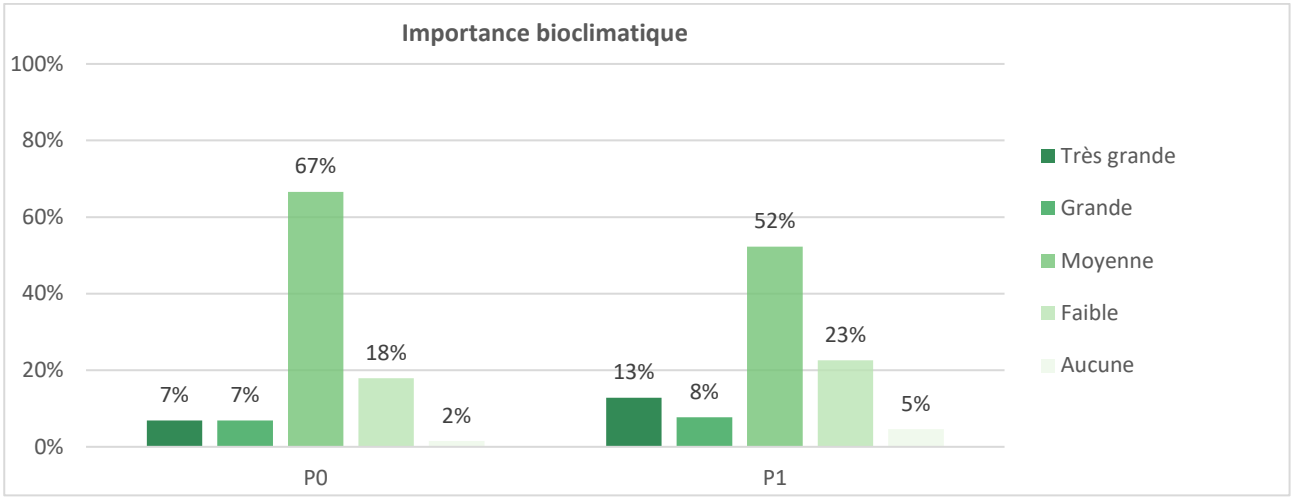


Figure 66 – Histogramme de l'évaluation diurne des espaces de compensation à P0 et P1

L'évolution de l'importance bioclimatique diurne des espaces de compensation de P0 à P1 est disponible pour Neuchâtel (*Figure 67*) et Le Locle (*Figure 68*).



Figure 67 – Importance bioclimatique diurne des espaces de compensation à Neuchâtel, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)



Figure 68 – Importance bioclimatique diurne des espaces de compensation au Locle, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)

4.3.2.2 SITUATION NOCTURNE

La légende de l'importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation est disponible ci-dessous (*Tableau 25*).

Importance	Description
Très grande	Espace vert ou ouvert jouant un très grand rôle de compensation de la charge thermique des espaces bâtis grâce à sa fonction de transport d'air froid.
Grande	Espace vert ou ouvert jouant un grand rôle de compensation de la charge thermique des espaces bâtis grâce à sa proximité avec un espace bâti de situation largement moins bonne que la moyenne ainsi qu'une vitesse de vent ou un débit d'air froid supérieur à la moyenne.
Moyenne	Espace vert ou ouvert jouant un rôle moyen de compensation de la charge thermique des espaces bâtis grâce à sa proximité avec l'espace bâti ainsi qu'une vitesse de vent ou un débit d'air froid supérieur à la moyenne, ou une surface supérieure à 1 ha.
Faible	Espace vert ou ouvert éloigné des espaces d'action et ne transportant pas d'air froid. Sa qualification de zone de production d'air froid lui confère tout de même un faible rôle de compensation de la charge thermique des espaces bâtis.
Nulle	Espace vert ou ouvert ne produisant et ne transportant pas d'air froid, et n'ayant donc aucun rôle de compensation de la charge thermique des espaces bâtis.

Tableau 25 – Légende de la carte d'importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation

4.3.2.2.1 ÉTAT DES LIEUX À P0

Ci-dessous sont présentés des extraits de la carte d'évaluation bioclimatique nocturne des espaces de compensation à Neuchâtel (*Figure 69*) et au Locle (*Figure 70*).

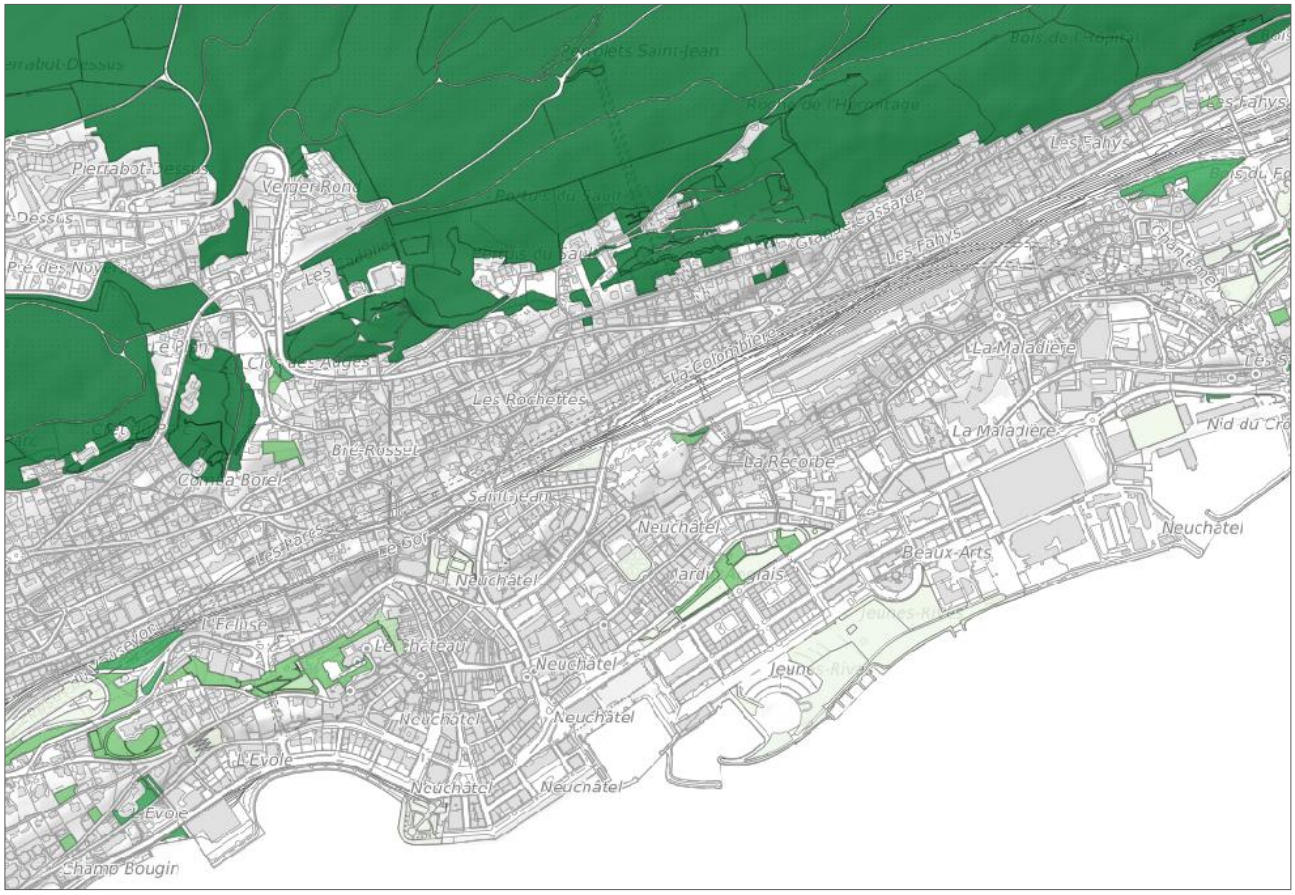


Figure 69 – Évaluation nocturne des espaces de compensation à Neuchâtel, à P0



Figure 70 – Évaluation nocturne des espaces de compensation au Locle, à P0

A P0, près de 30 % des espaces de compensation sont de grande voire de très grande importance. Ce sont les espaces qui contribuent directement au transport d'air froid vers les espaces bâtis, soit majoritairement les zones agricoles ouvertes. Ils sont nombreux car le canton est très rural et dispose d'une topographie propice aux brises de pente (voir partie *2.3.2.2*). Les 26 % d'espaces de moyenne importance sont des surfaces bien ventilées mais qui, vu leur emplacement, ne contribuent pas au rafraîchissement des espaces bâtis. Les espaces d'importance faible ou nulle sont majoritairement les forêts éloignées des zones habitées et denses.

4.3.2.2.2 ÉVOLUTION DE P0 À P1

L'évolution de la part de chaque niveau d'évaluation des espaces de compensation entre P0 et P1 est disponible ci-dessous, pour la situation nocturne (*Figure 71*).

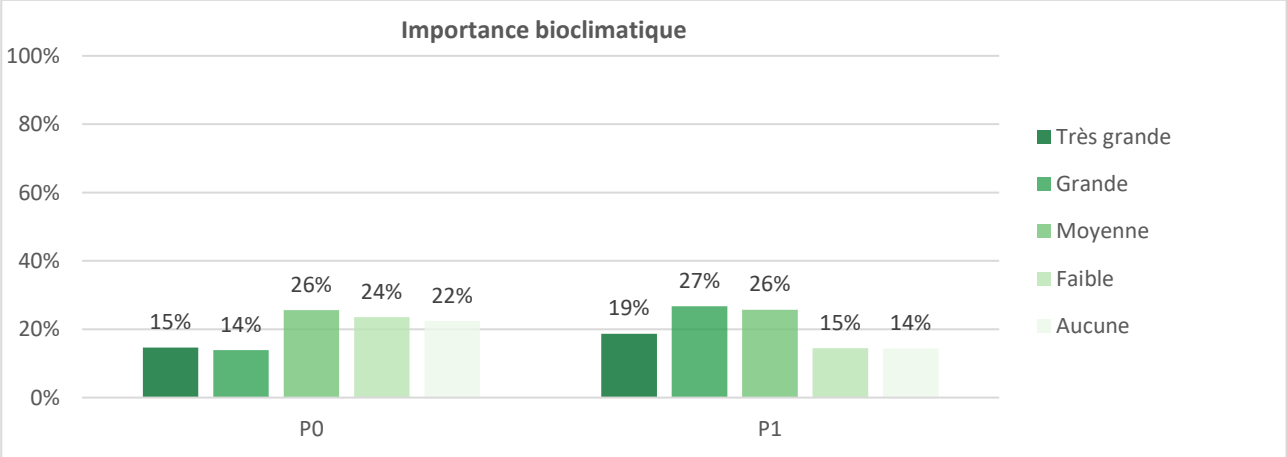


Figure 71 – Histogramme de l'évaluation nocturne des espaces de compensation à P0 et P1

L'évolution de l'importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation de P0 à P1 est disponible pour Neuchâtel (*Figure 72*) et Le Locle (*Figure 73*).



Figure 72 – Importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation à Neuchâtel, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)



Figure 73 – Importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation au Locle, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)

Importance bioclimatique

- Très grande
- Grande
- Moyenne
- Faible
- Nulle

A P1, la part des espaces de compensation dont l'importance est grande voire très grande augmente et atteint presque les 50 %. Cela est dû au fait que la situation bioclimatique relative des espaces d'action se dégrade, rendant les espaces de compensation voisins plus importants. À mesure que les quartiers se construisent, les espaces verts se trouvent plus proches des lieux d'habitation, ce qui les rend plus importants pour les résidents.

4.3.3 Synthèse des cartes d'évaluation bioclimatique

Les résultats des cartes d'évaluation bioclimatique induisent les mêmes observations que l'analyse de la PET à 14h et de la température de l'air à 4h, en raison de l'utilisation des mêmes données source. Ces résultats constituent un jalon pour orienter les réflexions des décideurs en matière d'aménagement du territoire, ainsi que pour réaliser des analyses de vulnérabilité, mais doivent, pour ce faire, être croisés ou complétés avec d'autres données.

Les espaces bâtis non habités permettent d'identifier les espaces d'actions pour lesquels la situation nocturne est moins préoccupante, du fait que les humains n'y dorment pas. De la même façon, l'importance diurne des espaces de compensation non accessibles au public doit être revue à la baisse étant donné qu'ils ne peuvent servir de lieu de refuge pour la population durant la journée.

Le développement urbain, tel qu'il a été considéré ici, a tendance à augmenter la surface totale de l'espace d'action ainsi qu'à aggraver potentiellement la situation bioclimatique relative des quartiers voisins. Il a également tendance à rendre les espaces verts voisins plus importants, puisque ceux-ci se retrouvent alors proches de l'espace d'action.

Qu'il s'agisse des espaces d'action ou de compensation, les résultats varient considérablement entre la situation diurne et la situation nocturne. Il est donc crucial de considérer ces deux situations conjointement lors de l'analyse d'un site. Par exemple, les zones ombragées offrent de bons refuges la journée mais n'ont pas toujours un grand rôle de compensation durant la nuit. A l'inverse, les surfaces vertes agricoles chauffent beaucoup la journée, elles ne permettent donc pas d'offrir refuge, mais elles favorisent le transport de l'air froid durant la nuit. Les forêts très en pente, qui participent au transport d'air froid durant la nuit, sont évaluées importantes voire très importantes de jour comme de nuit.

Comme stipulé à la partie *3.1.5*, la couche d'utilisation du sol utilisée comme base pour les cartes d'évaluation bioclimatique présente dans certains secteurs un niveau de détail trop élevé, il convient donc de prendre un peu de recul sur ces résultats et d'en faire une lecture à l'échelle d'une ville, éventuellement d'un quartier.

Dans les résultats de l'évaluation, les places sont parfois considérées comme des espaces d'action et parfois comme des espaces de compensation. Cela est dû au fait que le revêtement de surface est à l'origine de la classification, davantage que la typologie de lieu. Ainsi, les places ne sont pas toutes considérées de la même façon, ce qui peut paraître hétérogène. Toutefois, bien que désignées par un même terme, les places peuvent avoir des caractéristiques très différentes. Par exemple, certaines sont entièrement minérales et très exposées au soleil tandis que d'autres sont végétalisées ou bien ombragées.

5 Nuits et journées tropicales, jours caniculaires

Sur la base des données issues de FITNAH ainsi que des prévisions climatiques établies par MétéoSuisse au travers du jeu de données CH2018, plusieurs variables supplémentaires ont été calculées pour toutes les périodes (partie *2.1.2*), de P0 à P3, sous la forme de raster de 10 m de résolution. Ces variables sont :

- le nombre annuel moyen de nuits tropicales ;
- le nombre annuel moyen de journées tropicales ;
- le nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3.

Les nuits tropicales sont des nuits au cours desquelles la température ne descend pas en dessous de 20 °C.

Les journées tropicales sont des journées au cours desquelles la température atteint ou dépasse 30 °C.

En Suisse, les canicules de degré 3 sont des épisodes de chaleur caractérisés par une température moyenne journalière de 25 °C ou plus pendant au minimum 3 jours consécutifs. Un jour est donc caniculaire seulement s'il fait partie d'un groupe de 3 jours ou plus dont la température moyenne ne descend pas en dessous de 25 °C, comme le montre l'exemple ci-dessous (*Tableau 26*).

Jour	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Température moyenne [°C]	23.8	25	25	24.5	25	22	22	25	25.2	25.5
Jour caniculaire	non	non	non	non	non	non	non	oui	oui	oui

Tableau 26 – Exemple de comptabilisation des jours caniculaires de degré 3

5.1 DONNÉES

Dans cette section sont décrites les données utilisées pour calculer le nombre annuel moyen de nuits et journées tropicales, ainsi que le nombre de jours caniculaires de degré 3. Elles sont au nombre de 4 :

- les mesures de température des stations de l'Université de Neuchâtel,
- les mesures de température de stations de MétéoSuisse,
- les températures journalières minimales, maximales et moyennes de la simulation DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11_RCP85 du jeu de données climatiques CH2018,
- les rasters de la température à 4h et de la température à 14h modélisés par FITNAH.

5.1.1 Mesures météorologiques des stations de l'Université de Neuchâtel

Les stations météorologiques installées par l'Université de Neuchâtel ont été utilisées à plusieurs reprises dans les calculs. Elles sont au nombre de 30 et sont réparties dans toute la ville de Neuchâtel ainsi que dans les alentours, toutes situées en zone urbaine. Elles mesurent la température de l'air toutes les 5 minutes et la plupart des stations ont des données pour les années 2019, 2020, 2022, 2023 et 2024.

Avant utilisation, ces mesures ont été lissées grâce à un filtre gaussien ($\sigma = 0.75$) afin de réduire les irrégularités.

5.1.2 Mesures météorologiques des stations MétéoSuisse

Les 12 stations MétéoSuisse du canton de Neuchâtel, situées en zone non urbaine pour la grande majorité, ont également été utilisées dans les calculs. Elles mesurent la température, ainsi que d'autres variables climatiques, toutes les 10 minutes.

Avant utilisation, ces mesures ont également été lissées grâce à un filtre gaussien ($\sigma = 0.75$), afin de réduire les irrégularités.

5.1.3 Données climatiques CH2018

CH2018 est un ensemble de données climatiques établi pour la Suisse par MétéoSuisse sur la base des projections climatiques EURO-CORDEX. EURO-CORDEX est la branche européenne de l'initiative internationale CORDEX, qui vise à coordonner au niveau international la production de projections régionales sur le changement climatique pour toutes les régions terrestres du monde. EURO-CORDEX propose ainsi un grand nombre de projections climatiques pour l'Europe, réalisées avec différents modèles mondiaux et régionaux ainsi que pour plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

En combinant les modèles d'EURO-CORDEX avec les données locales suisses, CH2018 offre des projections encore plus précises et adaptées aux réalités spécifiques du pays. Ainsi, CH2018 contient les données issues de simulations effectuées par plusieurs modèles climatiques et pour trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5). Les données (température, vent, précipitations, etc.) sont disponibles pour chaque jour de l'année 1981 à l'année 2099. Les scénarios climatiques CH2018 sont les modèles récents qui permettent d'avoir le regard le plus précis à ce jour sur l'avenir climatique du pays.

5.1.3.1 SÉLECTION DE LA SIMULATION CH2018

Pour calculer le nombre annuel moyen de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3, la simulation CH2018 prédisant les valeurs les plus proches des mesures actuelles a été sélectionnée. Pour l'identifier, une comparaison a été effectuée entre les données issues des simulations et les données mesurées aux différentes stations météorologiques de MétéoSuisse. Seules les simulations du scénario d'émissions de gaz à effet de serre RCP8.5 (utilisé dans l'ensemble de ce rapport) et de résolution la plus fine disponible (EUR11) sont considérées.

Pour sélectionner la simulation CH2018 la plus adaptée, la procédure suivante a été utilisée.

1. Calcul de la médiane des températures minimale et maximale pour chaque simulation CH2018

Pour chaque simulation CH2018 considérée, la médiane des températures minimales (Tmin_med_CH2018) et la médiane des températures maximales (Tmax_med_CH2018) ont été calculées, et ce pour les mois de juin, juillet et août pour les années 2020 à 2024.

- La médiane est préférable à la moyenne car elle est peu influencée par les extrêmes non représentatifs.
- Les mois de juin, juillet et août ont été considérés car ce sont les mois les plus chauds et donc les plus pertinents pour l'évaluation des prévisions estivales de CH2018.
- Enfin, les années 2020 à 2024 ont été considérées car elles sont postérieures à la publication des données CH2018 et permettent ainsi de comparer la prédiction de chaque simulation à des valeurs mesurées.

2. Sélection des stations MétéoSuisse de référence

Toutes les stations de MétéoSuisse du canton de Neuchâtel ont été considérées, à l'exception de celle située en ville de Neuchâtel. Cette dernière est fortement influencée par le microclimat urbain, ce qui n'est pas

représentatif des simulations CH2018 couvrant de larges échelles. C'est également la raison pour laquelle les stations météorologiques de l'Université de Neuchâtel, situées en milieu urbain, n'ont pas été utilisées à cette étape.

3. Calcul de la médiane des températures des stations MétéoSuisse

Pour chaque station retenue, la médiane des températures minimales (Tmin_med) et la médiane des températures maximales (Tmax_med) ont été calculées pour les mois de juin, juillet et août pour les années 2020 à 2024 (*Tableau 27*).

Station MétéoSuisse	Tmin_med [°C]	Tmax_med [°C]
Bevaix	12.8	25.2
Cernier	10.4	22.9
Chasseral	7.6	17.1
Chaumont	9.5	20.2
La Brévine	6.1	21.2
La Chaux-de-Fonds	8.6	21.4
La Frétaz	9.5	19.8
La Sagne	7.6	21.3
Le Landeron	11.7	25.5
Le Locle – Est	8.6	22.2
Travers	9.4	23.7

Tableau 27 – Médiane des températures minimales et maximales des stations MétéoSuisse pour les années 2020 à 2024

4. Calcul de l'erreur et sélection de la simulation

A l'emplacement de chaque station, la médiane des températures des mesures (Tmin_med, Tmax_med) et celle des simulations CH2018 (Tmin_med_CH2018, Tmax_med_CH2018) ont été comparées. Pour cela, la racine de l'erreur quadratique moyenne a été calculée pour les températures minimales (RMSE_Tmin) et pour les températures maximales (RMSE_Tmax), ainsi que leur somme (*Tableau 28*). Cette erreur est proportionnelle au carré de la différence entre les valeurs de MétéoSuisse et des simulations CH2018.

Simulation CH2018	RMSE_Tmin	RMSE_Tmax	Somme
CLMCOM-CCLM4_ECEARTH_EUR11_RCP85	1.79	3.01	4.80
CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR11_RCP85	3.80	3.09	6.89
CLMCOM-CCLM4_MPIESM_EUR11_RCP85	1.66	2.93	4.59
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11_RCP85	**2.08**	**2.27**	**4.36**
MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR11_RCP85	1.67	2.96	4.63
MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR11_RCP85	2.07	2.39	4.46
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR11_RCP85	2.40	2.36	4.76
SMHI-RCA_HADGEM_EUR11_RCP85	2.25	2.29	4.54
SMHI-RCA_IPSL_EUR11_RCP85	2.61	2.34	4.95
SMHI-RCA_MPIESM_EUR11_RCP85	2.17	2.40	4.56

Tableau 28 – Évaluation des différentes simulations CH2018

La simulation CH2018 finalement sélectionnée est celle ayant la somme la plus faible, soit DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11_RCP85. Cette simulation est la quatrième meilleure pour la prédiction des valeurs minimales et la meilleure pour la prédiction des valeurs maximales.

5.1.4 Températures issues de la modélisation FITNAH

Les modélisations de la température à 4h et de la température à 14h issues de FITNAH, pour les périodes P0 à P3, ont été utilisées (partie *3.3.1*).

Pour rappel, la température à 4h correspond à la température minimale d'un jour estival standard de la période considérée. De la même façon, la température à 14h correspond à la température maximale d'un jour estival standard de la période considérée.

Ces données ont préalablement été lissées grâce à une convolution gaussienne (σ = 0.75), afin de réduire les irrégularités.

5.2 MÉTHODE

5.2.1 Préambule

Les simulations climatiques CH2018 proposent des prédictions de température de haute résolution temporelle (données journalières) mais de faible résolution spatiale (raster de résolution 2 km).

En parallèle, les résultats issus de FITNAH sont des prédictions de température de faible résolution temporelle (une valeur par période de 30 ans), mais de haute résolution spatiale (raster de résolution 10 m).

La méthode consiste à combiner ces deux types de données afin d'obtenir des prédictions de température de haute résolution spatiale (raster de résolution 10 m) et temporelle (une valeur par jour). Ces prédictions peuvent alors être utilisées pour calculer le nombre annuel moyen de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3.

La méthode mise en œuvre s'appuie en partie sur celle proposée par GEO-NET, développée par le Prof. Günter Gross (Leibniz Universität Hannover, concepteur de FITNAH-3D).

5.2.2 Calcul de la température moyenne estivale

Calculer le nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 nécessite de connaître la température moyenne d'un jour estival standard, pour chaque période et à haute résolution spatiale (raster de 10 m de résolution). Comme elle n'a pas été calculée dans la modélisation par FITNAH (seules les températures minimales et maximales l'ont été), celle-ci a été calculée a posteriori selon la méthode décrite ci-dessous.

L'hypothèse suivante a été formulée : la température moyenne sur 24h (Tmoy) dépend de la température minimale (Tmin) et la température maximale (Tmax) du jour considéré, et peut être représentée par l'équation $Tmoy = x \cdot Tmin + y \cdot Tmax$, où x et y sont à déterminer.

Pour déterminer ces deux paramètres, les mesures des stations météorologiques de MétéoSuisse (années 2020 à 2024) et de l'Université de Neuchâtel (années 2019, 2020, 2022, 2023 et 2024) ont été utilisées, pour les mois de mai à septembre.

- Les mesures utilisées sont à la fois celles de MétéoSuisse et de l'Université de Neuchâtel afin de maximiser la quantité et la variété des données.
- Les mois de mai à septembre ont été utilisés pour les mêmes raisons. A noter que le même calcul effectué en utilisant seulement les mois de juin, juillet et août produit un résultat très proche, avec une différence de seulement 0.1 °C en moyenne.

En calculant les paramètres (x,y) par la méthode des moindres carrés, il s'avère que le meilleur couple (x,y) est (0.59,0.34).

L'erreur moyenne entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs mesurées est d'environ 0.6 °C.

Grâce à ce couple de valeurs, un raster de résolution 10 m de la température moyenne a été calculé pour chaque période à partir des rasters de la température minimale (à 4h) et de la température maximale (à 14h) issus de FITNAH (*Figure 74*).

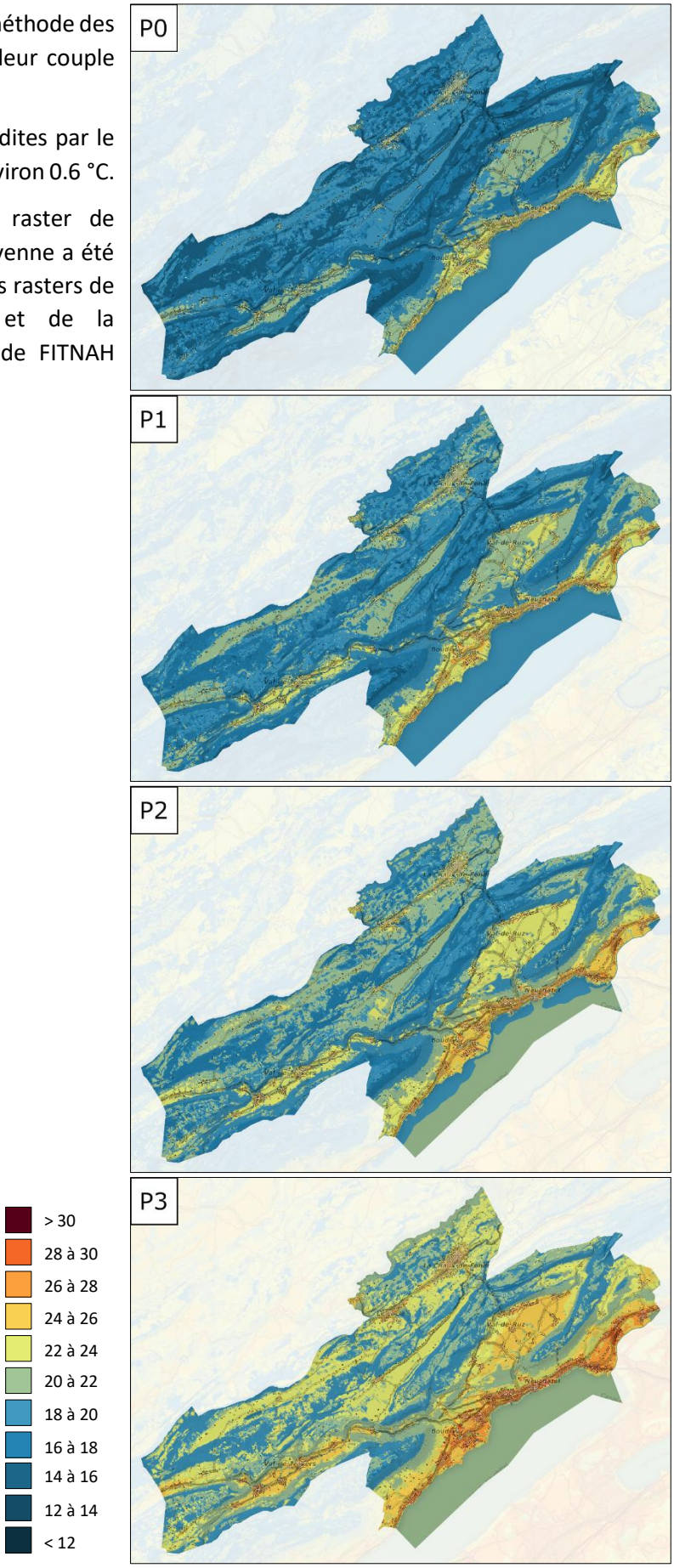


Figure 74 – Température moyenne d'un jour estival standard, évolution de P0 à P3

5.2.3 Calcul des nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3

Les données CH2018 utilisées se présentent sous la forme de 3 rasters d'environ 2 km de résolution, avec une bande par jour contenant la température minimale du jour (raster Tmin_CH2018), la température maximale du jour (raster Tmax_CH2018) et la température moyenne du jour (raster Tmoy_CH2018).

Le calcul des nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3 a été effectué selon la méthode suivante. Les étapes décrites ont été effectuées pour chaque période.

1. Calcul de la variation spatiale à haute résolution des températures modélisées par FITNAH

Les rasters issus de FITNAH ont une haute résolution spatiale (10 m), ce qui permet de décrire les phénomènes climatiques locaux avec davantage de précision que les prévisions à plus large échelle issues de la simulation CH2018. Dans cette première étape, le but est de quantifier la variation spatiale des températures des rasters FITNAH, par rapport à une valeur « standard ». Ces rasters sont : la température à 4h (Tmin_FITNAH), la température à 14h (Tmax_FITNAH) et la température moyenne (Tmoy_FITNAH[17]).

D'abord, pour chaque pixel des rasters CH2018, la médiane des températures des mois de juin, juillet et août a été calculée. En résultent :

- un raster contenant la médiane des températures minimales (med_Tmin_CH2018) (*Figure 75*),
- un raster contenant la médiane des températures maximales (med_Tmax_CH2018),
- un raster contenant la médiane des températures moyennes (med_Tmoy_CH2018).

Ces rasters sont considérés comme la valeur « standard » de la température (respectivement minimale, maximale et moyenne). Il s'agit de la température à laquelle on peut s'attendre pour un jour estival standard.

- ➢ Les mois de juin, juillet et août ont été pris en compte pour établir ces médianes car ce sont les mois les plus chauds. Cela correspond également à la période pour laquelle les modélisations FITNAH sont valables.

Afin de quantifier la variation spatiale à haute résolution modélisée par FITNAH, les soustractions suivantes ont été faites :

- Tmin_FITNAH (raster 10 m, 1 bande) – med_Tmin_CH2018 (raster 2 km, 1 bande),
- Tmax_FITNAH (raster 10 m, 1 bande) – med_Tmax_CH2018 (raster 2 km, 1 bande),
- Tmoy_FITNAH (raster 10 m, 1 bande) – med_Tmoy_CH2018 (raster 2 km, 1 bande).

En retranchant la médiane aux valeurs de FITNAH, il ne reste que la variation locale. Cela donne 3 rasters de 10 m de résolution, représentant respectivement la variation spatiale à haute résolution de la température minimale (var_Tmin) (*Figure 76*), maximale (var_Tmax) et moyenne (var_Tmoy). Ces variations spatiales, qui s'étendent de -4 à +8 °C pour la température minimale par exemple, permettent de voir comment la valeur de fond calculée précédemment est modulée par les effets microclimatiques lors d'un jour estival standard.

[17] Le raster de la température moyenne n'est pas à proprement parlé produit par FITNAH mais été calculé a posteriori sur la base des rasters de la température minimale et de la température maximale produits par FITNAH (partie 5.2.2).

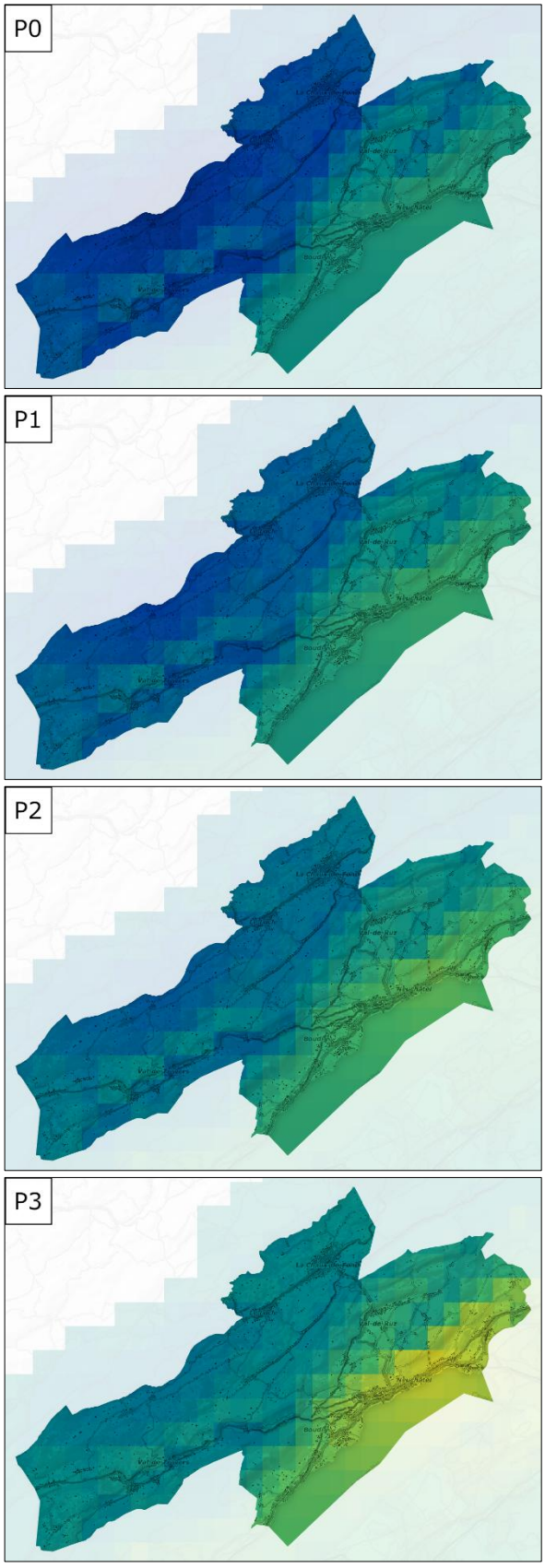


Figure 75 – Valeur médiane des températures minimales CH2018 des mois de juin, juillet et août, évolution de P0 à P3

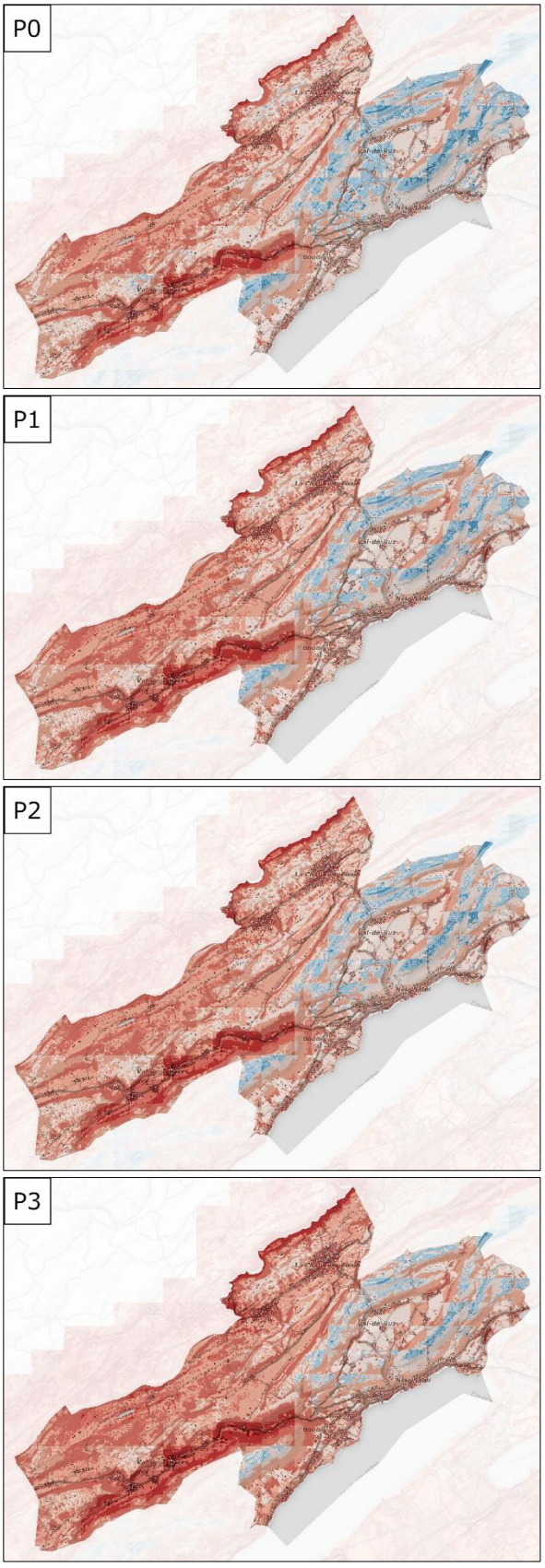


Figure 76 – Variation spatiale à haute résolution de la température minimale journalière issue de FITNAH, évolution de P0 à P3

2. Comptabilisation du nombre de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires

Maintenant que les variations spatiales à haute résolution ont été calculées, il suffit de les ajouter aux prédictions CH2018, pour chaque jour :

- Tmin_CH2018 (raster 2 km, 1 bande par jour) + var_Tmin (raster 10 m, 1 bande),
- Tmax_CH2018 (raster 2 km, 1 bande par jour) + var_Tmax (raster 10 m, 1 bande),
- Tmoy_CH2018 (raster 2 km, 1 bande par jour) + var_Tmoy (raster 10 m, 1 bande).

Ainsi, la variation spatiale fine est superposée à la variation temporelle. Il en résulte 3 rasters de résolution 10 m (Tmin_final, Tmax_final et Tmoy_final), contenant des données journalières de température.

Le nombre total de nuits tropicales est calculé en comptant le nombre de bandes du raster Tmin_final dont la valeur est supérieure ou égale à 20.

Le nombre total de journées tropicales est calculé en comptant le nombre de bandes du raster Tmax_final dont la valeur est supérieure ou égale à 30.

Le nombre total de jours caniculaires est calculé en comptant le nombre de bandes du raster Tmoy_final dont la valeur est supérieure ou égale à 25 et à la condition que cela soit le cas durant 3 jours consécutifs au moins.

Comme chaque période s'étend sur 30 ans, le compte final est ensuite divisé par 30 pour obtenir un compte par an.

3. Calcul du nombre annuel moyen de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3

Les résultats obtenus à ce stade sont encore largement surestimés. En effet, les données issues de FITNAH ne sont valables que pour les jours autochtones, ce qui ne concerne pas la totalité des jours estivaux. Pour parvenir à des valeurs réalistes, un facteur correctif a été appliqué.

Ce facteur correctif a été calculé en comparant le nombre prédit au point 2 ci-dessus et le nombre réellement mesuré aux stations météorologiques de l'Université de Neuchâtel.

À chaque station, le nombre annuel moyen de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3, entre 2019 et 2024, a été comptabilisé[18] (*Tableau 29*).

Pour chaque variable (nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires), le facteur correctif a été calculé de sorte à corriger le nombre comptabilisé au point 2 ci-dessus (pour la période P1, puisque les mesures sont dans cette période) et le faire correspondre au nombre comptabilisé aux stations météorologiques. Le calcul a été effectué par la méthode des moindres carrés.

Les facteurs correctifs calculés sont les suivants : 0.28 pour les nuits tropicales, 0.23 pour les journées tropicales et 0.14 pour les jours caniculaires de degré 3.

Le facteur correctif pour les nuits tropicales (0.28) et les journées tropicales (0.23) sont proches du ratio de jours autochtones mesuré à la station de Neuchâtel, de 0.3[19].

[18] Comme les stations de l'Université de Neuchâtel ont des données manquantes qui varient de station en station, le ratio entre le nombre de jours mesurés et le nombre de jours total a été calculé, ce qui permet de supposer un nombre total. Notons toutefois qu'aucune station ne dispose de « trou » dans les données au milieu d'un été. Soit les données de l'été entier sont disponibles, soit elles ne le sont pas.

[19] A la station MétéoSuisse de Neuchâtel, environ 30 % des jours de juin, juillet et août sont autochtones. Appliquer un facteur correctif de 0.3 aurait été possible, mais la station MétéoSuisse de Neuchâtel présente des caractéristiques particulières qui tendent à rendre ses mesures peu représentatives des conditions réelles (station protégée des vents, située en ville mais à l'ombre des arbres, etc). De plus, le calcul des jours caniculaires doit répondre au critère des 3 jours successifs, ce qui ne peut pas être pris en compte uniquement par le critère autochtone.

Le facteur correctif pour les jours caniculaires est plus faible, ce qui signifie que les calculs surestiment davantage leur nombre que pour les nuits et journées tropicales. Cela est probablement dû au fait qu'en conditions autochtones, il n'y a pas de jours où les conditions météorologiques rafraîchissent l'air et permettent de quitter la situation de canicule, augmentant ainsi le nombre de jours caniculaires comptabilisés.

		Nombre annuel moyen entre 2019 et 2024		
Nom de la station	**ID**	**Nuits tropicales**	**Journées tropicales**	**Jours caniculaires degré 3**
Clos de Serrières 1	ST001	20.1	22.6	12.1
Clos de Serrières 2	ST002	19.8	24.6	10.2
Clos de Serrières 3	ST003	13.8	22.6	8.8
Vauseyon / collège	ST004	4.2	15.6	2.6
Rosière	ST005	12.0	24.0	11.3
Gare Nord / pin	ST006	14.2	20.6	9.6
Gare / béton	ST007	15.4	21.4	9.6
Gare / Marronnier	ST008	13.5	15.8	10.3
OFS / He-Arc	ST009	12.0	18.3	8.5
OFS / Crêt Taconnet	ST010	16.8	16.4	10.2
Garage Senn	ST012	17.6	22.2	10.2
Jardin Anglais	ST013	13.2	14.6	5.4
Place Alexis-Marie-Piaget	ST014	20.4	21.4	10.0
Collège Promenade	ST015	26.2	14.0	11.4
Port Neuchâtel	ST016	23.2	24.7	10.8
Jeunes-Rives	ST017	17.6	19.4	6.5
Place Pury	ST018	21.4	19.4	11.0
Vauseyon / centre de vie	ST019	3.5	20.3	2.2
Serrières / arbres / accès 3-portes	ST020	6.3	9.7	2.2
Serrières / Parking Tivoli	ST021	13.6	21.6	9.1
Serrières / arbre Denner	ST022	21.0	22.7	9.9
Serrières / débarcadère	ST023	15.8	14.5	5.8
Lac / hangar TransN	ST024	18.4	25.2	12.5
Vallon de la Serrière	ST025	7.7	14.3	5.3
Serrières / chemin accès lac	ST026	8.3	35.7	7.7
Parc / Evole / Hochberg	ST027	9.0	10.3	6.3
Lac / Les Saars	ST028	10.3	30.3	6.7
Valangin	ST029	0.0	10.0	0.0
Peseux / parking Migros	ST030	8.5	14.5	3.8
Corcelles / collège des Safrières	ST031	7.3	16.0	3.8

Tableau 29 – Comptabilisation du nombre de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires entre 2019 et 2024 aux stations météorologiques de l'Université de Neuchâtel

5.2.4 Limites et incertitudes

Les limites et incertitudes propres à la modélisation FITNAH restent présentes (parties *3.1.6* et *3.2.7*) puisque les données issues de FITNAH sont directement utilisées dans le calcul des nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3.

Il en va de même pour les limites et incertitudes propres aux données CH2018.

Concernant les hypothèses formulées lors des différentes étapes de calcul décrites dans ce chapitre, plusieurs limites sont à noter.

- Pour identifier la meilleure simulation CH2018 (*5.1.3.1*), une comparaison entre des données mesurées et prédites pour les années 2020 à 2024 a été effectuée. Cela suppose qu'un modèle performant pour les années 2020 à 2024 le soit également pour toute la période P1, ainsi que pour les périodes P2 et P3, ce qui ne peut pas être certifié.
- L'hypothèse selon laquelle la température journalière moyenne peut s'exprimer en fonction de la température journalière minimale et la température journalière maximale (*5.2.2*) n'est pas basée sur des modèles scientifiques, même si l'erreur moyenne résiduelle est plutôt faible (0.6 °C) et tend à valider cette hypothèse.
- Le facteur correctif appliqué pour calculer le nombre final de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires (*5.2.3*) est supposé être le même pour toutes les périodes, ce qui est incertain.
- Les mesures météorologiques utilisées dans les différentes étapes de calcul s'étendent sur quelques années seulement, ce qui peut manquer de robustesse.
- A plusieurs reprises, des choix ont été faits quant aux plages temporelles considérées (par exemple, considérer les mois de juin, juillet et août). Des plages plus étendues ou plus restreintes auraient également pu être choisies.
- Les stations météorologiques de l'Université de Neuchâtel sont situées exclusivement dans la ville de Neuchâtel et ses environs. Les éventuelles variations cantonales, par exemple dans des zones de plus haute altitude, n'ont pas été prises en compte, faute de mesures.

5.3 RÉSULTATS

5.3.1 Nuits tropicales

5.3.1.1 SITUATION À P1

La carte cantonale du nombre annuel moyen de nuits tropicales à P1 est présentée ci-dessous (*Figure 77*) ainsi qu'un extrait pour le centre-ville de Neuchâtel (*Figure 78*), Fleurier, Cressier (*Figure 79*) et La Chaux-de-Fonds (*Figure 80*).



Figure 77 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales, période P1

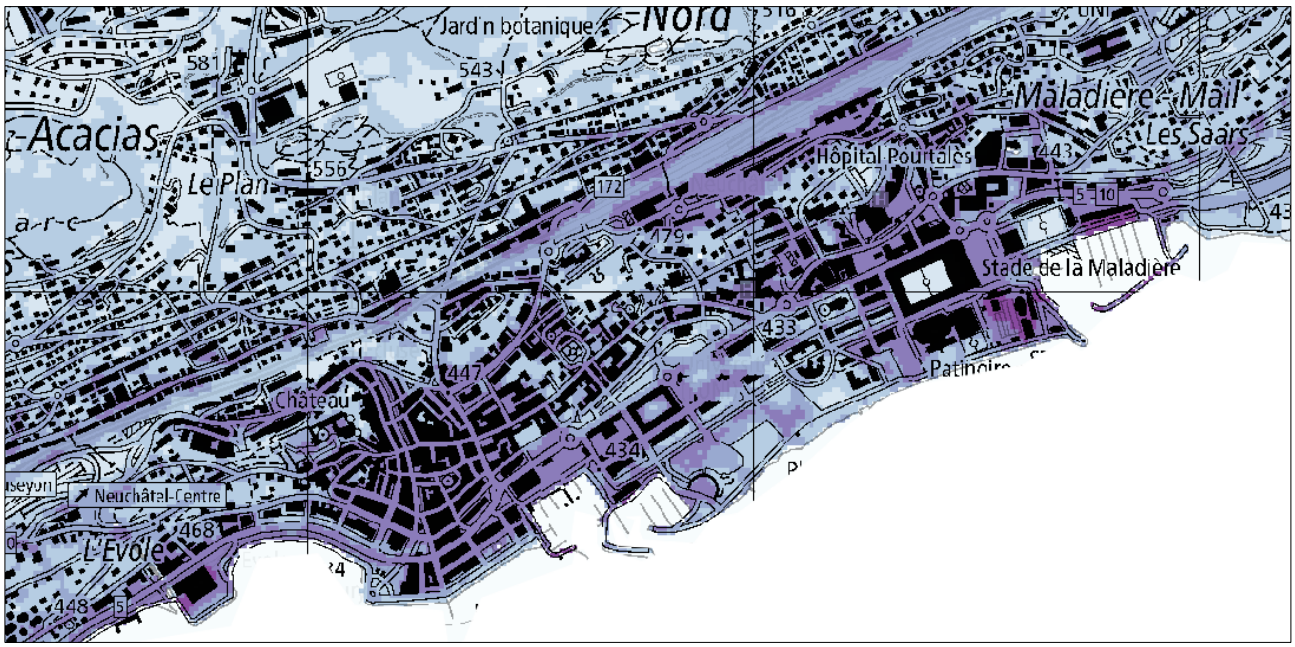


Figure 78 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales à Neuchâtel, période P1

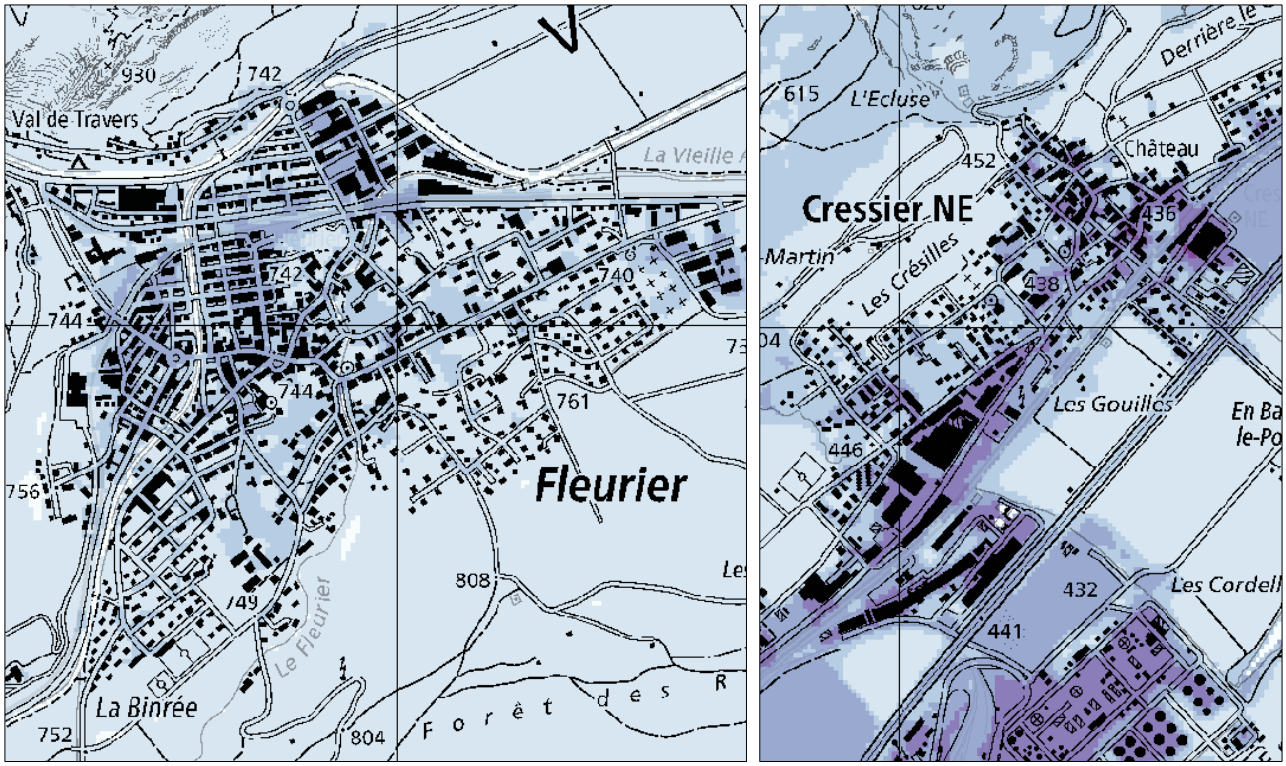


Figure 79 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales à Fleurier (à gauche) et Cressier (à droite), période P1

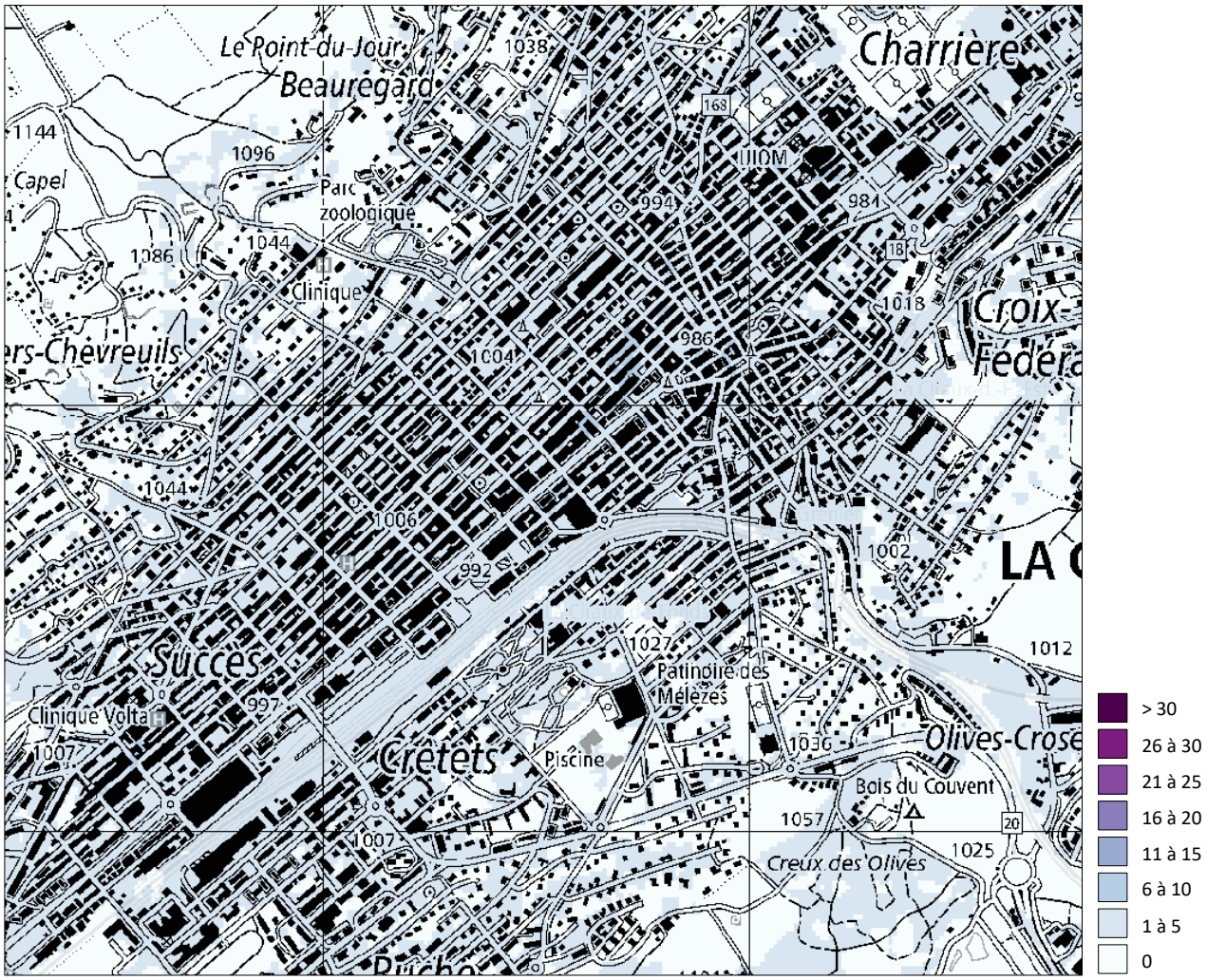


Figure 80 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales à La Chaux-de-Fonds, période P1

5.3.1.2 ÉVOLUTION DE P0 À P3

L'évolution, de P0 à P3, du nombre annuel moyen de nuits tropicales est présentée ci-dessous (*Figure 81*). A côté sont présentées les cartes de différence entre périodes (*Figure 82*).

A P0, les nuits tropicales sont globalement rares et sont presque exclusivement situées sur le Littoral, dans les rues étroites et sur les grandes surfaces imperméabilisées. Les valeurs y sont majoritairement inférieures à 10.

De P0 à P1, le nombre de nuits tropicales augmente partout dans le canton, mais de manière inégale. En effet, l'augmentation est plus marquée dans les centres urbains sur l'ensemble du canton, et d'autant plus sur toute la bande littorale. Par exemple, au centre de Neuchâtel ce nombre augmente de 8 nuits environ, tandis qu'à La Chaux-de-Fonds il augmente de seulement 4 nuits. Les zones de développement à l'horizon 2040 sont également des lieux où le nombre de nuits tropicales augmente parfois fortement entre P0 et P1, surtout dans les zones industrielles et à faible altitude.

Ainsi, à P1, les valeurs les plus importantes se trouvent sur le Littoral avec un maximum qui dépasse les 20 nuits et des valeurs standard aux alentours de 15 nuits tropicales. Dans les villages du Val-de-Ruz et du Val-de-Travers, les nuits tropicales sont de l'ordre d'une dizaine, tandis qu'à La Chaux-de-Fonds et dans les autres villes et villages de plus haute altitude, ce chiffre reste proche de 5 ou moins.

De P1 à P2, l'augmentation du nombre de nuits tropicales est moins marquée qu'entre P0 et P1, avec une augmentation maximale de 6 nuits. Elle reste toutefois inégalement répartie sur le territoire, avec les mêmes tendances.

De P2 à P3, l'augmentation du nombre de nuits tropicales, toujours inégale sur le territoire, est plus marquée qu'entre P0 et P1, avec une augmentation pouvant dépasser 10 nuits dans les zones denses du Littoral. Là encore, les zones denses et bétonnées du Littoral sont les plus impactées.

Ainsi, à P3, le Littoral présente de nombreuses valeurs proches du maximum de 36 nuits et presque aucune zone urbaine en-dessous des 20 nuits tropicales par an. Dans les villages du Val-de-Ruz et du Val-de-Travers, les zones les plus denses dépassent les 25 nuits tropicales et la majorité dépasse les 15. A La Chaux-de-Fonds et dans les autres villes et villages de plus haute altitude, ce chiffre reste presque toujours en-dessous de 15.

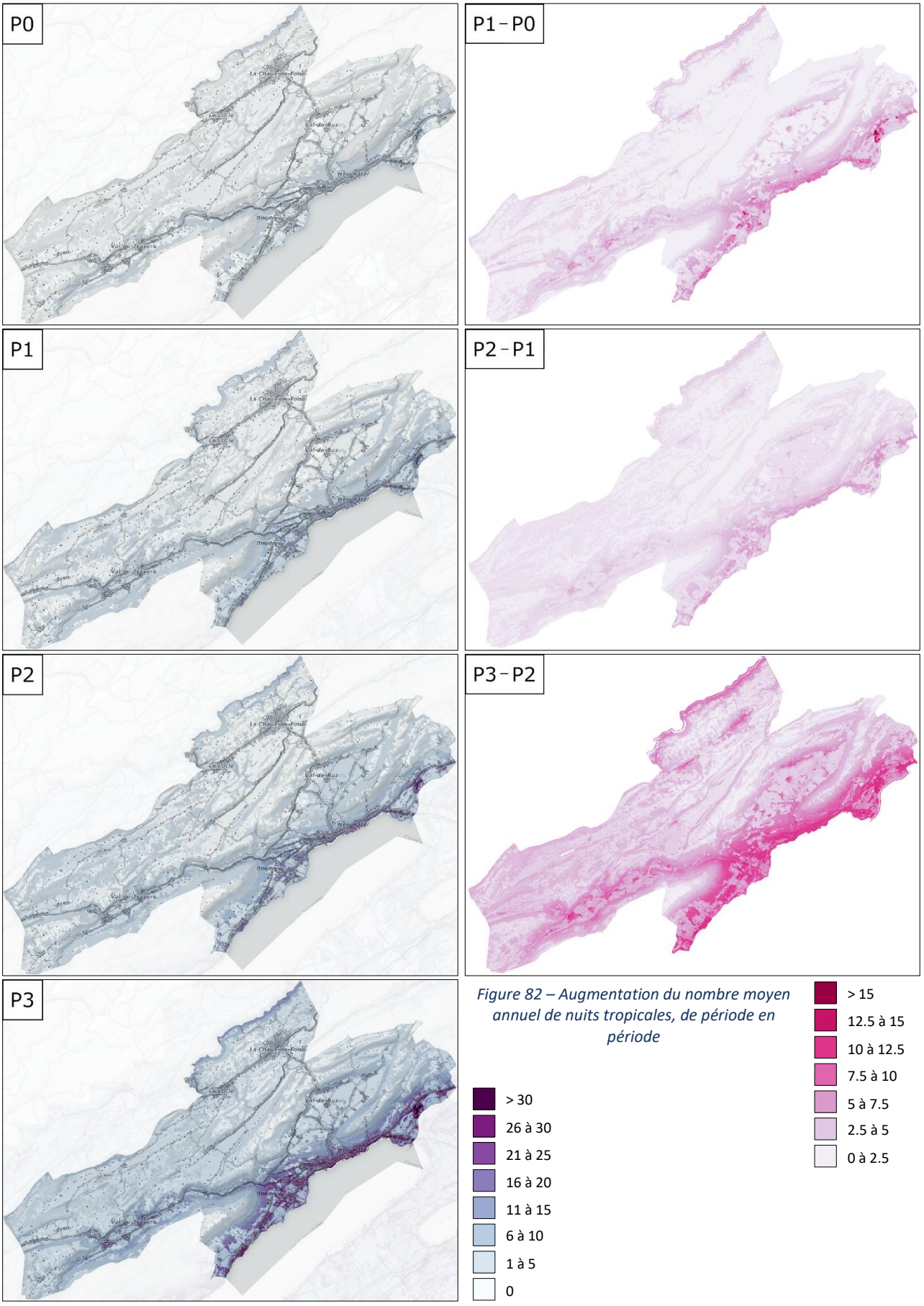


Figure 81 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales, évolution de P0 à P3

Figure 82 – Augmentation du nombre moyen annuel de nuits tropicales, de période en période

5.3.2 Journées tropicales

5.3.2.1 SITUATION À P1

La carte cantonale du nombre annuel moyen de journées tropicales à P1 est présentée ci-dessous (*Figure 83*) ainsi qu'un extrait pour le centre-ville de Neuchâtel (*Figure 84*), Fleurier, Cressier (*Figure 85*) et La Chaux-de-Fonds (*Figure 86*).

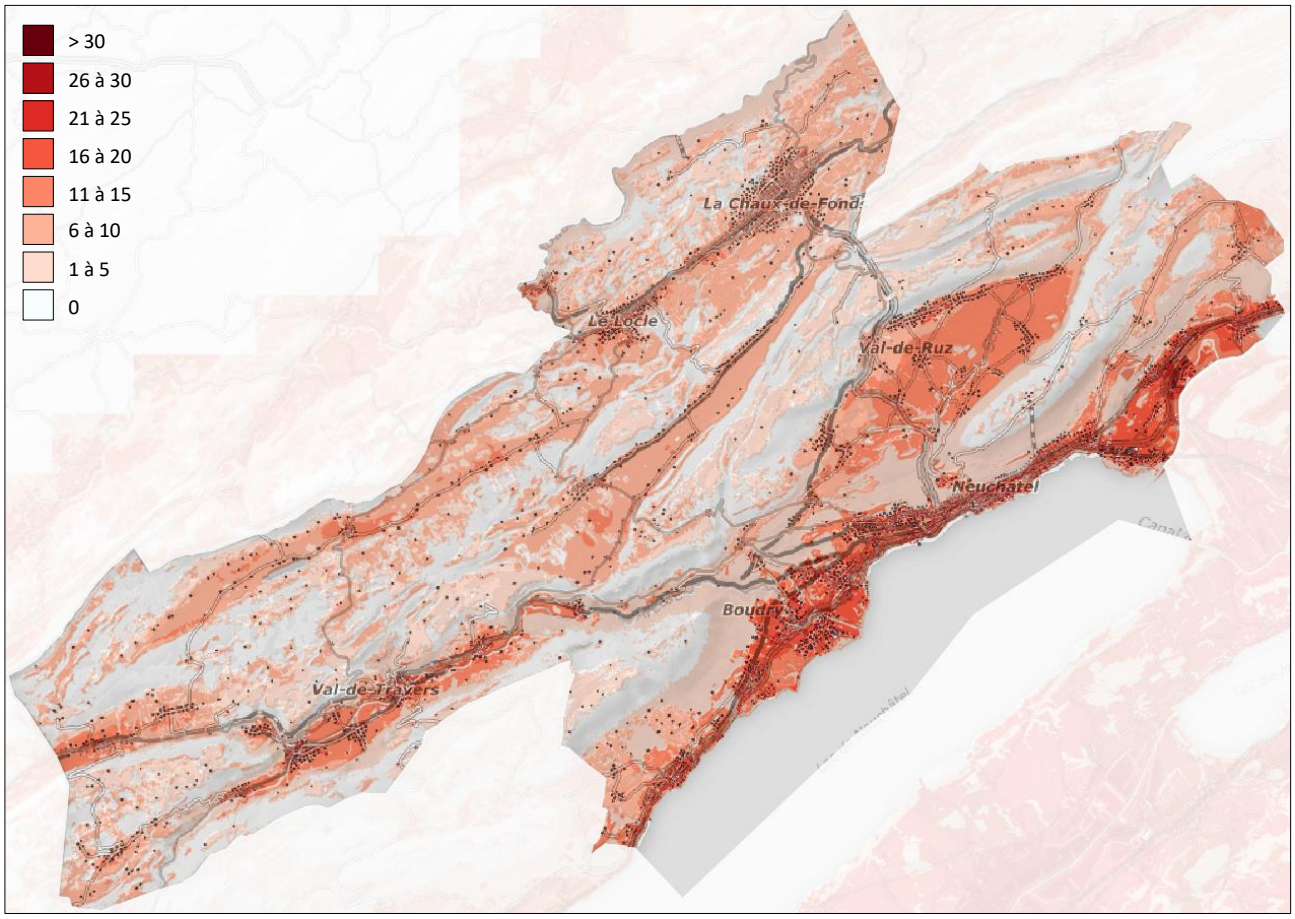


Figure 83 – Nombre annuel moyen de journées tropicales, période P1

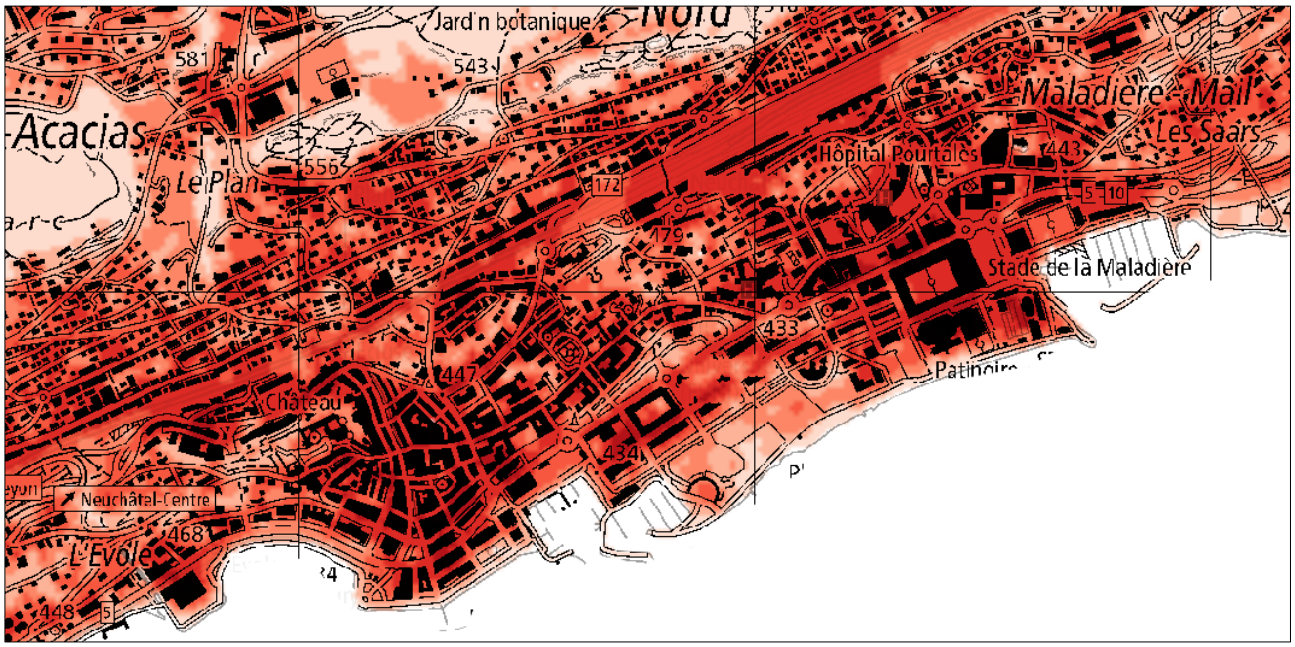


Figure 84 – Nombre annuel moyen de journées tropicales à Neuchâtel, période P1

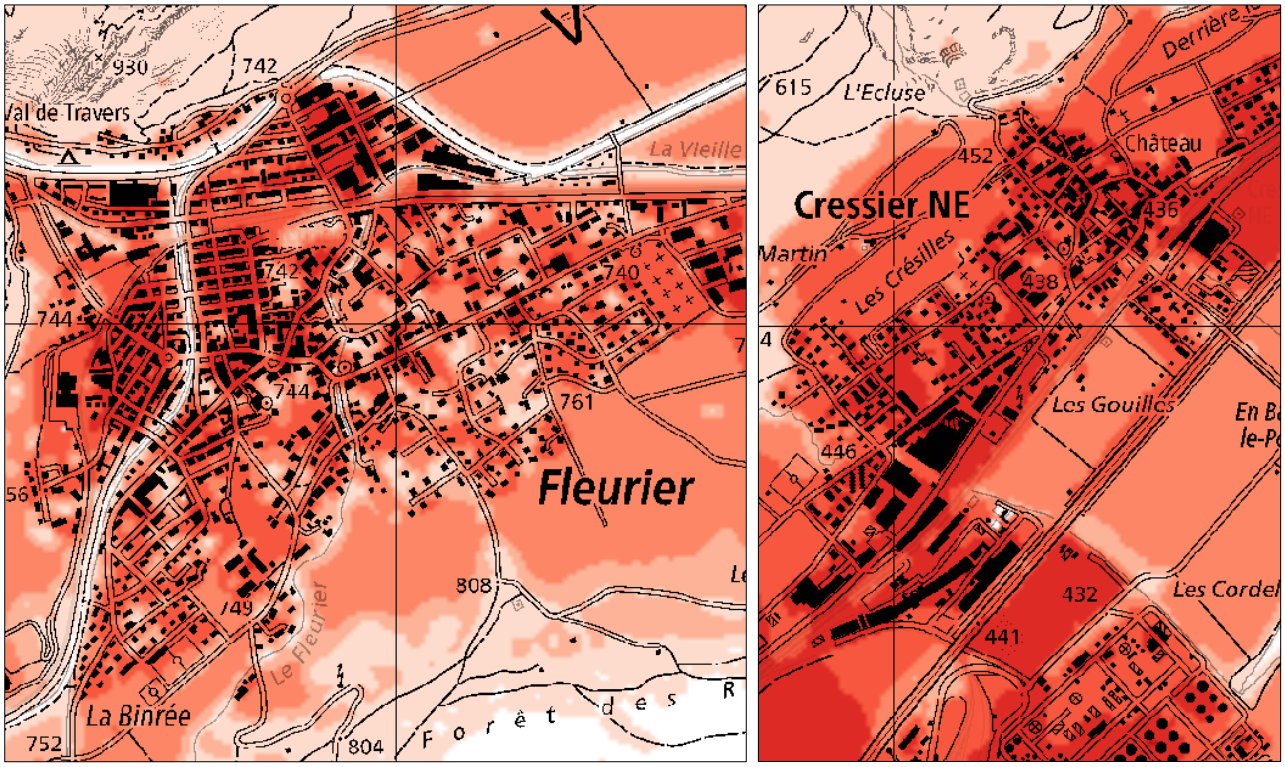


Figure 85 – Nombre annuel moyen de journées tropicales à Fleurier (à gauche) et Cressier (à droite), période P1

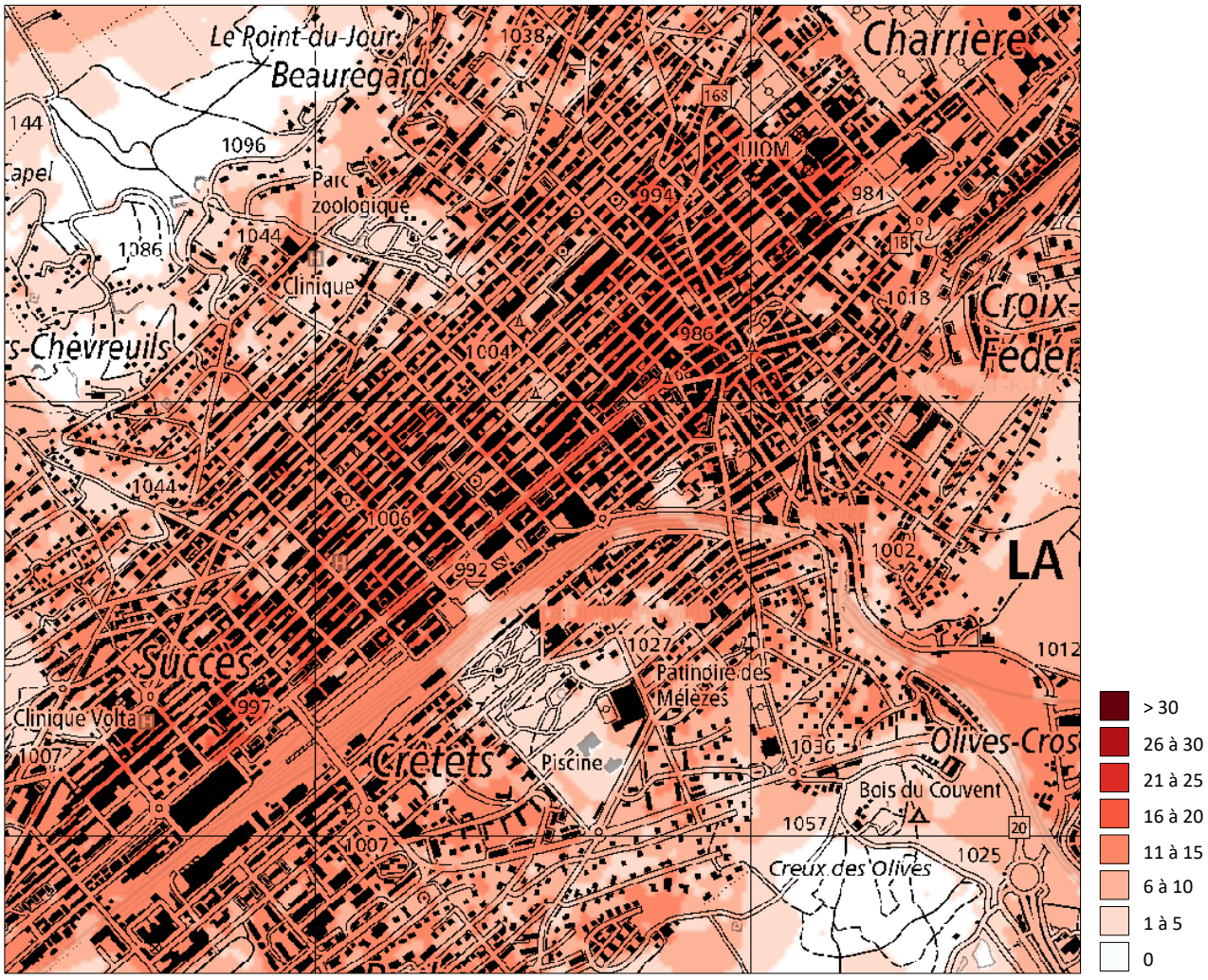


Figure 86 – Nombre annuel moyen de journées tropicales à La Chaux-de-Fonds, période P1

5.3.2.2 ÉVOLUTION DE P0 À P3

L'évolution, de P0 à P3, du nombre annuel moyen de journées tropicales est présentée ci-dessous (*Figure* 87). A côté sont présentées les cartes de différence entre périodes (*Figure 88*).

Contrairement aux nuits tropicales, les journées tropicales sont déjà présentes sur tout le territoire cantonal à P0. Leur nombre est plus important dans les centres urbains et les zones fortement imperméabilisées ainsi qu'à faible altitude. Au Locle et à La Chaux-de-Fonds le nombre annuel moyen de journées tropicales à P0 est de l'ordre de 10 à 15 tandis que sur le Littoral il dépasse 20.

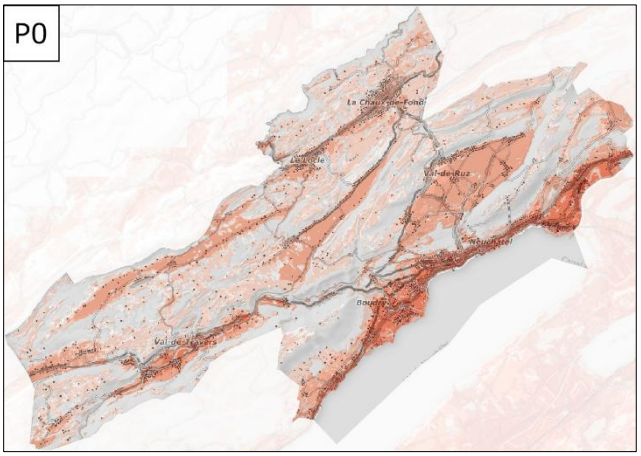
De P0 à P1, le nombre de nuits tropicales augmente partout dans le canton, mais de manière inégale. L'augmentation est plus marquée dans les centres urbains mais ne varie pas selon l'altitude, contrairement à l'augmentation des nuits tropicales. Les augmentations les plus marquées surviennent dans les secteurs de développement. Dans le reste des zones urbanisées, l'augmentation est de l'ordre de 4 journées.

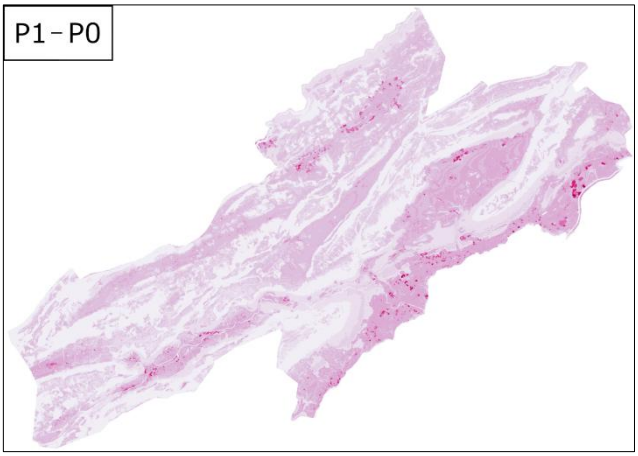
Ainsi, à P1, les valeurs les plus importantes se trouvent sur le Littoral avec un maximum qui dépasse les 25 journées et des valeurs standard aux alentours de 15 à 20 journées tropicales. Dans les villages du Val-de-Travers, les journées tropicales sont de l'ordre d'une vingtaine. Dans les villages du Val-de-Ruz et les villes du Locle et de La Chaux-de-Fonds, ce chiffre reste proche de 15 ou moins.

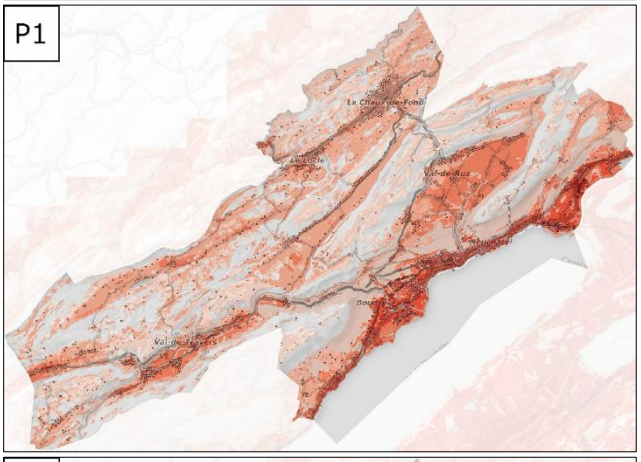
De P1 à P2, l'augmentation du nombre de nuits tropicales est moins marquée qu'entre P0 et P1, avec une augmentation maximale de 4 journées. Cette augmentation est surtout dépendante de l'urbanisation et de l'ombrage. En effet, les zones urbaines et/ou exposées au soleil ont une augmentation plus importante.

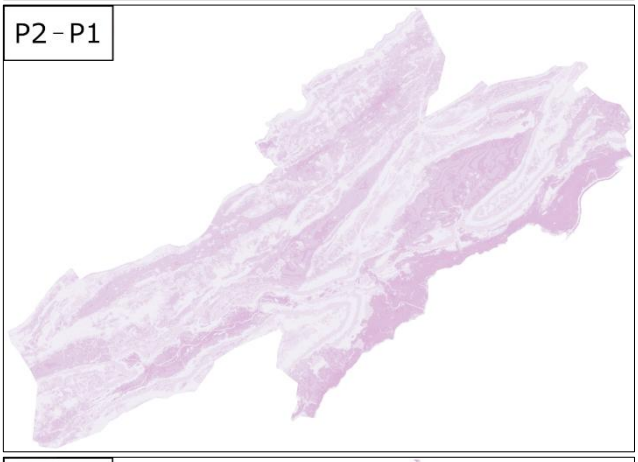
De P2 à P3, l'augmentation suit un phénomène similaire, mais avec une augmentation plus importante avec un maximum de 8 journées supplémentaires.

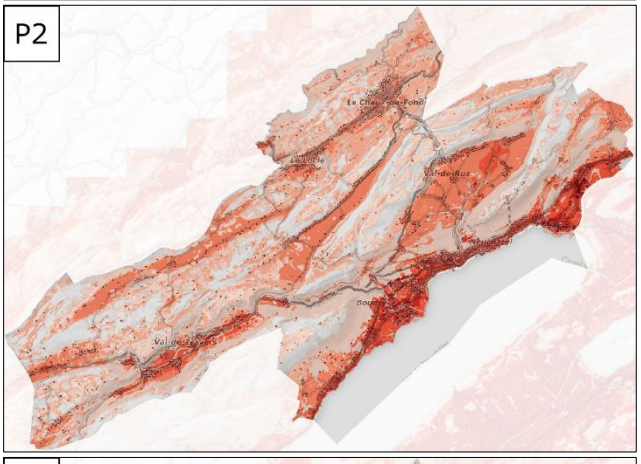
Ainsi, à P3, le Littoral présente de nombreuses valeurs proches du maximum de 36 journées et presque aucune zone urbaine en-dessous des 20 journées tropicales par an. Les villages du Val-de-Travers montrent des valeurs similaires. Dans les villages du Val-de-Ruz ainsi que dans les villes du Locle et de La Chaux-de-Fonds, les zones les plus denses avoisinent les 25 journées tropicales et la majorité dépasse les 15.

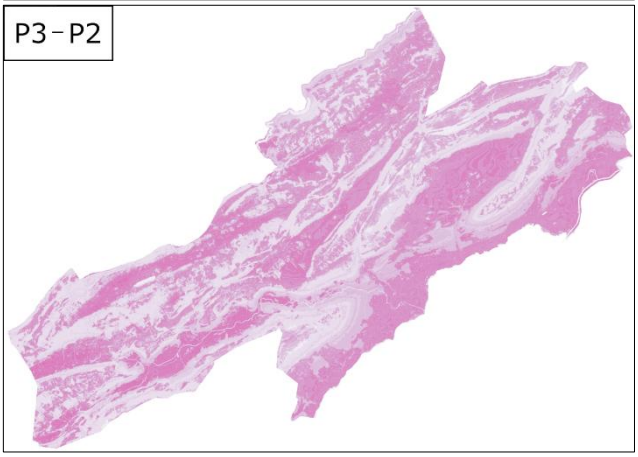












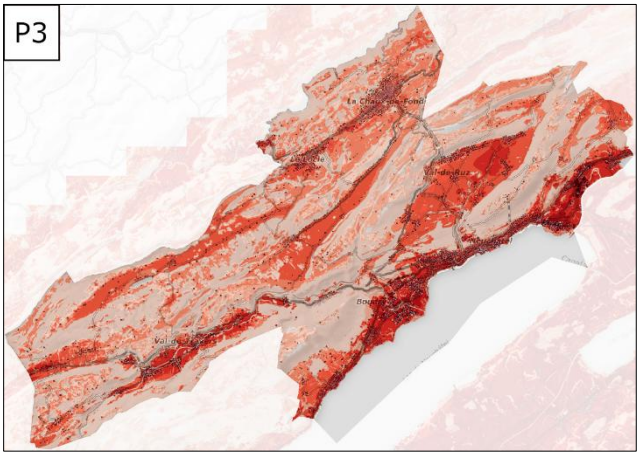
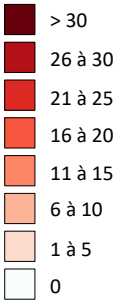
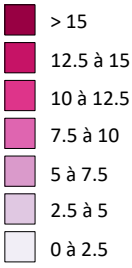


Figure 87 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales, évolution de P0 à P3

Figure 88 – Augmentation du nombre annuel moyen de journées tropicales, de période en période





5.3.3 Jours caniculaires de degré 3

5.3.3.1 SITUATION À P1

La carte cantonale du nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 pour P1 est présentée ci-dessous (*Figure 89*) ainsi qu'un extrait pour le centre-ville de Neuchâtel (*Figure 90*), Fleurier, Cressier (*Figure 91*) et La Chaux-de-Fonds (*Figure 92*).

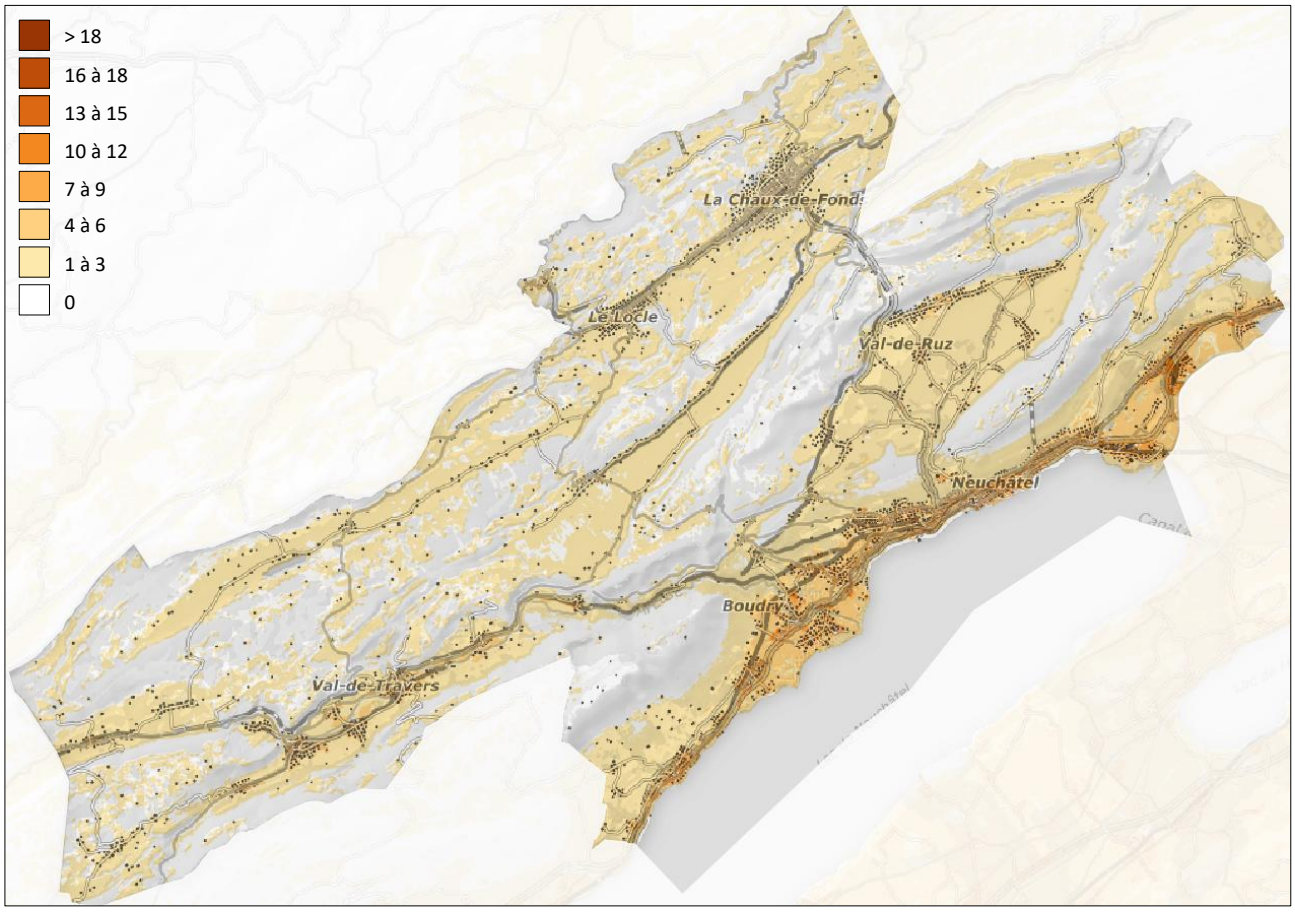


Figure 89 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3, période P1

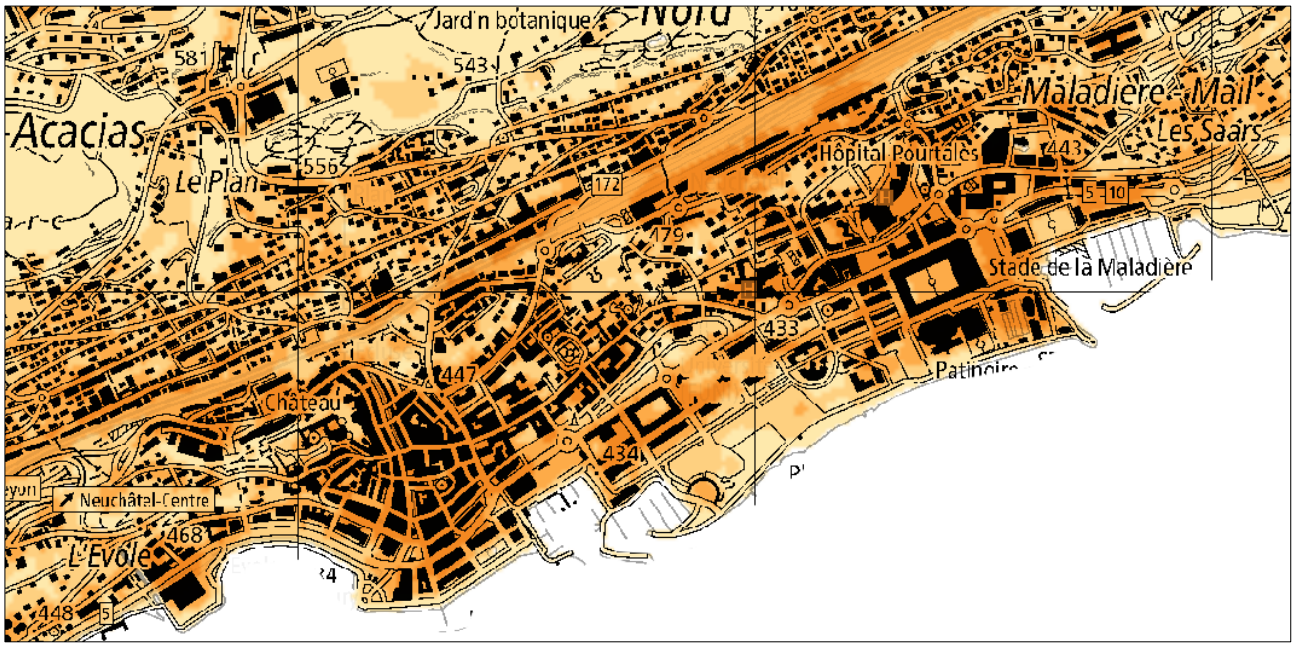


Figure 90 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 à Neuchâtel, période P1

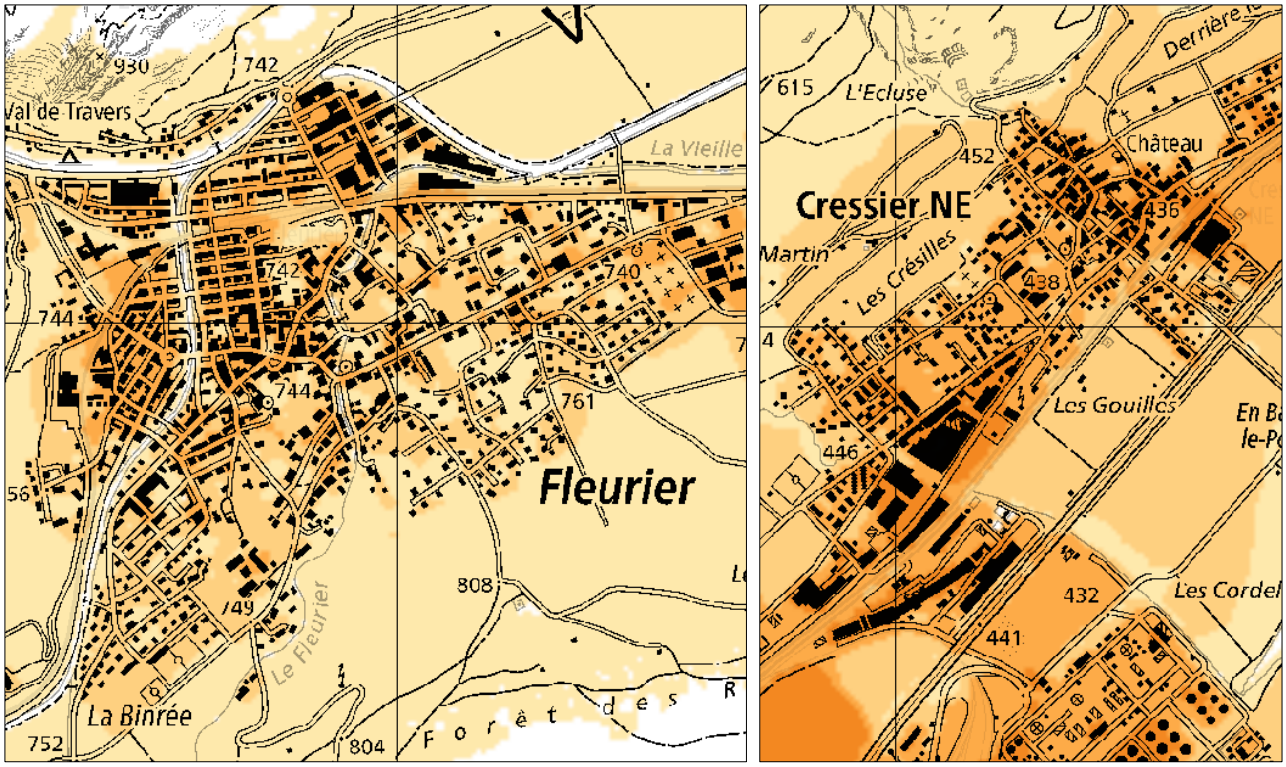


Figure 91 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 à Fleurier (à gauche) et Cressier (à droite), période P1

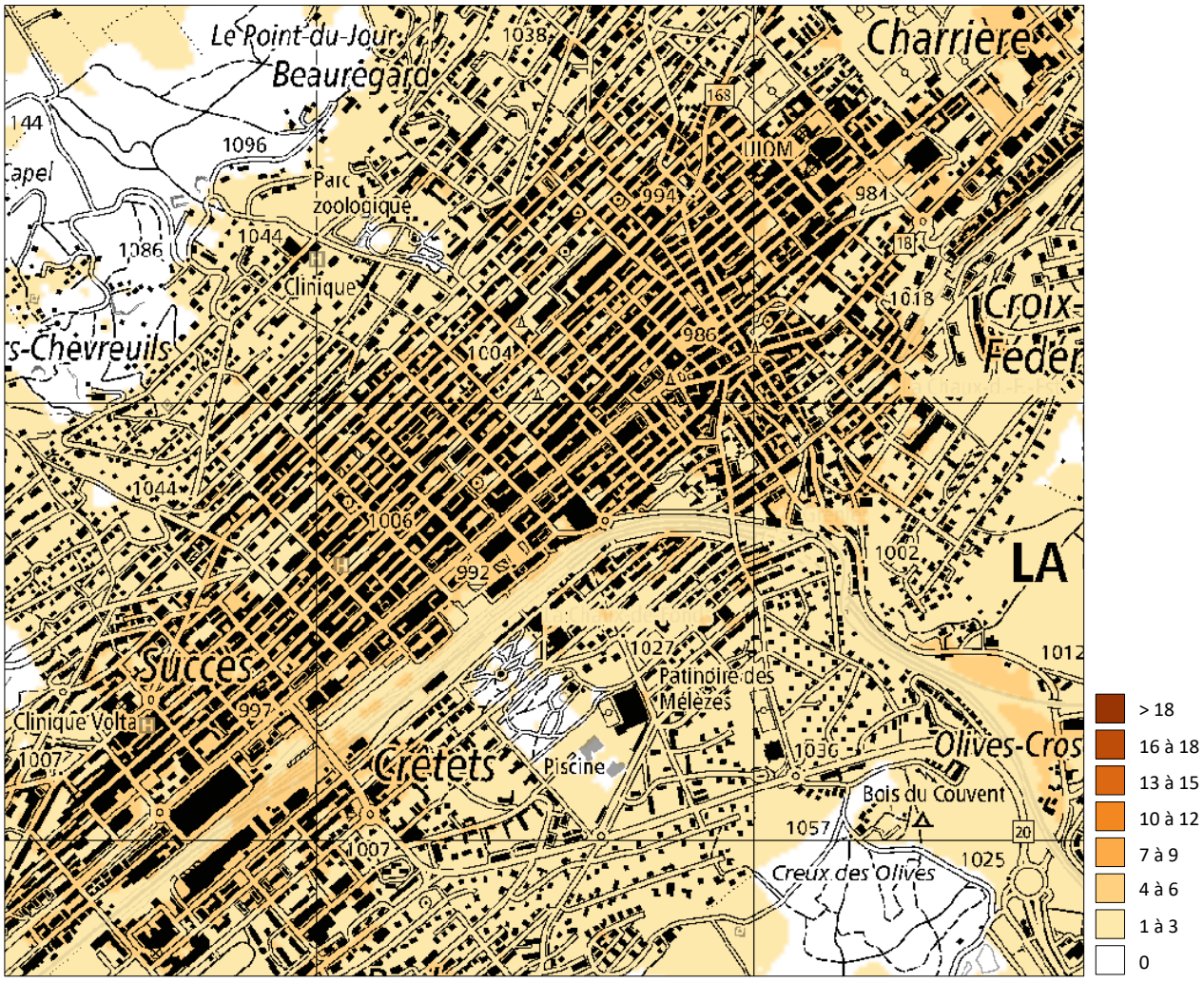


Figure 92 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 à La Chaux-de-Fonds, période P1

5.3.3.2 ÉVOLUTION DE P0 À P3

L'évolution, de P0 à P3, du nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 est présentée ci-dessous (*Figure 93*). A côté sont présentées les cartes de différence entre périodes (*Figure 94*).

A P0, les jours caniculaires sont plutôt rares. Sur le Littoral, le maximum est de 8 jours. Dans les villes de haute altitude, il n'y en a qu'un ou deux, c'est-à-dire une canicule tous les 3-4 ans en moyenne.

De P0 à P1, le nombre de jours caniculaires augmente partout dans le canton, mais de manière inégale. En effet, l'augmentation est plus marquée dans les centres urbains sur l'ensemble du canton, et légèrement plus sur toute la bande littorale.

Ainsi, à P1, les valeurs les plus importantes se trouvent sur le Littoral avec un nombre de 10 jours caniculaires par an atteint en de nombreux endroits. Dans les villages du Val-de-Travers, les jours caniculaires sont légèrement inférieurs à 10. Dans les villages du Val-de-Ruz ainsi que dans les villes du Locle et de La Chaux-de-Fonds, ce chiffre reste proche de 5 ou moins.

De P1 à P2, l'augmentation du nombre de jours caniculaires est moins marquée qu'entre P0 et P1, avec une augmentation maximale de 3 jours. Elle reste toutefois inégalement répartie sur le territoire, avec une augmentation plus prononcée dans les zones urbaines et légèrement plus prononcée à faible altitude.

De P2 à P3, l'augmentation du nombre de jours caniculaires est dans l'ensemble plus marquée qu'entre P0 et P1, avec une augmentation de l'ordre de 4 à 5 jours caniculaires annuels dans les zones urbaines ou dégagées de faible altitude.

Ainsi, à P3, le Littoral présente de nombreuses valeurs proches du maximum de 18 jours et presque aucune zone urbaine en-dessous des 10 jours caniculaires par an. Les villages du Val-de-Travers montrent des valeurs similaires, quoique légèrement plus faibles. Dans les villages du Val-de-Ruz ainsi que dans les villes du Locle et de La Chaux-de-Fonds, les zones les plus denses sont aux alentours de 10 jours caniculaires et la majorité dépasse les 5.

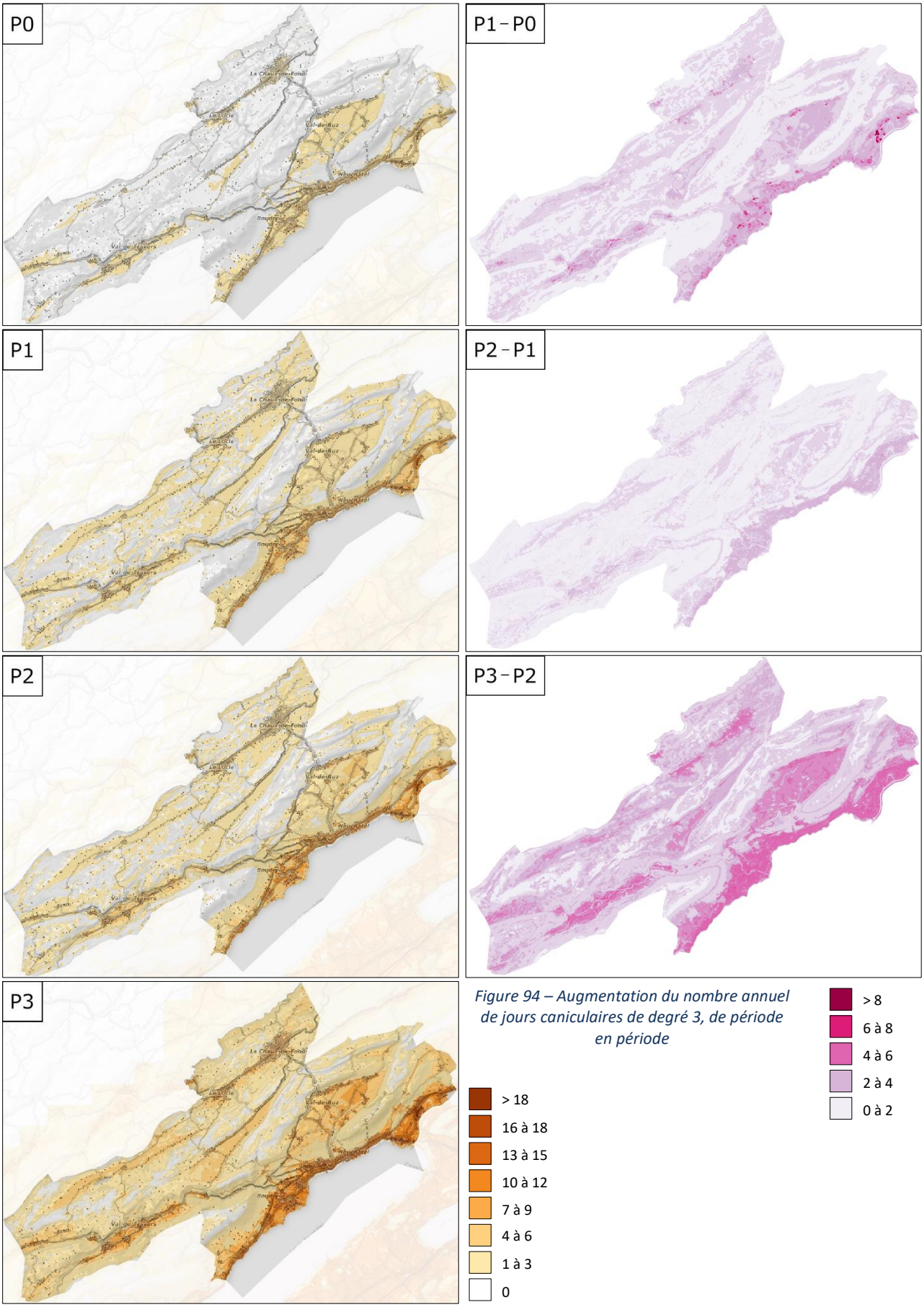


Figure 93 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3, évolution de P0 à P3

Figure 94 – Augmentation du nombre annuel de jours caniculaires de degré 3, de période en période

5.3.4 Synthèse

Le nombre annuel moyen de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3 présentent des points communs, mais également des différences.

Le premier point commun est le fait de montrer, pour chaque période, des résultats cohérents avec les simulations de température issues de l'analyse climatique. En effet, outre les différences à grande échelle liées notamment à la topographie du canton, des variations locales influencent l'occurrence de ces conditions particulières. Les zones les plus denses, les moins bien ventilées et les plus imperméabilisées comptabilisent – et comptabiliseront – le plus de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires.

Un autre point commun est que l'augmentation entre périodes est toujours la plus faible entre P1 et P2, et toujours la plus marquée entre P2 et P3.

Au niveau des différences, il y a l'augmentation de période en période. Pour les nuits tropicales, l'urbanisation (densité et imperméabilisation) favorise l'augmentation des nuits tropicales tandis que l'altitude la limite. Pour les journées tropicales, l'altitude n'a pratiquement pas d'impact et ce sont davantage l'urbanisation et le manque d'ombrage qui favorisent leur augmentation. L'augmentation des jours caniculaires est un mélange entre les deux. L'altitude influence leur augmentation, mais pas autant que l'urbanisation.

Enfin, il convient de noter que la comptabilisation de ces phénomènes spécifiques que sont les nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3 dépend de seuils de température (et de durée). Ainsi, une même augmentation de température entre deux périodes ou entre deux lieux ne produit pas nécessairement une augmentation homogène de l'occurrence de ces phénomènes spécifiques.

Conclusion

Cette analyse climatique a permis de modéliser les conditions climatiques des journées et des nuits d'été autochtones moyennes du canton de Neuchâtel pour la période de référence (1981-2010) ainsi que les périodes futures. La simulation a été effectuée avec le modèle FITNAH-3D, selon le scénario climatique RCP8.5 et sans mesures d'atténuation dans les secteurs urbanisés. Les différents résultats concernent l'évolution des températures, l'effet d'îlot de chaleur et les courants d'air nocturnes. Ils ont permis d'identifier, actuellement mais également à l'avenir, les zones urbanisées où le stress thermique est le plus élevé ainsi que celles concernées par des nuits tropicales. L'évaluation bioclimatique a permis de fournir des cartes facilitant l'identification des secteurs urbains les plus touchés par les fortes chaleurs ainsi que les espaces verts les plus importants pour compenser la forte charge thermique. Le calcul du nombre annuel moyen de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires de degré 3 a permis, en plus de leur répartition spatiale, de prédire l'occurrence de ces phénomènes.

Ainsi, la première étape de la mesure A1 du Plan climat neuchâtelois 2024-2027, qui consiste à localiser les îlots de chaleur, est achevée. Les résultats produits permettent également d'établir, comme souhaité, le premier jeu de données climatiques cantonales, qui seront utilisées dans de nombreux projets. Elles serviront d'aide à la décision pour les politiques publiques telles que le développement territorial, la gestion des écosystèmes, l'agriculture, la sylviculture ou la santé, qui devront être menées compte tenu de l'évolution climatique. Les résultats de l'étude constitueront aussi un important support de dialogue et de réflexion pour les porteurs de projets.

Des études basées sur le même modèle ont été menées dans plus d'une dizaine de cantons incluant les plus grandes agglomérations dont les villes de Zürich, Bâle, Genève, Lausanne, Berne, Lucerne. L'étude neuchâteloise contribue donc à l'homogénéité des analyses climatiques au niveau suisse, ainsi qu'aux échanges entre cantons sur les mesures de lutte contre les effets du changement climatique.

Pour faire suite à cette première phase, le canton, par son service cantonal de l'aménagement du territoire, a publié en mai 2025 un guide de sensibilisation, avec des propositions d'actions pragmatiques et diversifiées d'adaptation au réchauffement climatique pour le Canton de Neuchâtel, à l'attention des communes et des planificateurs.

Liste des acronymes

ICU	Ilot de Chaleur Urbain
PET	Température physiologique équivalente (*Physiologic Equivalent Temperature*)
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MNC	Modèle Numérique de Canopée
MNB	Modèle Numérique de Bâtiment
SGRF	Service de la Géomatique et du Registre Foncier (canton de Neuchâtel)
SCAT	Service Cantonal de l'Aménagement du Territoire (canton de Neuchâtel)
SFFN	Service de la Faune de la Forêt et de la Nature (canton de Neuchâtel)
SENE	Service de l'Energie et de l'Environnement (canton de Neuchâtel)
OFEV	Office Fédéral de l'Environnement
IGN	Institut Géographique National (France)

Liste des figures

Figure	Page
Figure 1 – Extrait de la mesure A1 du plan climat neuchâtelois 2024-2027	11
Figure 2 – Températures et précipitations sur la période 1991-2020 des stations MétéoSuisse de Neuchâtel (à gauche) et La Chaux-de-Fonds (à droite)	14
Figure 3 – Évolution des températures estivales (moyenne des mois de juin, juillet et août, JJA) de la Suisse de 1864 à nos jours par rapport à la période 1961-1990 (lien vers la page MétéoSuisse)	14
Figure 4 – Forçage radiatif des scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 (Meinshausen et al. 2011, adapté par GEO-NET)	15
Figure 5 – Estimation de l'augmentation de la température estivale dans le canton de Neuchâtel par période et par scénario d'émission de gaz à effet de serre, par rapport à la période 1981-2010 (NCCS 2024)	16
Figure 6 – Représentation schématique de l'effet d'îlot de chaleur durant la journée, avec des températures typiques du canton de Neuchâtel en conditions autochtones, sur la période 1981-2010	19
Figure 7 – Illustration schématique de la brise urbaine	20
Figure 8 – Illustration schématique de la brise de terre	21
Figure 9 – Illustration schématique de la brise de pente	22
Figure 10 – Débit d'air froid à travers une colonne d'écoulement d'air	23
Figure 11 – Les effets du stress thermique sur l'organisme	24
Figure 12 – Représentation schématique des différents paramètres influençant la sensation de chaleur	25
Figure 13 – Division de la zone d'étude en 4 carreaux	27
Figure 14 – Raster à 10 m de l'occupation des sols pour la ville de Neuchâtel	31
Figure 15 – Raster à 10 m de l'occupation des sols pour la ville de La Chaux-de-Fonds	32
Figure 16 – Raster à 10 m de l'occupation des sols à P0 (à gauche) et à P1 (à droite) d'une zone de développement	32
Figure 17 – Régression linéaire permettant de lier la température de l'eau à l'altitude	34
Figure 18 – Extrait de la couche d'utilisation du sol à Neuchâtel	36
Figure 19 – Extrait de la couche d'utilisation du sol à La Chaux-de-Fonds	36
Figure 20 – Les stations de MétéoSuisse dans le canton de Neuchâtel (source MétéoSuisse)	39
Figure 21 – Comparaison de la température modélisée par FITNAH-3D avec les mesures de la station MétéoSuisse de Neuchâtel	41
Figure 22 – Comparaison de la température nocturne (4h) modélisée par FITNAH-3D avec les valeurs à 4h du 19 juin 2019 de 41 stations	42
Figure 23 – Normalisation de la distribution d'une variable par le score Z	48
Figure 24 – Distributions originales et scores Z de chaque normalisation effectuée	49
Figure 25 – Arbre de décision utilisé pour l'évaluation de l'importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation	53
Figure 26 – Température physiologique équivalente, période P0	54
Figure 27 – Température physiologique équivalente au Locle, période P0	55

Figure 28 – Température physiologique équivalente à Neuchâtel, période P0	55
Figure 29 – PET, évolution de P0 à P3	57
Figure 30 – Histogramme normalisé de la PET des zones urbanisées, de P0 à P3	60
Figure 31 – Histogramme normalisé de la PET des espaces verts non forestier, de P0 à P3	60
Figure 32 – Histogramme normalisé de la PET des forêts, de P0 à P3	60
Figure 33 – Température nocturne de l'air, période P0	63
Figure 34 – Température nocturne de l'air à La Chaux-de-Fonds, période P0	63
Figure 35 – Température nocturne de l'air à Milvignes, période P0	64
Figure 36 – Température nocturne de l'air au Landeron, période P0	64
Figure 37 – Température nocturne de l'air pour le canton (à gauche) et les zones urbanisées (à droite), évolution de P0 à P3	66
Figure 38 – Histogrammes des températures nocturnes de l'air dans les zones urbanisées, de P0 à P3	67
Figure 39 – Effet d'îlot de chaleur à La Chaux-de-Fonds, période P0	68
Figure 40 – Effet d'îlot de chaleur au Locle, période P0	68
Figure 41 – Effet d'îlot de chaleur à Neuchâtel, période P0	69
Figure 42 – Effet d'îlot de chaleur à Couvet, période P0	70
Figure 43 – Effet d'îlot de chaleur à Cernier, période P0	70
Figure 44 – Flèches des vents supérieurs à 0.5 m/s, agrégées à 200 m, période P0	72
Figure 45 – Débit d'air froid et vents supérieurs à 0.5 m/s à Bevaix, période P0	73
Figure 46 – Débit d'air froid et vents supérieurs à 0.5 m/s au Val-de-Ruz, période P0	73
Figure 47 – Zones de production d'air froid, période P0	74
Figure 48 – Zones d'impact d'air froid, période P0	75
Figure 49 – Zones d'impact d'air froid sur le littoral entre Corcelles-Cormondrèche et Neuchâtel, période P0	75
Figure 50 – Évaluation diurne des espaces de transport à Neuchâtel, à P0	78
Figure 51 – Évaluation diurne des espaces bâtis à Neuchâtel, à P0	78
Figure 52 – Évaluation diurne des espaces de transport au Locle, à P0	79
Figure 53 – Évaluation diurne des espaces bâtis au Locle, à P0	79
Figure 54 – Histogramme de l'évaluation diurne des espaces bâtis à P0 et P1	80
Figure 55 – Situation diurne des espaces bâtis à Neuchâtel, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)	80
Figure 56 – Situation diurne des espaces bâtis au Locle, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)	80
Figure 57 – Évaluation nocturne des espaces de transport à Neuchâtel, à P0	81
Figure 58 – Évaluation nocturne des espaces bâtis à Neuchâtel, à P0	81
Figure 59 – Évaluation nocturne des espaces de transport au Locle, à P0	82
Figure 60 – Évaluation nocturne des espaces bâtis au Locle, à P0	82
Figure 61 – Histogramme de l'évaluation nocturne des espaces bâtis	83
Figure 62 – Situation nocturne des espaces bâtis à Neuchâtel, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)	83
Figure 63 – Situation nocturne des espaces bâtis au Locle, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)	83
Figure 64 – Évaluation diurne des espaces de compensation à Neuchâtel, à P0	84
Figure 65 – Évaluation diurne des espaces de compensation au Locle, à P0	85

Figure 66 – Histogramme de l'évaluation diurne des espaces de compensation à P0 et P1	86
Figure 67 – Importance bioclimatique diurne des espaces de compensation à Neuchâtel, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)	86
Figure 68 – Importance bioclimatique diurne des espaces de compensation au Locle, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)	86
Figure 69 – Évaluation nocturne des espaces de compensation à Neuchâtel, à P0	87
Figure 70 – Évaluation nocturne des espaces de compensation au Locle, à P0	88
Figure 71 – Histogramme de l'évaluation nocturne des espaces de compensation à P0 et P1	88
Figure 72 – Importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation à Neuchâtel, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)	89
Figure 73 – Importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation au Locle, évolution de P0 (à gauche) à P1 (à droite)	89
Figure 74 – Température moyenne d'un jour estival standard, évolution de P0 à P3	95
Figure 75 – Valeur médiane des températures minimales CH2018 des mois de juin, juillet et août, évolution de P0 à P3	97
Figure 76 – Variation spatiale à haute résolution de la température minimale journalière issue de FITNAH, évolution de P0 à P3	97
Figure 77 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales, période P1	101
Figure 78 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales à Neuchâtel, période P1	101
Figure 79 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales à Fleurier (à gauche) et Cressier (à droite), période P1	102
Figure 80 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales à La Chaux-de-Fonds, période P1	102
Figure 81 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales, évolution de P0 à P3	104
Figure 82 – Augmentation du nombre moyen annuel de nuits tropicales, de période en période	104
Figure 83 – Nombre annuel moyen de journées tropicales, période P1	105
Figure 84 – Nombre annuel moyen de journées tropicales à Neuchâtel, période P1	105
Figure 85 – Nombre annuel moyen de journées tropicales à Fleurier (à gauche) et Cressier (à droite), période P1	106
Figure 86 – Nombre annuel moyen de journées tropicales à La Chaux-de-Fonds, période P1	106
Figure 87 – Nombre annuel moyen de nuits tropicales, évolution de P0 à P3	108
Figure 88 – Augmentation du nombre annuel moyen de journées tropicales, de période en période	108
Figure 89 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3, période P1	109
Figure 90 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 à Neuchâtel, période P1	109
Figure 91 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 à Fleurier (à gauche) et Cressier (à droite), période P1	110
Figure 92 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3 à La Chaux-de-Fonds, période P1	110
Figure 93 – Nombre annuel moyen de jours caniculaires de degré 3, évolution de P0 à P3	112
Figure 94 – Augmentation du nombre annuel de jours caniculaires de degré 3, de période en période	112

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau 1 – Moyennes climatiques des stations de mesure de Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds pour la période 1991-2020 (source MétéoSuisse)	13
Tableau 2 – Sensation physiologique et niveau de stress thermique selon les valeurs de l'indice PET (selon VDI 2004)	26
Tableau 3 – Synthèse des données géographiques fournies par le SGRF	29
Tableau 4 – Synthèse des données géographiques entrant dans le modèle FITNAH-3D	30
Tableau 5 – Les 11 classes d'occupation des sols	31
Tableau 6 – Température des eaux de surface à P0	34
Tableau 7 – Augmentation de la température de l'eau pour les périodes futures	35
Tableau 8 – Les catégories de la couche d'utilisation du sol	35
Tableau 9 – Température de départ de la modélisation pour chaque période	40
Tableau 10 – Température moyenne de l'air à 4h des espaces verts et ouverts, par tranche d'altitude	43
Tableau 11 – Taux de production d'air froid moyen des espaces verts	44
Tableau 12 – Débit d'air froid moyen et vitesse moyenne du vent dans les espaces urbains	45
Tableau 13 – Variables et critères utilisés pour l'évaluation bioclimatique	46
Tableau 14 – Processus d'établissement de la carte d'évaluation bioclimatique, exemple avec la PET à 14h	47
Tableau 15 – Niveaux d'évaluation de la situation bioclimatique relative selon la situation et le type d'espace	49
Tableau 16 – Échelle d'évaluation de la situation bioclimatique relative des espaces d'action	50
Tableau 17 – Échelle d'évaluation de l'importance bioclimatique des espaces de compensation	50
Tableau 18 – Critères d'évaluation de l'importance bioclimatique diurne des forêts	51
Tableau 19 – Évaluation de l'importance bioclimatique diurne des espaces verts et ouverts	51
Tableau 20 – Débit d'air froid moyen et vitesse du vent moyenne des espaces verts ou ouverts à P0 et P1	52
Tableau 21 – Température physiologique équivalente moyenne de 10 lieux caractéristiques du canton et leur évolution de P0 à P3	59
Tableau 22 – Zones urbanisées concernées par des nuits tropicales	67
Tableau 23 – Légende des cartes de la situation bioclimatique relative des espaces d'action	77
Tableau 24 – Légende de la carte d'importance bioclimatique diurne des espaces de compensation	84
Tableau 25 – Légende de la carte d'importance bioclimatique nocturne des espaces de compensation	87
Tableau 26 – Exemple de comptabilisation des jours caniculaires de degré 3	91
Tableau 27 – Médiane des températures minimales et maximales des stations MétéoSuisse pour les années 2020 à 2024	93
Tableau 28 – Évaluation des différentes simulations CH2018	93
Tableau 29 – Comptabilisation du nombre de nuits tropicales, journées tropicales et jours caniculaires entre 2019 et 2024 aux stations météorologiques de l'Université de Neuchâtel	99

Liste des annexes

Annexe 1 – Préparation de la couche vectorielle de l'occupation des sols

Annexe 2 – Préparation de la couche des secteurs de développement

Annexe 3 – Préparation de la couche d'utilisation du sol

Bibliographie

1. Barlag A.-B. (1997): Möglichkeiten der Einflussnahme auf das Stadtklima; In: VDI-Berichte; 1330; S. 127-146.
2. Caissie D. (2006): The thermal regime of rivers. A review. In Freshwater Biol 51 (8), S.1389-1406. https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.
3. Gross G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research (10): 483-498.
4. Gross G. (2012): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Microscale numerical experiments. – Meteorol, 21, 399–412. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0363
5. Gross G. (2014): On the Parametrization of Urban Land Use in Mesoscale Models. Boundary-Layer Meteorology Vol. 150 No. 2, 319–326.
6. Gross G. (2019): On the range of boundary layer model results depending on inaccurate input data. Meteorol. Z. (Contrib. Atm. Sci.), Vol. 28, No. 3, 225–234
7. Gross G. (2021): On the importance of a viscous surface layer to describe the lower boundary condition for temperature. Meteorol. Z. (Contrib. Atm. Sci.), Vol. 30, No. 3, 271–278.
8. Höppe P. (1999): The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. Int. J. Biometeorol, 43, 71-75. https://doi.org/10.1007/s004840050118
9. Krug A., H.-G. Mücke (2018): Auswertung Hitze-bezogener Indikatoren als Orientierung der gesundheitlichen Belastung. Umwelt und Mensch – Informationsdienst, 2/2018, 67-79. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/internetversion-02-2018.pdf
10. Matzarakis A., H. Mayer, M.G. Iziomon (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. Int. J. Biometeorol. 43, 76-84. https://doi.org/10.1007/s004840050119
11. Matzarakis A., F. Rutz, H. Mayer (2010): Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. Int. J. Biometeorol. 54, 131-193. https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0
12. Meinshausen M., S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders & D.P. P. van Vuuren (2011): The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their extension from 1765 to 2500. Climatic Change 109, 213. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z
13. NCCS (2024): Atlas web CH2018. Température. Déviation de la période standard 1981-2010. Ct. Neuchâtel. Été. En ligne : https://service.meteoswiss.ch/productbrowser/productDisplay/climate-ch2018-barplot-scen?cg1-static.emissionScenario=RCP2.6-RCP8.5&cg1-static.timeOfYear=JJA&cg1-static.language=fr&cg1-static.indicatorScenario=tas&cg1-static.region=NE&cg1-static.productName=climate-ch2018-barplot-scen&lang=fr
14. Oke T.R. (1987). Boundary Layer Climates (2nd ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203407219
15. VDI (2004) : VDI Richtlinie 3787, Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-9-umweltmeteorologie-beruecksichtigung-von-klima-und-lufthygiene-in-raeumlichen-planungen

16. VDI (2008) : VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3785-blatt-1-umweltmeteorologie-methodik-und-ergebnisdarstellung-von-untersuchungen-zum-planungsrelevanten-stadtklima

17. VDI (2015) : VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-1-umweltmeteorologie-klima-und-lufthygienekarten-fuer-staedte-und-regionen

18. VDI (2017) : VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8. Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3783-blatt-8-umweltmeteorologie-messwertgestuetzte-turbulenzparametrisierung-fuer-ausbreitungsmodelle

19. VDI (2022) : VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-2-umweltmeteorologie-methoden-zur-human-biometeorologischen-bewertung-der-thermischen-komponente-des-klimas

Annexe 1

PRÉPARATION DE LA COUCHE VECTORIELLE DE L'OCCUPATION DES SOLS

Cette couche contient l'occupation des sols pour le canton de Neuchâtel. Il s'agit d'une partition du territoire (ni trou ni superposition de géométries) figurant tous les types d'objet de la couche « couverture du sol » de la mensuration officielle. Les couverts et les piscines, qui appartiennent à la couche « objets divers » de la mensuration officielle, ont été intégrés à la couche de sorte à conserver une partition du territoire. Pour les bâtiments et couverts, les avant-toits ont également été intégrés.

Pour chacun des objets, un attribut (« imperm ») indique si la surface est imperméable ou non. Cette couche peut donc également être utilisée comme couche des surfaces imperméables.

Pour chaque élément de construction (bâtiments et couverts), deux attributs supplémentaires sont renseignés : « zmin », correspond à l'altitude de l'empreinte cadastrale et « hmoy », la hauteur moyenne du toit. Cette couche peut donc aussi être utilisée comme couche des hauteurs de bâtiments.

Attribut	**Définition**
couche	Indique la provenance de l'objet : - vcity : « virtualcitybati3d » (cadastre 3D des bâtiments) - CS : « couverture du sol » (mensuration officielle) - OD : « objets divers » (mensuration officielle)
des	Abréviation de « désignation » : permet de qualifier l'objet (voir fichier Excel)
imperm	Indique si la surface est considérée comme imperméable ou pas ('oui' ou 'non')
zmin	Altitude minimale du MNT au sein de l'empreinte cadastrale.
hmoy	Hauteur moyenne du bâtiment (respectivement du couvert) : - calculée à partir de notre cadastre 3D des bâtiments si l'attribut « couche » = « vcity » - calculée à partir du relevé lidar2022 (points de la classe building) si l'attribut « couche » = « CS » ou « OD »

Pour les bâtiments et les couverts, il a été décidé d'intégrer les avant-toits à l'objet.

- Cela a été fait pour tous les objets qui sont à jour dans le cadastre 3D des bâtiments : ces objets ont comme attribut « couche » la valeur « vcity ».
- Pour tous les objets qui ne sont pas à jour dans le cadastre 3D, c'est l'empreinte cadastrale de la mensuration officielle qui a été prise : ces objets ont comment attribut « couche » la valeur « CS » ou « OD ».

Le tableau ci-dessous indique, pour chaque type d'objet de la couche, s'il est considéré comme perméable ou imperméable.

couche	des	imperm
vcity	batiment	oui
	couvert	oui
CS	batiment	oui
	dure_route-chemin	oui
	dure_chemin de fer	non
	dure_place d'aviation	oui
	dure_bassin	oui
	dure_accès-place	oui
	dure_trottoir	oui
	dure_îlot	oui
	dure_autre	oui
	verte_jardin	non
	verte_pré-champ	non
	verte_pâturage	non
	verte_marais	non
	verte_tourbière	non
	verte_verger	non
	verte_vigne	non
	verte_autre	non
	eau_cours d'eau	non
	eau_eau stagnante	non
	eau_roselière	non
	bois_forêt	non
	bois_tourbière boisée	non
	bois_pâturage boisé dense	non
	sans végétation_rocher	oui
	sans végétation_décharge	oui
	sans végétation_enrochement	oui
	sans végétation_éboulis	non
	sans végétation_gravière	non
	sans végétation_inculte	non
OD	couvert	oui
	piscine	oui

Annexe 2

PRÉPARATION DE LA COUCHE DES SECTEURS DE DÉVELOPPEMENT URBAIN FUTUR

OBJECTIF

Etablir une couche géométrique de type polygone contenant les périmètres non construits destinés à l'être à l'horizon 2040 ainsi que, pour chacun, la part occupée par les différents types d'occupation du sol.

Cette couche a servi de base à l'établissement, par GEO-NET, d'une couche raster de résolution 10 m de l'occupation des sols à l'horizon 2040.

Les catégories d'occupation des sols pour le canton entier sont indiquées ci-dessous.

Surface artificielle		Surface naturelle (végétation)		Surface naturelle (autre)	
	Bâtiment		Champ, gazon		Eaux de surface
	Surface imperméable		Arbre sur sol naturel		Roche nue
	Surface semi-imperméable		Arbre sur surface semi-imperméable		Eboulis, sable
	Voies ferrées		Arbre sur surface imperméable		

Pour la couche des secteurs de développement, nous allons nous concentrer sur les 4 catégories qui, dans les zones à bâtir déjà construites, sont représentées à plus de 1 %. Ce sont les catégories « Bâtiment », « Surface imperméable », « Champs, gazon » et « Arbre sur sol naturel ».

DONNÉES DE BASE

- Couche « at100 affectations primaires » (état au 31 octobre 2023) : zones d'affectation en vigueur.
- Couche « at100 affectations primaires provisoire » (état au 31 octobre 2023) : zones d'affectation des PAL en cours de révision.
- Couche « zones à bâtir non construites » (état au 31 décembre 2021) : parcelles non construites ou partiellement construites situées en zone à bâtir (zone d'habitation, zone d'activités, zone mixte et zone centrale). La couche a été mise à jour et les erreurs topologiques ont été corrigées.
- Couche « évolution potentielle de la zone à bâtir » du plan directeur cantonal, catégorie « augmentation » : secteurs d'extension potentielle à la zone à bâtir à l'avenir.
- Couche « zones réservées » : secteurs qui ont été rendus inconstructibles pendant 5 ans dans l'attente de la révision du PAL.
- Pôles de développement du plan directeur cantonal et autres secteurs stratégiques ainsi que leurs fiches (E_11 et U_13).

ETAPE PRÉLIMINAIRE : CALCUL DES VALEURS MOYENNES D'OCCUPATION DES SOLS DANS LES ZONES À BÂTIR DÉJÀ CONSTRUITES

Les zones à bâtir déjà construites, ou faisant l'objet d'une demande de permis de construire jusqu'en avril 2023, et ne disposant plus de potentiel constructible, sont réparties dans 4 catégories d'affectation : zone d'activité économique, zone d'habitation, zone mixte et zone centrale.

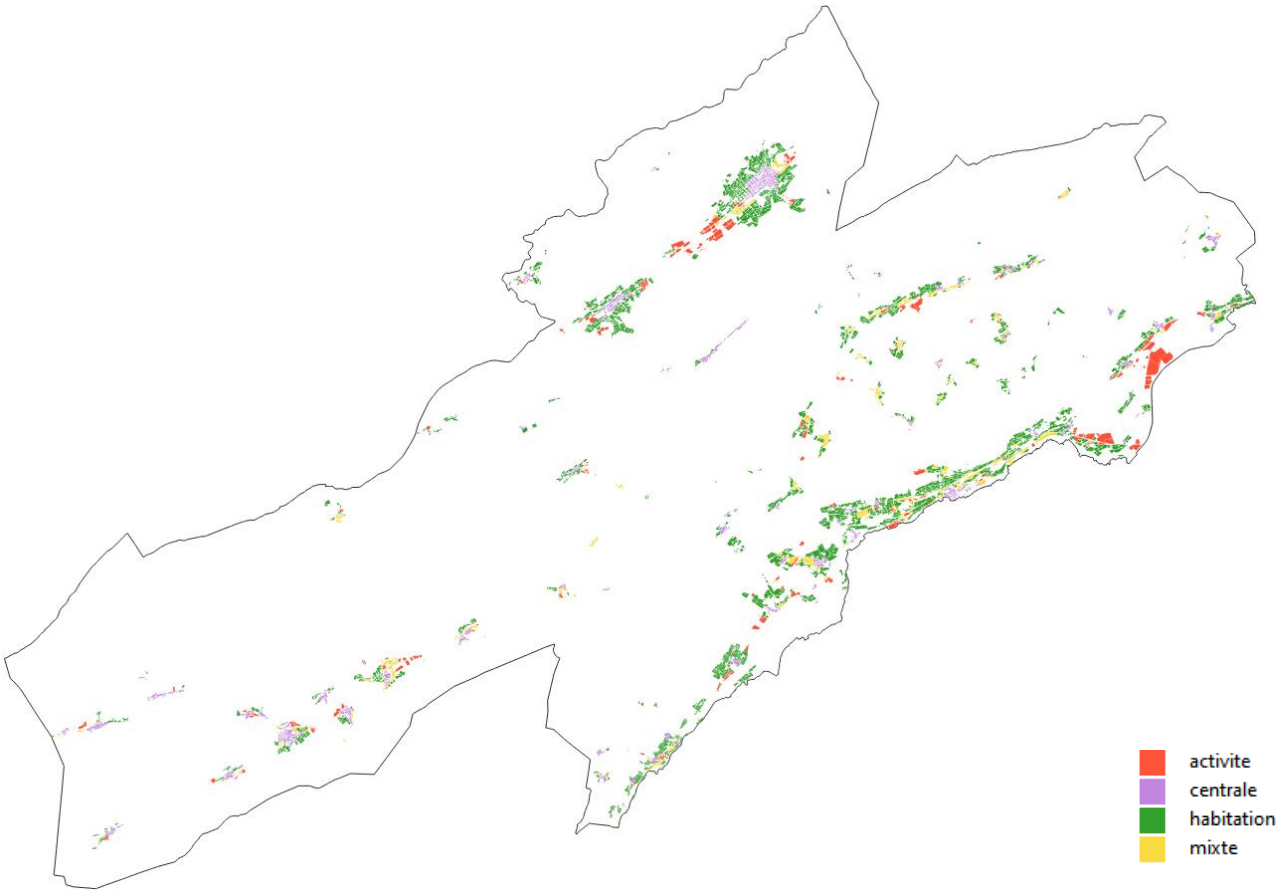


Figure 1 – Répartition des catégories d'affectation

Pour chaque type d'affectation, une répartition moyenne des différentes occupations des sols est calculée à partir de la carte d'occupation des sols cantonale établie par GEO-NET le 27.07.2023. Les valeurs obtenues sont les suivantes, sachant que les occupations du sol représentées à moins de 1% n'ont pas été considérées.

Code	Occupation	Activité	Habitation	Mixte	Centrale
9	Champ, gazon	23 %	49 %	29 %	29 %
20	Bâtiment	30 %	21 %	33 %	42 %
22	Surface imperméable	44 %	17 %	29 %	20 %
25	Arbre sur sol naturel	3 %	13 %	9 %	8 %

Tableau 2 – Part de chaque catégorie d'occupation des sols dans les zones bâties

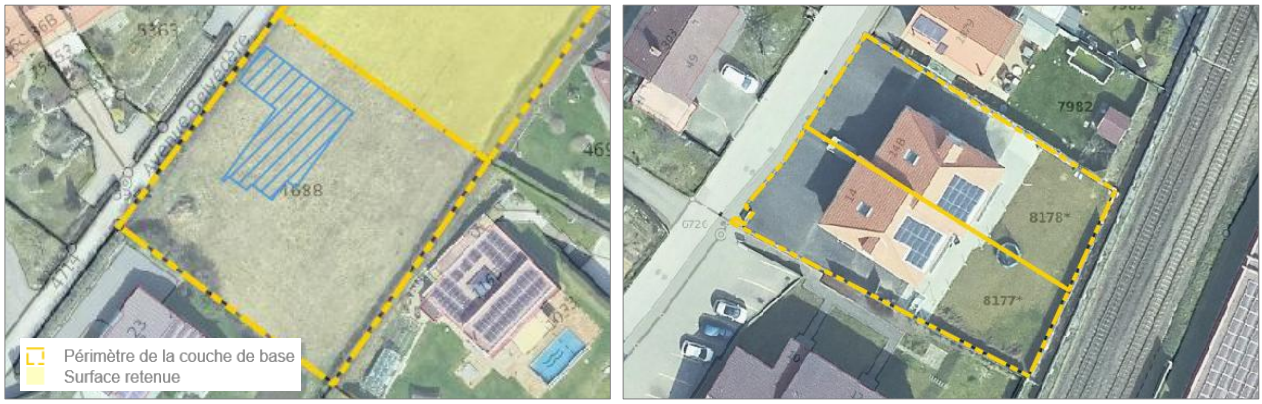
ETAPE 1 : DÉLIMITATION DES PÉRIMÈTRES DESTINÉS AU DÉVELOPPEMENT URBAIN FUTUR

1. Zones à bâtir non construites

Il s'agit de parcelles non construites ou partiellement construites affectées en zone à bâtir (zone d'habitation, zone d'activité, zone mixte et zone centrale). La couche a été mise à jour : suppression des parcelles sur lesquelles figure un bâtiment construit ou projeté depuis l'établissement de la couche en 2021, suppression des parcelles qui ont été sorties de la zone à bâtir dans la révision du PAL (état au 31 octobre 2023). (Voir *figures 2, 3 et 4* ci-dessous).



Figures 2a et 2b – Par défaut, les parcelles libres de construction sont entièrement retenues



Figures 3a et 3b – Les parcelles dont un bâtiment construit ou projeté depuis 2021 y figure ne sont pas retenues



Figures 4a et 4b – Pour les communes avec un PAL en cours de révision, les parcelles prévues pour être sorties de la zone à bâtir (dézonage, mise en zone de verdure ou en zone d'utilité publique) n'ont pas été retenues

2. Zones réservées

Dans les communes dont le PAL n'a pas encore été déposé au service de l'aménagement du territoire, les zones réservées dont on sait qu'elles vont être réhabilitées en zone à bâtir d'ici 2040 ont été prises en compte. Lesdites zones réservées sont les suivantes.

Commune	Secteur	Type de zone	IOS présumé
Neuchâtel	Sur-les-Rues	Habitat	0.25
Neuchâtel	La Côte	Habitat	0.25
Neuchâtel	Les Arniers	Habitat	0.45
Neuchâtel	Les Hauts de Peseux	Habitat	0.25 ou 0.3 selon les secteurs
Cressier	Les Grands Prés / Les Devins	Activité	0.5
Saint-Blaise	Vignier	Activité	0.5
La Côte-aux-Fées	Tous	Habitat	0.25

Tableau 3 – Liste des zones réservées destinées à être réhabilitées d'ici 2040

3. Périmètres concernés par une évolution potentielle de la zone à bâtir, catégorie augmentation

Il s'agit uniquement de périmètres libres de constructions situés pour la plupart hors de l'actuelle zone à bâtir. Il n'y a donc pas d'affectation actuellement légalisée pour ces périmètres, mais nous disposons d'indications à travers les plans directeurs régionaux (PDR) et/ou la révision des PAL en cours qui ont servi d'hypothèses de travail (état au 31 octobre 2023).

Une zone d'affectation et un indice d'occupation du sol (IOS) présumé ont été attribués à ces périmètres, qui ont également été redessinés à l'échelle cadastrale (voir *figure 5* ci-dessous), et adaptés de sorte que les zones bâties et à bâtir en soient exclues (voir *figure 6* ci-dessous).

Commune	Localité	Secteur	Type de zone	IOS présumé
Boudry	Boudry	*Prise aux Mores*	Habitat	0.25
Boudry	Boudry	*Sur la Forêt*	Mixte	0.35
Boudry	Boudry	*Sous Troisrods*	Mixte	0.35
Brot-Plamboz	Brot-Plamboz	Brot-Dessus	Habitat	0.25
Brot-Plamboz	Brot-Plamboz	*Petits Ponts*	Mixte	0.35
La Chaux-de-Fonds	La Chaux-de-Fonds	*Sur la Charrière*	Habitat	0.35
La Chaux-de-Fonds	La Chaux-de-Fonds	*Les Endroits*	Habitat	0.45
La Chaux-de-Fonds	La Chaux-de-Fonds	*Boulevard de la Place d'Armes*	Habitat	0.45
La Chaux-du-Milieu	La Chaux-du-Milieu	*La Forge*	Mixte	0.4
La Côte-aux-Fées	La Côte-aux-Fées	*La Crêta*	Mixte	0.3
La Côte-aux-Fées	La Côte-aux-Fées	*BF 2957-2958-2960*	Habitat	0.25
La Côte-aux-Fées	La Côte-aux-Fées	*Derrière les maisons*	Habitat	0.3
La Côte-aux-Fées	La Côte-aux-Fées	*Chemin de la Combetta*	Mixte	0.30
La Côte-aux-Fées	La Côte-aux-Fées	*Bolles du Temple*	Habitat	0.25

La Côte-aux-Fées	La Côte-aux-Fées	*Les Clos*	Mixte	0.30
La Côte-aux-Fées	La Côte-aux-Fées	*Collège*	Habitat	0.30
La Côte-aux-Fées	La Côte-aux-Fées	*Champs de Vers le Vent*	Habitat	0.25
La Grande Béroche	Bevaix	*Prés Bernard*	Habitat	0.35
La Grande Béroche	Saint-Aubin-Sauges	*Combamare*	Habitat	0.3
La Grande Béroche	Vaumarcus	*Sous les Châtaigniers*	Habitat	0.3
La Sagne	La Sagne	*Crétets du Village*	Habitat	0.3
La Tène	Matin-Epagnier	*Fin de Marin*	Activité	0.4
Le Cerneux-Péquignot	Le Cerneux-Péquignot	Le Cerneux-Péquignot	Habitat	0.25
Le Locle	Le Locle	*Les Jeanneret*	Mixte	0.4
Le Locle	Les Brenets	*La Recorne*	Mixte	0.3
Les Planchettes	Les Planchettes	Les Planchettes	Habitat	0.3
Les Ponts-de-Martel	Les Ponts-de-Martel	*Molta-Dessous*	Habitat	0.3
Lignières	Lignières	*Verger Bernois*	Mixte	0.3
Milvignes	Bôle	*Le Chanet, Foutey*	Habitat	0.35
Saint-Blaise	Saint-Blaise	*Vigner*	Activité	0.5
Val-de-Ruz	Cernier	*Les Breuils*	Mixte	0.45
Val-de-Ruz	Cernier	sud-ouest Evologia	Activité	0.45
Val-de-Ruz	Cernier	nord Evologia	Mixte	0.45
Val-de-Ruz	Chézard-Saint-Martin	*Le Seu*	Mixte	0.45
Val-de-Ruz	Chézard-Saint-Martin	*La Taille*	Activité	0.5

Tableau 4 – Liste des augmentations potentielles de la zone à bâtir

4. Pôles de développement économique

On compte plusieurs pôles de développement économique dans le canton, mais pour la plupart les terrains destinés à y être construits figurent déjà dans les couches décrites plus haut. Il y a une exception à Cernier au Val-de-Ruz où un polygone supplémentaire doit être défini, ainsi qu'au Pôle Tène qui fait l'objet d'une situation future détaillée (planification cantonale en cours).

Commune	**Localité**	**Secteur**	**Type de zone**	**IOS présumé**
Val-de-Ruz	Cernier	Pommeret, Comble Emine	Activité	0.5

Tableau 5 – Liste des nouvelles zones à bâtir dans un pôle de développement

ETAPE 2 : ATTRIBUTION DES VALEURS D'OCCUPATION DES SOLS À CHAQUE PÉRIMÈTRE

A ce stade, chaque périmètre dispose d'un type d'affectation (activité, habitation, mixte ou centrale) et d'un IOS, qu'il soit issu d'un règlement ou présumé. Certains périmètres disposent en plus de l'IVer (indice d'espaces verts), lorsque celui-ci est spécifié dans le règlement d'aménagement (PAL en cours de révision).

Les hypothèses suivantes sont formulées :

- les bâtiments existants restent en place et sont exclus des périmètres,
- l'IOS définit la part occupée par des bâtiments au sol,
- la part occupée par du champ et des arbres sur gazon n'est pas inférieure à l'indice d'espace vert (IVer),
- les parties actuellement imperméables pourraient être reverdies pour respecter l'IVer.

Le processus est le suivant pour chaque périmètre.

1. Calculer la surface déjà occupée par des bâtiments et couverts.
2. Calculer le potentiel restant à occuper par des bâtiments et couverts pour aller jusqu'à l'IOS.
3. Appliquer la part d'occupation des surfaces imperméables et des espaces verts selon les valeurs du tableau ci-dessous. Ces valeurs jugées plausibles ont été établies d'après les résultats de la partie préliminaire. Si la zone d'affectation présente un IVer minimum, celui-ci est respecté et la part occupée par des surfaces imperméables est diminuée en conséquence.
4. La part occupée par des espaces verts est ensuite divisée entre « champ, gazon » et « arbre sur gazon » grâce aux résultats de la partie préliminaire qui montrent qu'en moyenne, les arbres occupent respectivement 12%, 21%, 24% et 22% de la surface totale d'espaces verts pour les zones d'activités, d'habitation, mixtes et centrales.

	Zone d'activités		**Zone d'habitation**		**Zone mixte**		**Zone centrale**	
IOS	**% imp**	**% vert**	**% imp**	**% vert**	**% imp**	**% vert**	**% imp**	**% vert**
80%	15%	5%	-	-	-	-	-	-
75%	20%	5%	-	-	-	-	-	-
60%	30%	1%	20%	20%	25%	15%	-	-
50%	35%	15%	20%	30%	25%	25%	25%	25%
45%	40%	15%	20%	35%	25%	30%	25%	30%
40%	40%	20%	15%	45%	25%	35%	25%	35%
35%	40%	25%	15%	50%	25%	40%	25%	40%
33%	-	-	15%	52%	25%	42%	-	-
30%	40%	30%	15%	55%	25%	45%	25%	45%
28.33%	-	-	15%	56.67%	-	-	-	-
28%	-	-	15%	57%	25%	47%	-	-
27.5%	-	-	10%	62.5%	-	-	-	-
25%	40%	35%	10%	65%	25%	50%	25%	50%
22.5%	-	-	10%	67.5%	-	-	-	-
20%	-	-	10%	70%	-	-	-	-
15%	-	-	10%	75%	-	-	-	-
10%	-	-	10%	80%	-	-	-	-

Tableau 6 – Parts d'occupation par des surfaces imperméables (« % imp ») et des espaces verts (« % vert ») selon le type d'affectation et l'IOS

ETAPE 3 : DÉFINITION DES HAUTEURS DE BÂTIMENTS À APPLIQUER

Pour chaque type de zone (habitation, activité, mixte et centrale), une moyenne de la hauteur des bâtiments est effectuée, pondérée par la surface des bâtiments. La hauteur prise est la hauteur moyenne disponible dans le cadastre 3D cantonal des bâtiments. Les moyennes pondérées de la hauteur moyenne des bâtiments 3D sont les suivantes.

Type de zone	Moyenne pondérée [m]
Habitation	8.82
Activité	10.62
Mixte	9.76
Centrale	9.42

Tableau 7 – Moyenne pondérée de la hauteur moyenne des bâtiments 3D pour chaque type de zone d'affectation

ETAPE 4 : FUSION DES OBJETS

A ce stade, chaque périmètre destiné au développement dispose d'un IOS, d'une répartition des parts d'occupation des sols (par des bâtiments, des surfaces imperméables, du gazon et des arbres) et d'une hauteur moyenne pour les futurs bâtiments.

La dernière étape consiste à fusionner les objets entre eux au maximum afin d'obtenir des périmètres les plus grands possibles. Sans cela, il y a beaucoup de petites surfaces qui ne permettent pas que chaque catégorie atteigne au moins la taille d'un pixel.

Pour fusionner les surfaces, deux étapes sont réalisées ;

1. Les objets adjacents ayant les mêmes attributs (mêmes parts d'occupation des sols et même hauteur de bâtiment) sont fusionnés
2. Les objets adjacents ayant des attributs différents (mêmes attributs que pour le point 1) sont fusionnés et les attributs sont moyennés.
    a. Les parts d'occupation des sols sont moyennées et pondérées par la surface de l'objet.
    b. Les hauteurs de bâtiments sont moyennées et pondérées par la surface occupée par du bâtiment.

Annexe 3

PRÉPARATION DE LA COUCHE D'UTILISATION DU SOL

OBJECTIF

Découper le territoire cantonal en petites portions au sein desquelles l'utilisation du sol et le climat sont supposés homogènes. Les 8 catégories d'utilisation du sol sont les suivantes.

Catégorie	Couleur	Définition
Habitat		Zones contenant des bâtiments d'habitation
Autre activité humaine		Zones contenant des bâtiments destinés à d'autres activités
Surface sans végétation		Zones perméables ou semi-perméables non végétalisées
Transport hors rail		Zones dédiées au transport non ferroviaire
Voies ferrées		Zones dédiées au transport ferroviaire
Eau		Zones dont la surface est en eau
Forêt		Zones de forêt
Surface verte		Zones végétalisées non forestières

Tableau 1 – Les catégories de la couche d'utilisation du sol

DONNÉES DE BASE

- Couche « at100 affectations primaires » (état au 31 octobre 2023) : zones d'affectation en vigueur.
- Couche « Occupation des sols » sous forme vectorielle (voir annexe 1)

ETAPE PRÉLIMINAIRE : DISTINCTION DES SECTEURS

Les données utilisées pour établir la couche d'utilisation du sol diffèrent selon le type de lieu, comme stipulé dans le tableau 2. Dans les grandes lignes, la couche d'utilisation du sol a été établie à partir des zones d'affectation dans les zones urbanisées et à partir de la couche d'occupation des sols (couche vectorielle créée par le SGRF, voir annexe 1) dans le reste du canton (figure 1).

Thème d'aménagement du territoire	**Données utilisées pour établir la couche d'utilisation du sol**
Agriculture	Couche de l'occupation des sols établie par le SGRF
Agriculture et autres zones et territoires	Couche de l'occupation des sols établie par le SGRF
Autres zones et territoires	Couche de l'occupation des sols établie par le SGRF, sauf les « zones de maintien de l'habitat rural »
Urbanisation et protection du patrimoine bâti	Couches des zones d'affectation, sauf quelques exceptions

Tableau 2 – Données utilisées pour établir la couche d'utilisation du sol, selon les lieux

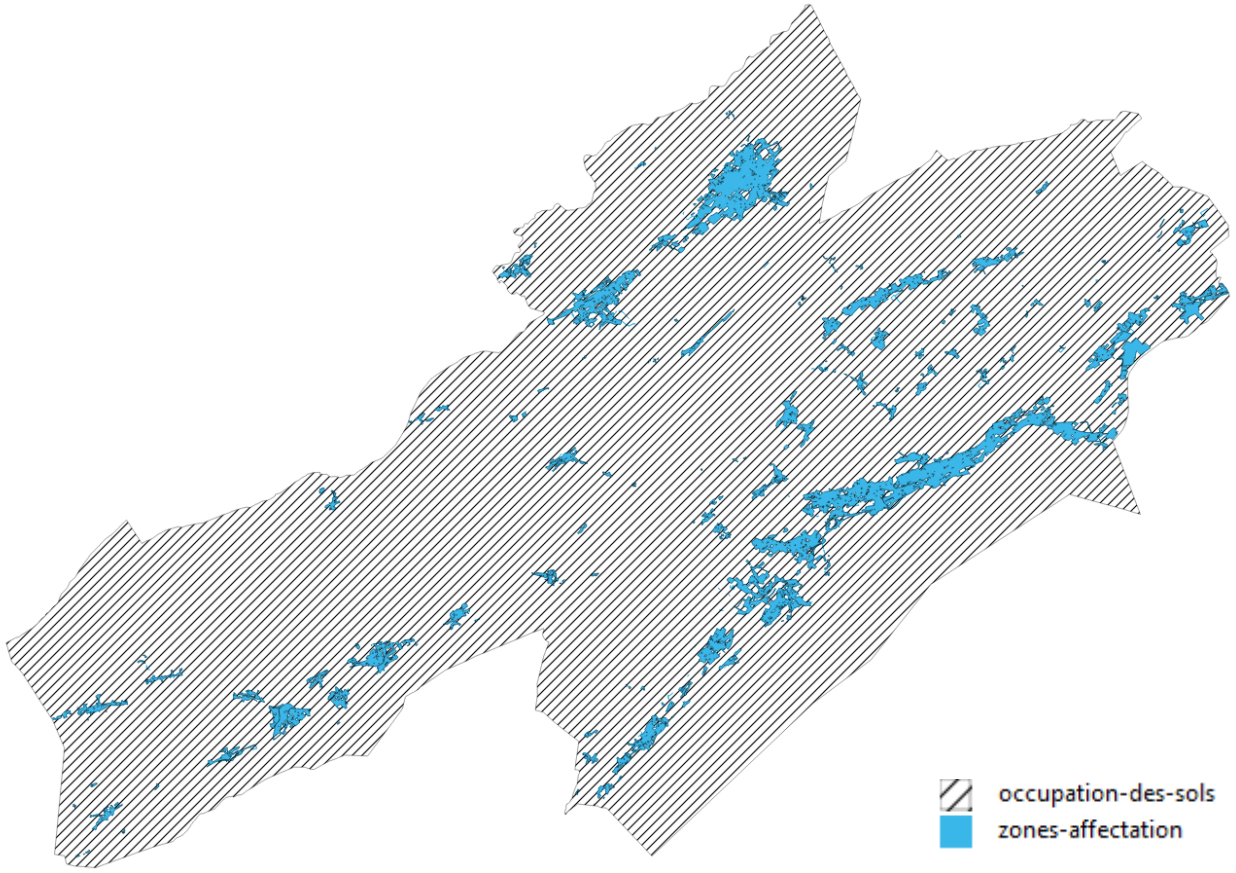


Figure 1 – Périmètres définissant le type de données utilisées pour établir la couche d'utilisation du sol

ETAPE 1 : DÉFINTION DE L'UTILISATION DU SOL À PARTIR DES ZONES D'AFFECTATION

Dans les zones urbanisées, chaque zone d'affectation a été assignée à une catégorie d'utilisation du sol.

Les zones d'affectations utilisées sont celles des PAL révisés pour les communes concernées (à la date du 1er septembre 2023) et celles de la couche AT100 en vigueur (à la date du 1er septembre 2023) pour les autres communes.

Zone d'affectation dans at100	**Catégorie d'utilisation du sol**
Zone d'habitation Zone centrale Zone de protection de l'ancienne localité Zone de protection du patrimoine Zone mixte Zone de constructions basses Zone de maintien de l'habitat rural	Habitat
Zone d'activités économique Autre zone à bâtir Zone d'utilité publique 1	Autre activité humaine
Zone d'utilité publique Zones de sport Zone de tourisme et de loisirs Autres zones spéciales	*Tri manuel pour définir si l'attribution à une catégorie se fait pour toute la zone ou selon l'occupation des sols.*
Zone de verdure	*Selon l'occupation des sols (voir étape 2)*
Zone de transport – ferroviaire	Rail
Zone de transport – autre	Route

Tableau 3 – Assignation d'une catégorie d'utilisation du sol aux zones d'affectation

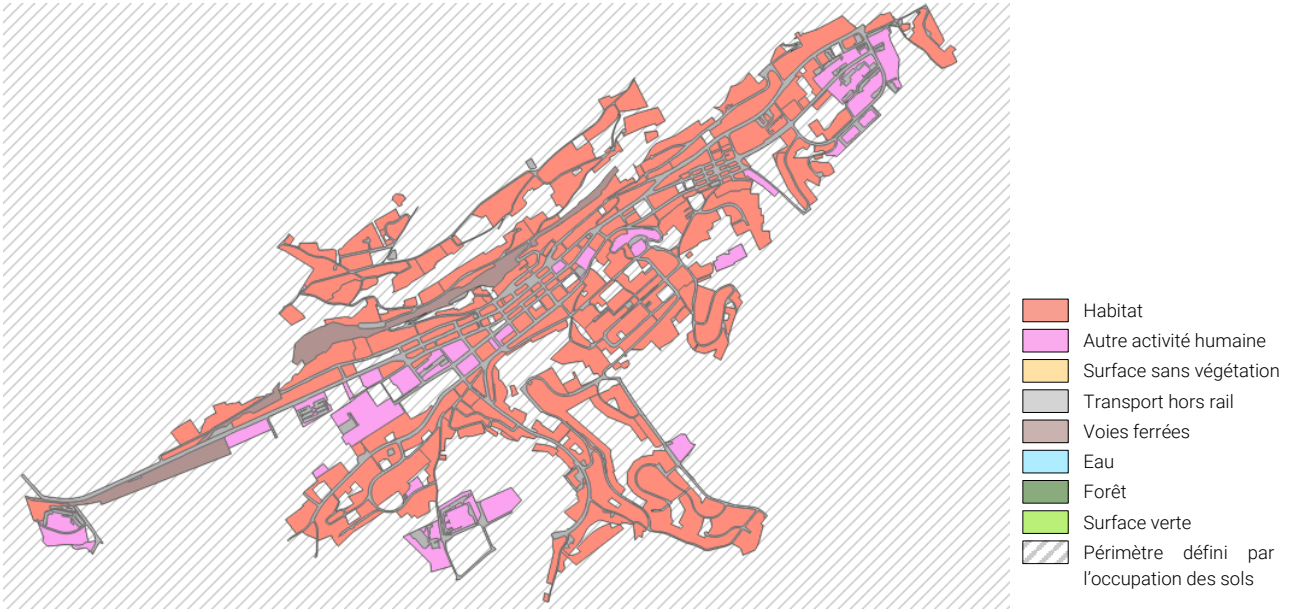


Figure 2 – Assignation d'une catégorie d'utilisation du sol aux zones d'affectation, exemple pour la ville du Locle

ETAPE 2 : DÉFINITION DE L'UTILISATION DU SOL À PARTIR DE L'OCCUPATION DES SOLS

5. Création des catégories « habitat » et « autre activité humaine »

Un script FME a permis de réaliser les étapes suivantes.

1. Faire un tampon de 10 m autour des bâtiments et couverts de plus de 100 m^2.
2. Découper ces zones tampon avec les objets de type « route », « rail », « forêt », « eau » (partant du principe que ces natures sont prioritaires sur les tampons des bâtiments).
3. Éliminer les morceaux qui se situent au-delà des objets de type « route », « rail », « forêt », « eau ».
4. Fusionner les objets de même catégorie
5. Combler les éventuels trous < 200 m^2 (« donuts »)
6. Éliminer les morceaux qui dépassent du périmètre global
7. Assigner la catégorie : choisir « habitat » si au moins un bâtiment a une désignation parmi « habitation », « hôpital », « home », « prison », « hôtel » et choisir « autre activité humaine » sinon.

6. Création des autres catégories

Pour tous les objets situés hors des catégories créées à l'étape 2.1, les différentes natures de l'occupation des sols ont été affectées à une catégorie d'utilisation du solTableau .

Nature	**Catégorie d'utilisation du sol**
Bâtiment, couvert (non pris en charge dans l'étape 2.1)	Habitat
Surface dure (chemin de fer)	Rail
Surface dure (accès, place)	Sans végétation
Surface dure (routes, chemin, trottoir, îlot)	Route
Surface verte	Prairie
Surface boisée	Forêt
Eaux	Eau
Surface sans végétation	Sans végétation

Tableau 4 – Attribution d'une catégorie aux objets de l'occupation des sols

De plus, les parkings ont été assignés à la catégorie « route ».

ETAPE 3 : GESTION DES PETITS ET GRANDS OBJETS

1. Assignation des petits objets à la catégorie voisine prédominante

Les petits objets ont fait l'objet des traitements suivants.

1. Éliminer les objets < 0.5 m^2
2. Fusionner les objets < 200 m^2 de même catégorie
3. Créer un tampon de 1 m autour des objets < 200 m^2 restants
4. Calculer l'intersection entre ce buffer et les objets voisins
5. Identifier l'objet voisin dont la surface intersectée par le tampon est la plus grande
6. Assigner l'objet < 200 m^2 à la catégorie de cet objet

Les bâtiments et couverts non pris en charge par l'étape 2, mais également les objets d'autres catégories qui font moins de 200 m^2 sont assignés à une autre catégorie.

2. Fusion des petits objets avec les objets voisins

1. Fusionner les objets < 200 m^2 avec des objets voisins de même catégorie
2. Assigner aux trous (< 100 m^2) des « donuts » la catégorie du « donut »

À ce stade, il ne reste plus d'objet < 200 m^2 car tous ont été fusionnés avec un de leur voisin.

3. Corrections manuelles

Les corrections manuelles ont été limitées à ces deux points.

- Les objets classés « sans végétation » dans la couche de l'occupation des sols, mais qui s'avèrent être des routes ou parking ont été mis dans la catégorie « transport (hors rail) ».
- Les lignes de chemin de fer, parfois mal classées, ont été systématiquement placées dans la catégorie « rail ».

4. Fusion des objets et découpe des grands objets de catégorie « forêt »

1. Découper les objets de catégorie « forêt » de plus de 5 ha
2. Fusionner les objets voisins < 2 ha de même catégorie
3. Fusionner les objets < 5000 m^2 avec un voisin de même catégorie de moins de 2 ha

Les objets voisins > 2 ha ne sont pas fusionnés entre eux.

L'objectif de cette étape est d'obtenir des objets ni trop grands ni trop petits.

NOTE FINALE

Tout au long du processus, les éventuels trous et superposition dans cette couche d'utilisation du sol ont été détectés et corrigés, avec une tolérance de 1 m^2.