

Étude de cadre scientifique et
méthodologique

Projet RE-VERD - Interreg
ALCOTRA 2021-2027

Analyse contextuelle sur le
phénomène des îlots de chaleur
urbains dans la zone transfrontalière
Province de Cuneo – Hautes-Alpes

RE-VERD

Introduction.....	2
1 Le phénomène des îlots de chaleur urbains	3
1.1 Définition	3
1.2 Principales causes.....	4
1.3 Effets sur le microclimat et l'utilisation des espaces	5
1.4 ICU et changement climatique	5
1.5 Impacts sur la santé et la vulnérabilité.....	6
1.6 Tendances et perspectives.....	7
1.7 Méthodes d'analyse des données et disponibilité	8
2. Îlots de chaleur dans les centres urbains de petite et moyenne taille	10
2.1 Limites de la littérature existante.....	10
2.2 Preuves disponibles dans les petites villes et les villages	11
2.3 Dynamique microclimatique distinctive.....	12
2.4 Facteurs pertinents dans les contextes de faible densité.....	13
2.5 Interprétation et implications pour le projet	14
3. Cadre climatique et territorial de la zone d'étude.....	15
3.1 Zone d'étude.....	15
3.2 Dynamique thermique et caractéristiques climatiques pertinentes	16
3.3 Facteurs de couverture terrestre et de vulnérabilité urbaine	19
4. Preuves de l'existence d'un îlot de chaleur urbain sur le territoire et dans des contextes comparables	21
4.1 Études locales	21
4.2 Preuve indirecte.....	24
4.3 Comparaison avec des contextes alpins comparables	25
5 Implications opérationnelles et orientations méthodologiques pour le contexte de l'étude	27
5.1 Résumé des preuves et implications pour les territoires.....	27
5.2 Approche méthodologique pour l'analyse locale	28
5.3 Directives opérationnelles pour la planification et l'adaptation.....	28
Bibliographie	30

Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet RE-VERD – Repenser l'espace public face au changement climatique (n° 20773), cofinancé par le Fonds européen de développement régional (FEDER) dans le cadre du Programme Interreg VI-A France-Italie ALCOTRA 2021–2027. RE-VERD est un microprojet transfrontalier mené conjointement par Tautemi Associati Srl (chef de file, Italie) et le Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement des Hautes-Alpes – CAUE 05 (partenaire français). Le projet promeut une stratégie intégrée visant à renforcer la résilience des espaces publics alpins face au changement climatique, en accordant une attention particulière au phénomène d'îlots de chaleur urbains dans les petites et moyennes villes. Ce document est issu du lot de travail 1.3, consacré à la collecte de données et aux analyses, et a été réalisé par le département DIATI de l'École polytechnique de Turin dans le cadre d'une mission d'appui scientifique confiée à Tautemi Associati Srl.

La zone d'étude englobe la province de Cuneo (Italie) et le département des Hautes-Alpes (France), deux territoires transfrontaliers de l'arc alpin occidental, caractérisés par une orographie complexe et un système d'habitat principalement composé de petites et moyennes villes. Ce contexte géographique a été relativement peu étudié dans les travaux sur les îlots de chaleur urbains, qui se sont historiquement concentrés sur les grandes métropoles. Combler cette lacune en étudiant le phénomène des petites villes alpines est l'un des principaux objectifs de cette étude.

Ce rapport repose sur une analyse critique de la littérature scientifique et technique, sans recours à de nouveaux prélèvements ni à un suivi direct. Les sources consultées comprennent : des articles scientifiques à comité de lecture, trouvés via Google Scholar et Scopus, portant sur la manifestation du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) dans les petites et moyennes agglomérations et en contexte alpin ; la documentation institutionnelle produite par des organismes de référence tels que l'ARPA Piémont, la Région Piémont, l'ISPRA et le CMCC pour l'Italie, et Météo-France, le CEREMA, le GREC-SUD, l'IGN et l'ORS PACA pour la France ; et les documents de travail partagés par le partenaire CAUE 05, qui ont notamment contribué à la contextualisation du contexte climatique et réglementaire des Hautes-Alpes. Certaines figures incluses dans le texte sont des élaborations originales, réalisées à partir des sources indiquées dans leurs légendes respectives. Le choix des sources a privilégié les études se référant au contexte alpin ou à des contextes comparables en termes de taille et de morphologie des zones urbanisées. La littérature grise institutionnelle a été intégrée lorsqu'elle était jugée pertinente et méthodologiquement fiable, et citée avec une référence explicite à la source. Les principales limites de l'analyse proviennent du manque d'études systématiques portant spécifiquement sur l'îlot de chaleur urbain dans les petites villes de la zone transfrontalière, et du recours aux données satellitaires de température de surface en l'absence de réseaux de surveillance urbains dédiés. Ces limites sont abordées tout au long du texte, le cas échéant.

1 Le phénomène des îlots de chaleur urbains

1.1 Définition

L'îlot de chaleur urbain (ICU) est l'un des principaux effets des transformations anthropiques sur le climat local et se manifeste par une différence systématique de température entre les zones urbaines et les zones rurales environnantes. Concrètement, cela se traduit par des températures moyennes plus élevées au sein des centres habités (Oke, 1982).

D'un point de vue technique, l'intensité de l'îlot de chaleur est généralement définie comme la différence de température entre la zone urbaine et une zone rurale de référence (c'est-à-dire une zone voisine non urbanisée avec une couverture végétale naturelle) (Oke, 2017) :

$$\Delta T_{u-r} = T_{urbano} - T_{rurale}$$

Comme l'illustre la Figure 1, cette différence varie au cours de la journée et dépend à la fois du type d'environnement (rural, périurbain, urbain) et de la grandeur physique considérée. Il est donc essentiel de distinguer les principales manifestations du phénomène (Organisation météorologique mondiale, 2023).

L' **îlot de chaleur urbain de la canopée (ICU-C)** désigne la température de l'air dans la couche la plus basse de l'atmosphère urbaine, entre le sol et le toit. Cette forme d'îlot de chaleur urbain atteint généralement son maximum le soir et la nuit en raison de la libération de la chaleur accumulée par les matériaux de construction. Il est primordial pour le confort et la santé de la population, car il représente la température de l'air à laquelle les individus sont directement exposés et constitue l'un des principaux facteurs déterminant la charge thermique subie par l'organisme.

L' **îlot de chaleur urbain de surface (ICUS)** , quant à lui, concerne la température des surfaces urbaines (asphalte, toitures, façades) et atteint ses valeurs maximales en journée, lorsque le rayonnement solaire est à son maximum et que les surfaces urbaines s'échauffent beaucoup plus intensément que les surfaces rurales et végétalisées.

Bien que ces deux composantes soient définies comme une différence de température par rapport à une référence rurale, elles décrivent des grandeurs physiques différentes : la température de l'air dans le premier cas, la température de surface dans le second. Par conséquent, ces deux phénomènes ne sont pas directement superposables et ont des implications différentes.

Dans la suite du rapport, les deux manifestations du phénomène seront prises en compte en fonction des analyses et des effets considérés, tout en maintenant la distinction entre la température de l'air et la température de surface lorsqu'elle est scientifiquement pertinente.

Ce phénomène repose sur une modification du bilan énergétique des surfaces urbaines. Les matériaux typiques du bâti absorbent et stockent l'énergie solaire durant la journée, puis la restituent progressivement au cours des heures suivantes, contribuant ainsi à des températures de l'air plus élevées que dans les zones rurales environnantes. Ce processus limite le refroidissement nocturne et constitue le mécanisme fondamental à l'origine de l'îlot de chaleur urbain (Heaviside, 2017). Les principaux facteurs influençant ce bilan énergétique seront examinés dans la section suivante.

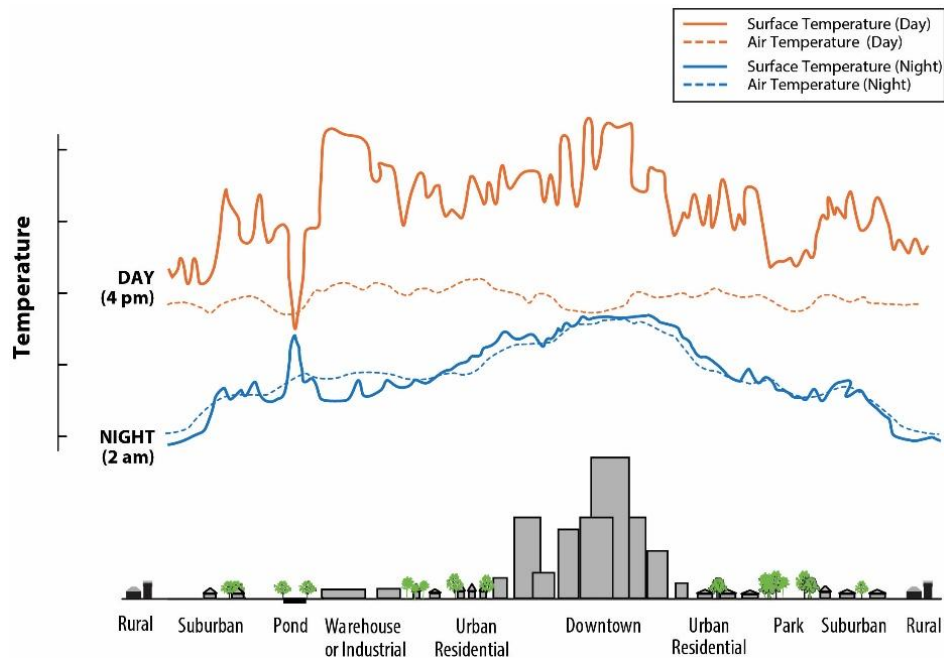


FIGURE 1 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU PHÉNOMÈNE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN, ILLUSTRANT LES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURE ENTRE LES ZONES RURALES, PÉRIURBAINES ET URBAINES DE JOUR COMME DE NUIT. CETTE FIGURE MET EN ÉVIDENCE LE RÔLE DE L'ACCUMULATION ET DU DÉGAGEMENT DE CHALEUR À LA SURFACE DES BÂTIMENTS URBAINS, AINSI QUE LA DIFFÉRENCE ENTRE LES TEMPÉRATURES DE L'AIR ET DE LA SURFACE, QUI PERMETTENT DE DISTINGUER L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN DE SURFACE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN DE LA CANOPÉE. SOURCE : AGENCE AMÉRICAINE DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (EPA)

1.2 Principales causes

La formation des îlots de chaleur urbains résulte d'une combinaison de facteurs liés à la configuration de l'espace bâti, aux matériaux utilisés et aux activités humaines. Ces facteurs peuvent être influencés, dans une large mesure, directement ou indirectement, par les décisions d'aménagement et de planification urbaine (OMM, 2023).

Un premier facteur clé concerne les **propriétés thermiques des matériaux**. L'utilisation généralisée de surfaces artificielles telles que l'asphalte et le béton, caractérisées par une capacité thermique élevée et un faible albédo, favorise l'absorption du rayonnement solaire et l'accumulation de chaleur qui en résulte, plutôt que sa réflexion. Cette chaleur est ensuite libérée dans l'environnement, contribuant à l'augmentation des températures de l'air, notamment le soir et la nuit.

Un deuxième facteur clé est **la géométrie urbaine**. La configuration des bâtiments et des espaces ouverts, notamment dans les « canyons urbains », réduit le facteur de visibilité du ciel (SVF), limitant les pertes de chaleur vers l'atmosphère et favorisant le piégeage du rayonnement à l'intérieur de l'espace urbain. Cet effet contribue au maintien de températures plus élevées, en particulier dans les zones densément peuplées.

Un autre facteur est **l'imperméabilisation des sols**. Le remplacement des surfaces naturelles par des matériaux imperméables réduit considérablement l'évapotranspiration, éliminant ainsi l'un des principaux mécanismes de refroidissement naturels assurés par la végétation et le sol (ISPRA, 2023).

À ces facteurs s'ajoute la contribution de **la chaleur anthropique**, c'est-à-dire la chaleur générée directement par les activités humaines, telles que la circulation automobile, les systèmes de

climatisation et les procédés de production. Bien que son impact varie selon le contexte, elle peut contribuer de manière significative à l'augmentation des températures locales (Noro et Lazzarin, 2015).

Enfin, **la rugosité de surface** liée à la présence de bâtiments et d'infrastructures affecte la circulation de l'air, réduisant la ventilation au niveau de la rue et limitant les pertes de chaleur par convection.

1.3 Effets sur le microclimat et l'utilisation des espaces

L'effet d'îlot de chaleur urbain ne se manifeste pas de façon uniforme, mais engendre plutôt la formation de microclimats différenciés au sein du tissu urbain. Plus précisément, les conditions thermiques peuvent varier considérablement, même sur de courtes distances, en fonction de l'orientation des espaces, de la géométrie urbaine (par exemple, **les canyons urbains**) et de la présence de végétation ou de surfaces artificielles.

Ces différences influent directement sur le confort thermique de la population. Le bien-être dans les espaces ouverts urbains dépend non seulement de la température de l'air, mais aussi du rayonnement solaire, de la ventilation et de l'humidité. La **température moyenne de rayonnement** (TMR), qui représente la somme des rayonnements direct, diffus et réfléchi atteignant le corps humain, joue un rôle particulièrement important. En milieu urbain dense, la combinaison d'une forte exposition solaire et de surfaces réfléchissantes peut engendrer un inconfort important, même à température ambiante égale (Ellena et al., 2023). Pour synthétiser ces conditions, on utilise des indices biométéorologiques tels que la **température équivalente physiologique** (TEP) et l'indice **universel du climat thermique** (UTCI), qui intègrent les principaux facteurs microclimatiques influençant le confort extérieur (ADEME, 2021).

Dans des conditions de stress thermique élevé, on observe des effets significatifs sur **l'utilisation des espaces publics**. Les zones exposées et dépourvues d'ombre, comme les aires de jeux, les parkings ou les cours scolaires, ont tendance à devenir peu praticables pendant les heures les plus chaudes, ce qui entraîne une réduction du temps passé en extérieur et des activités en plein air. Ce phénomène peut affecter négativement les interactions sociales, la qualité de l'espace public et l'utilisation de formes de mobilité active, comme les déplacements à pied et à vélo.

À l'inverse, la présence d'infrastructures **vertes et bleues** (arbres, surfaces perméables, plans d'eau) contribue à améliorer les conditions microclimatiques locales. Des interventions **stratégiques de reboisement stratégique** et de débétonnage urbains peuvent réduire les températures, même de quelques degrés, améliorant ainsi la qualité de vie et restituant l'espace public aux citoyens, y compris lors des vagues de chaleur (Municipalité de Bologne, 2015).

Ces dynamiques microclimatiques et leurs effets sur l'utilisation de l'espace urbain font désormais l'objet d'une attention croissante, y compris dans la littérature technico-opérationnelle, qui souligne que le refroidissement urbain nécessite une approche intégrée basée sur des solutions combinées (végétation, eau, matériaux et gestion des usages).

1.4 ICU et changement climatique

Les îlots de chaleur urbains et le changement climatique global sont **deux phénomènes distincts mais étroitement liés** qui contribuent conjointement à l'augmentation des températures en milieu urbain. Les îlots de chaleur urbains se développent à l'échelle locale et sont liés aux caractéristiques de l'environnement bâti, tandis que le changement climatique agit à l'échelle mondiale, entraînant une hausse progressive des températures ambiantes. L'interaction entre ces deux processus produit des effets cumulatifs qui rendent les villes particulièrement vulnérables aux vagues de chaleur extrêmes (Iodice et al., 2024).

Le réchauffement climatique élève la « ligne de base » thermique régionale, créant des conditions initiales plus chaudes sur lesquelles s'insère l'anomalie urbaine. Par conséquent, dans des conditions météorologiques égales, les événements extrêmes ont tendance à avoir un impact beaucoup plus fort dans les villes que dans les zones rurales environnantes.

Cette interaction devient particulièrement critique lors **des vagues de chaleur**, définies comme des périodes d'au moins deux ou trois jours consécutifs caractérisées par des températures et une humidité nettement supérieures à la moyenne saisonnière (ISPRA, 2023). Ces événements sont associés à des conditions météorologiques synoptiques de stabilité atmosphérique, telles que la présence de systèmes de haute pression, qui entraînent une mauvaise ventilation et un ciel dégagé. Ces mêmes conditions constituent également le contexte idéal pour l'intensification maximale de l'îlot de chaleur urbain (Cheval, 2024).

En milieu urbain, cette synergie se manifeste par une augmentation de la fréquence et de la durée des **nuits tropicales**, c'est-à-dire celles où la température minimale ne descend pas en dessous de 20 °C (ISPRA, 2023). Alors qu'en milieu rural, le refroidissement nocturne est favorisé par la présence de végétation et de sols perméables, en milieu urbanisé, la chaleur accumulée durant la journée se dissipe lentement, empêchant l'air de se refroidir et réduisant les chances de récupération physiologique de la population. Des études menées en Europe indiquent que l'urbanisation peut amplifier l'intensité des vagues de chaleur de plusieurs degrés par rapport aux zones rurales, faisant des villes de véritables zones à haut risque climatique (Cheval, 2024).

Un autre aspect important de la gestion technique concerne la **boucle de rétroaction positive entre la hausse des températures et la consommation d'énergie pour la climatisation**. L'augmentation du stress thermique extérieur entraîne une utilisation accrue des systèmes de climatisation ; cependant, ces dispositifs de rafraîchissement intérieur libèrent une chaleur sensible dans l'environnement extérieur, ce qui contribue à augmenter la température de l'air au niveau de la rue. Ce mécanisme peut générer des effets de « maladaptation » : d'une part, la chaleur de rebut des climatiseurs peut contribuer à augmenter les températures locales, en particulier pendant les heures nocturnes, d'autre part l'augmentation de la demande énergétique entraîne plus d'émissions de gaz à effet de serre, en contribuant davantage au changement climatique (GIEC, 2022).

1.5 Impacts sur la santé et la vulnérabilité

Le lien entre chaleur et santé est aujourd'hui un enjeu central de la gestion urbaine, les vagues de chaleur constituant l'un des principaux facteurs de risque climatique pour la population. Comme l'illustre la Figure 2, la **relation entre température et mortalité** présente une évolution **non linéaire** (en forme de "U"), les risques sanitaires augmentant rapidement lorsque certains seuils thermiques sont dépassés.

Dans les conditions climatiques actuelles, l'impact de l'îlot de chaleur urbain peut être relativement faible pendant les journées d'été moyennes, mais il s'intensifie considérablement lors des vagues de chaleur, lorsque des hausses de température relativement faibles peuvent entraîner une augmentation significative du risque sanitaire. À l'avenir, la hausse des températures de fond due au changement climatique, combinée à l'intensification des conditions urbaines, déplacera de plus en plus fréquemment les conditions locales vers des **niveaux de risque élevés**, amplifiant les impacts sanitaires associés à la chaleur.

Des études épidémiologiques récentes estiment que **47 690 décès attribuables à la chaleur** se sont produits en Europe en 2023 seulement, avec des impacts particulièrement importants dans les pays du sud de l'Europe (Gallo et al., 2024).

Dans les zones urbaines, l'îlot de chaleur urbain contribue à aggraver ces conditions, notamment en maintenant des températures plus élevées que dans les zones rurales environnantes, ce qui intensifie le stress thermique lors d'événements extrêmes (Heaviside, 2017).

La vulnérabilité aux effets de la chaleur n'est pas uniformément répartie, mais dépend de l'interaction de trois facteurs principaux : la sensibilité, l'exposition et la capacité d'adaptation (Ellena et al., 2020).

- **Sensibilité.** Cela dépend des caractéristiques individuelles. Les groupes les plus vulnérables sont les personnes âgées, les enfants et les personnes atteintes de maladies chroniques, qui ont plus de difficultés à s'adapter au stress thermique.
- **Exposition.** Elle dépend des conditions environnementales et du logement. Les risques sont plus élevés dans les zones urbaines caractérisées par une forte densité de bâtiments, une végétation clairsemée et une ventilation limitée, ainsi que dans les bâtiments dont la performance énergétique est insuffisante.
- **Capacité d'adaptation.** Celle-ci est liée aux ressources économiques et sociales disponibles. Les personnes disposant de moins de ressources ou d'un accès limité aux solutions de refroidissement sont plus vulnérables aux effets de la chaleur.

Pour répondre à ces problèmes critiques, de nombreuses administrations locales développent des mesures d'adaptation spécifiques, notamment des systèmes d'alerte précoce et des interventions ciblées pour protéger les populations les plus vulnérables, ainsi que des stratégies d'aménagement urbain visant à réduire l'exposition à la chaleur (ISPRA, 2023).

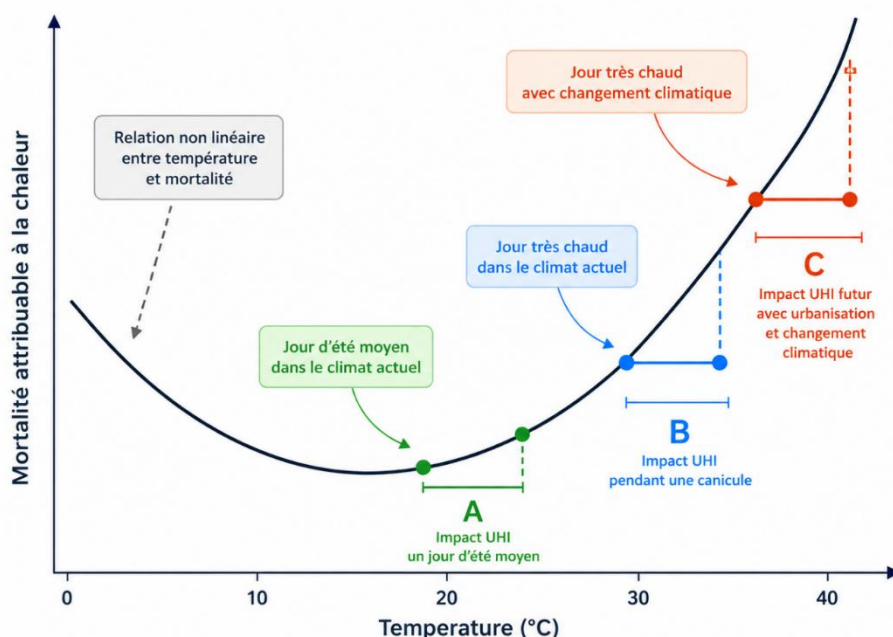


FIGURE 2 : RELATION ENTRE LA TEMPÉRATURE ET LA MORTALITÉ (COURBE EN U) ET CONTRIBUTION DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN AU RISQUE SANITAIRE. EN CONDITIONS MOYENNES (A), L'IMPACT DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN EST RELATIVEMENT LIMITÉ ; LORS DES VAGUES DE CHALEUR (B), MÊME DE FAIBLES HAUSSES DE TEMPÉRATURE ENTRAÎNENT UNE AUGMENTATION SIGNIFICATIVE DU RISQUE ; DANS LES SCÉNARIOS FUTURS (C), CARACTÉRISÉS PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET L'URBANISATION, LE RISQUE DEVRAIT ENCORE AUGMENTER EN RAISON DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS VERS DES TEMPÉRATURES PLUS ÉLEVÉES. SOURCE : CALCULS PROPRES, ADAPTÉS DE RESOURCES FOR THE FUTURE (RFF), URBAN HEAT ISLANDS 101.

1.6 Tendances et perspectives

Les projections climatiques indiquent une augmentation significative de la fréquence, de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur en Europe, avec des conséquences de plus en plus manifestes sur la santé publique, le fonctionnement des systèmes urbains et la productivité des activités économiques (Iodice et al., 2024 ; GIEC, 2022). En l'absence de politiques d'adaptation adéquates, ces conséquences devraient s'aggraver au cours du siècle, notamment dans les zones urbaines denses.

Dans ce contexte, l'îlot de chaleur urbain occupe une place de plus en plus centrale dans les politiques locales. Pour les municipalités, la question de la chaleur ne peut plus être traitée comme une urgence ponctuelle, mais doit être abordée de manière structurelle, en l'intégrant aux politiques courantes d'aménagement et de gestion du territoire.

Cela se traduit par l'intégration de critères microclimatiques dans les outils locaux existants. Dans **les réglementations de construction et les outils de l'urbanisme** (tels que les Plans d'Urbanisme Communaux ou le PLU français), cela implique de prendre en compte les matériaux, la perméabilité des sols, l'ombrage et les toitures végétalisées. Dans **les plans verts et climatiques** (tels que le PAESC en Italie ou le PCAET en France) on développe des stratégies de reboisement urbain, d'augmentation du couvert arboré et de renforcement des infrastructures vertes et bleues. Dans le même temps, **les services sociaux et de santé** sont de plus en plus impliqués dans la gestion des risques de chaleur, à travers la cartographie des populations vulnérables et l'activation de mesures dédiées, telles que des réseaux d'abris climatiques, des espaces publics renforcés et des systèmes d'alerte (Commune de Bologne, 2015).

Les expériences récentes, notamment aux niveaux européen et français, montrent également que les interventions les plus efficaces combinent plusieurs approches – solutions fondées sur la nature, interventions techniques et mesures comportementales – en les adaptant aux spécificités locales et en les intégrant dès la planification urbaine. Les **lignes directrices** élaborées par l'ADEME et le CEREMA soulignent en particulier l'importance de stratégies intégrées et multicritères qui prennent en compte simultanément la forme urbaine, les matériaux, la végétation et les usages de l'espace (ADEME, 2021).

1.7 Méthodes d'analyse des données et disponibilité

Pour diagnostiquer correctement le phénomène d'îlot de chaleur urbain, les administrations locales peuvent utiliser un ensemble d'outils complémentaires, allant des méthodes d'observation de base aux techniques d'analyse et de modélisation plus avancées.

Une première analyse repose sur **les données météorologiques d'observation**, disponibles via les réseaux de surveillance existants, tels que ceux gérés par les agences environnementales régionales (ARPA en Italie) ou les services météorologiques nationaux (Météo-France). La comparaison entre les stations situées en milieu urbain et rural permet une première estimation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain et de sa variabilité temporelle, notamment pendant les heures nocturnes, selon une approche validée dans la littérature climatologique (Oke, 2017).

À un niveau plus détaillé, on peut utiliser des systèmes de classification tels que **les Zones Climatiques Locales (ZCL)**. Ces systèmes classent les territoires en fonction de leurs caractéristiques morphologiques et d'occupation du sol, comme la densité et la hauteur des bâtiments, la présence de végétation et le degré d'imperméabilisation (Stewart & Oke, 2012). Cette approche permet de relier la forme urbaine au comportement thermique local. Plus précisément, les ZCL permettent d'identifier les zones les plus exposées au réchauffement climatique, d'interpréter de manière cohérente les données climatiques (issues de stations météorologiques ou de satellites) et d'orienter la planification

d'interventions ciblées pour les typologies urbaines les plus critiques. Un exemple de classification en zones climatiques locales (LCZ) est présenté à la Figure 3.

Les techniques **de télédétection** et d'observation de la Terre permettent de compléter ces analyses par l'utilisation de données satellitaires (par exemple, Landsat, Sentinel), qui permettent de cartographier les températures de surface (température de surface terrestre – LST) et d'identifier les zones de forte chaleur à l'échelle urbaine et régionale. À l'échelle européenne, des programmes tels que **le service de surveillance des terres Copernicus** et des jeux de données comme **l'Atlas urbain** offrent des données harmonisées sur l'occupation des sols, le couvert urbain et la densité de population, particulièrement utiles pour les analyses comparatives et l'élaboration d'indicateurs territoriaux (Iodice et al., 2024). Cependant, ces données doivent être interprétées avec prudence, car elles représentent les températures de surface et non directement les températures de l'air (OMM, 2023).

Pour mieux comprendre les conditions d'exposition réelles de la population, ces analyses peuvent être combinées avec des réseaux **de surveillance in situ**, basés sur des capteurs répartis à l'échelle locale, capables de mesurer la température de l'air dans la couche de canopée urbaine, c'est-à-dire la couche dans laquelle se déroulent les activités quotidiennes.

Des outils plus avancés comprennent la **modélisation microclimatique**, qui permet de simuler le comportement thermique-énergétique des espaces urbains et d'évaluer l'efficacité des interventions de conception avant leur réalisation. Parmi les modèles les plus utilisés figure **ENVI-met**, un logiciel tridimensionnel largement utilisé pour la simulation des interactions entre végétation, surfaces urbaines et atmosphère à l'échelle locale (Bruse & Fleer, 1998 ; Huttner et al., 2008).

Enfin, pour orienter les interventions prioritaires, il est possible d'intégrer les données climatiques aux indicateurs sociodémographiques grâce à **des indices de vulnérabilité**. Ces indices combinent l'exposition à la chaleur, les caractéristiques de la population et la capacité d'adaptation, permettant ainsi d'identifier les zones et les groupes les plus à risque (Ellena et al., 2023). Des approches de ce type ont déjà été appliquées dans plusieurs contextes urbains italiens, comme à Turin, où des analyses intégrées climat-population ont permis de définir des zones prioritaires d'intervention.

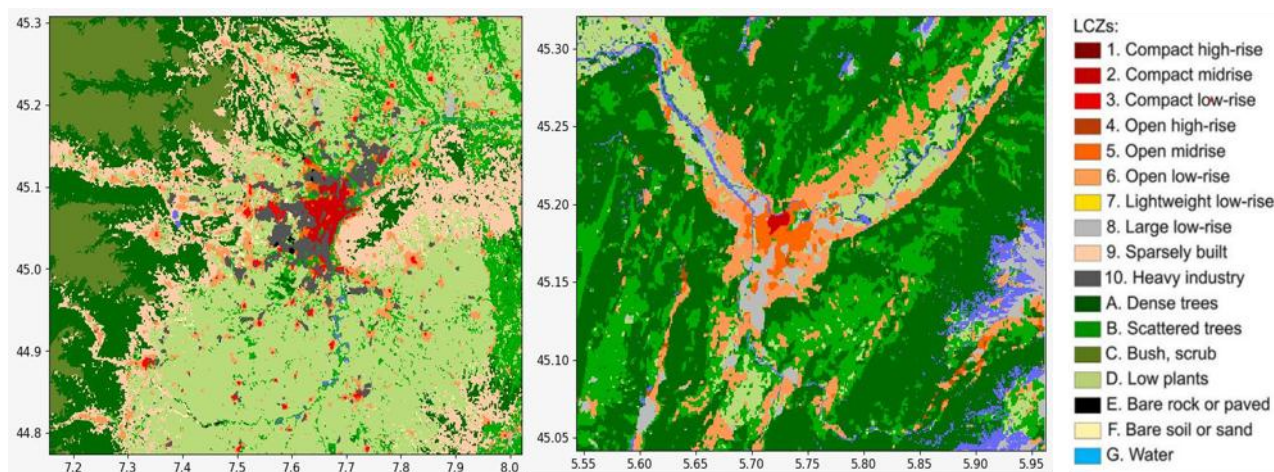


FIGURE 3 : CLASSIFICATION DES ZONES CLIMATIQUES LOCALES (LCZ) POUR LA ZONE DE TURIN (GAUCHE) ET DE GRENOBLE (DROITE), OBTENUE PAR LCZ GENERATOR. LA CARTE MET EN ÉVIDENCE LA DISTRIBUTION DES DIFFÉRENTS TYPES URBAINS ET NATURELS, PERMETTANT D'IDENTIFIER LES ZONES CARACTÉRISÉES PAR UNE PLUS FORTE DENSITÉ DE CONSTRUCTION ET UN POTENTIEL DE SURCHAUFFE. LES LCZ CONSTITUENT UN OUTIL UTILE POUR ANALYSER LA VARIABILITÉ SPATIALE DE L'ÎLE THERMIQUE URBAINE ET SOUTENIR LA PLANIFICATION D'INTERVENTION CIBLÉES. SOURCE : PROPRE TRAITEMENT VIA LCZ GENERATOR (DEMUZERE ET AL.2021)

2. Îlots de chaleur dans les centres urbains de petite et moyenne taille

2.1 Limites de la littérature existante

La littérature scientifique sur les îlots de chaleur urbains (ICU) s'est développée historiquement avec un **fort déséquilibre vers les grandes aires métropolitaines**, en particulier vers les villes de plus d'un million d'habitants. Cette orientation a entraîné un vide significatif de connaissance pour les contextes caractérisés par des centres de petite et moyenne dimension, généralement inférieurs à 50 000 habitants (Kopeck, 1970 ; Tan et Li, 2015).

En plus d'une attention scientifique moindre, il existe également des **limites méthodologiques** qui contribuent à une sous-représentation du phénomène dans les contextes de faible densité. Dans les petites agglomérations, la disponibilité des données météorologiques est souvent très limitée : dans de nombreux cas, il n'existe pas de station de mesure à l'intérieur du tissu urbain ou une seule station est disponible, généralement localisée en périphérie. Cette configuration restitue des conditions thermiques intermédiaires entre le milieu urbain et le milieu rural environnant, rendant difficile la détermination précise du différentiel thermique associé à l'îlot de chaleur (Lokoshchenko et Erukova, 2021).

À cela s'ajoute un autre élément critique lié à l'interprétation des données disponibles. Les stations météorologiques situées dans des villages ou de petits centres sont souvent classées comme « rurales » dans les bases de données climatologiques, sur la base de l'hypothèse que l'effet urbain est négligeable. Cependant, même les petites agglomérations peuvent influencer les conditions thermiques locales. En conséquence, ces stations peuvent enregistrer des températures déjà partiellement altérées par la présence de l'environnement bâti. Cette classification introduit un biais systématique : en utilisant comme référence « rurale » des données qui sont en réalité influencées par l'urbanisation, le **différentiel thermique** entre ville et campagne est artificiellement réduit, ce qui conduit à une sous-estimation de l'intensité du phénomène (Dienst et al., 2018).

Un autre élément critique concerne l'utilisation de données satellitaires à basse résolution. Les capteurs tels que MODIS (environ 1 km²) tendent à sous-estimer le réchauffement de surface dans les petites agglomérations, car le signal urbain est atténué par la présence de végétation. Une détection plus précise de l'îlot de chaleur urbain de surface nécessiterait des données à haute résolution, comme celles de Landsat (environ 30 m), qui permettent une meilleure distinction entre les différents types de couverture terrestre et une cartographie plus précise des zones de forte intensité thermique en surface (Lokoshchenko et Erukova, 2021). Il convient toutefois de rappeler que ces mesures restent une **approximation indirecte** de la température de l'air, qui nécessiterait des mesures in situ au niveau du couvert végétal urbain.

Globalement, ces facteurs suggèrent que le peu de données empiriques disponibles pour les petites villes n'indique pas nécessairement une moindre importance du phénomène, mais plutôt la **difficulté à le détecter** avec les outils couramment utilisés.

2.2 Preuves disponibles dans les petites villes et les villages

Malgré les problèmes critiques soulignés ci-dessus, plusieurs études démontrent de manière importante que des phénomènes similaires aux îlots de chaleur urbains peuvent être observés même dans **des contextes à petite échelle**.

En particulier, il a été mis en évidence que les effets de la surchauffe urbaine peuvent déjà se manifester dans des villages d'environ **1 000 habitants** ou dans des zones **urbanisées inférieures à 2 km²** (Oke, 1973 ; Lokoshchenko et Erukova, 2021). Cette donnée est particulièrement pertinente, car elle indique l'absence d'un seuil dimensionnel minimum en dessous duquel le phénomène ne se produit pas.

Concernant l'intensité, les données disponibles montrent des valeurs moyennes généralement proches de 1 °C, mais susceptibles d'atteindre des valeurs nettement supérieures dans des conditions favorables. Des études menées en Europe ont documenté, par exemple, des différences de température allant jusqu'à **5,6 à 6,0 °C** dans de petites villes durant les périodes estivales caractérisées par un ciel dégagé et l'absence de vent (Vardoulakis et al., 2013 ; Ivajnsiĉ et al., 2014).

Un résultat clé de la littérature concerne la **relation entre la taille des agglomérations et l'intensité du phénomène**. Cette relation suit une progression logarithmique : l'augmentation de température liée à l'urbanisation est plus rapide lors des premières phases de croissance (du village à la petite ville) que lors des phases ultérieures (Oke, 1973 ; Lokoshchenko et Erukova, 2021). Cela implique que, comparativement, **les petites villes** peuvent être particulièrement sensibles aux processus de transformation urbaine, comme l'illustre la Figure 4, qui présente l'évolution de la relation entre la population et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

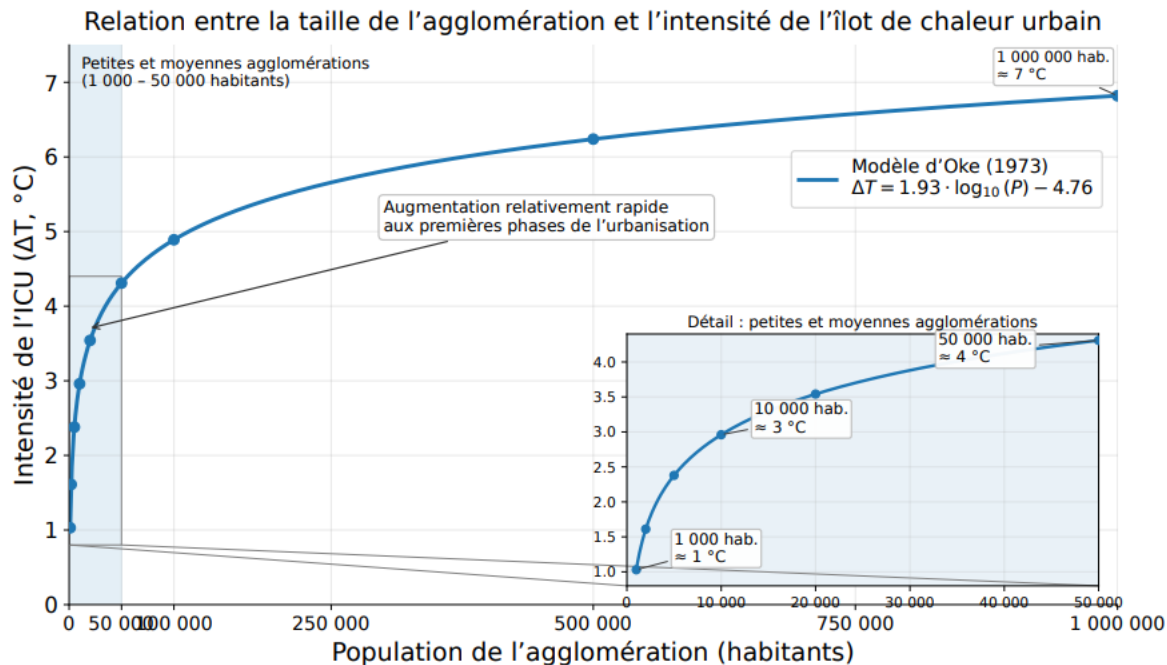


FIGURE 4 : RELATION ENTRE LA TAILLE DE L'AGGLOMÉRATION ET L'INTENSITÉ DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (ICU), EXPRIMÉE PAR LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LES ZONES URBAINES ET RURALES (ΔT). LA COURBE EST CONSTRUITE À PARTIR DU MODÈLE EMPIRIQUE PROPOSÉ PAR OKE (1973), QUI MET EN ÉVIDENCE UNE RELATION LOGARITHMIQUE ENTRE LA POPULATION ET L'INTENSITÉ DU PHÉNOMÈNE. L'ENCADRÉ DÉTAILLE LES INFORMATIONS RELATIVES AUX PETITES ET MOYENNES VILLES (JUSQU'À 50 000 HABITANTS), ZONE D'ÉTUDE DU PROJET. SOURCE : ÉLABORATION PROPRE À PARTIR DES TRAVAUX D'OKE (1973).

2.3 Dynamique microclimatique distinctive

Dans les petites et moyennes agglomérations, le phénomène de l'îlot de chaleur urbain se manifeste à travers des dynamiques microclimatiques qui, bien que fondées sur les mêmes mécanismes physiques observés dans les grandes zones urbaines, présentent des caractéristiques spécifiques liées à l'échelle de la colonie et à l'influence accrue des conditions locales (Figure 5).

Un premier élément distinctif concerne la **plus grande variabilité temporelle du phénomène**. L'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) est en effet fortement influencée par **les conditions météorologiques** et, en particulier, par la ventilation, tendant à diminuer rapidement même en présence de faibles flux d'air. Il a été observé que **des vitesses de vent relativement faibles** (de l'ordre de 5 à 7,5 km/h) suffisent souvent à dissiper presque complètement le différentiel thermique entre les zones urbaines et rurales (Oke, 1973 ; Vardoulakis et al., 2013). Ce comportement souligne combien, dans les contextes de faible densité, le phénomène est moins persistant et plus intermittent que dans les grandes villes, où l'accumulation de chaleur et la complexité morphologique tendent à stabiliser son intensité au fil du temps.

Un deuxième aspect important concerne la présence de **phénomènes de refroidissement relatif le matin** (îlot de fraîcheur urbain), liés à l'ombrage des bâtiments et à la forte inertie thermique des matériaux dans les tissus urbains denses. Dans ces conditions, les zones urbaines peuvent temporairement paraître plus fraîches que les zones rurales environnantes (Vardoulakis et al., 2013 ; Steeneveld et al., 2011). Bien que ce phénomène ne soit pas propre aux petites villes, il tend à être plus marqué dans ces contextes, où l'intensité globale de l'îlot de chaleur urbain est plus faible et davantage modulée par les conditions locales.

D'un point de vue spatial, le phénomène ne se manifeste pas comme un îlot de chaleur urbain continu et bien délimité, mais plutôt comme un **ensemble de points chauds localisés**. Les zones les plus sujettes à la surchauffe coïncident généralement avec les espaces ouverts imperméabilisés (places, parkings, cours), les zones dépourvues de végétation et les zones densément bâties, tandis que les zones environnantes conservent des conditions thermiques plus proches de celles des zones rurales. Cette distribution discontinue rend le phénomène particulièrement pertinent à l'échelle des espaces publics, même en l'absence d'un îlot de chaleur urbain clairement identifiable à l'échelle de l'agglomération.

Enfin, dans les agglomérations, des facteurs tels que **la topographie, l'exposition** et la présence de **cours d'eau** peuvent influencer considérablement le comportement thermique local, parfois à un degré comparable ou supérieur par rapport à la densité du bâti. Par exemple, la présence d'une rivière peut contribuer à une augmentation de l'humidité et à un ralentissement du refroidissement nocturne, modifiant ainsi le bilan énergétique local et influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (Moyer et Hawkins, 2017). De même, des configurations orographiques spécifiques peuvent favoriser ou gêner la ventilation, amplifiant ou atténuant les effets de la surchauffe.

Dans l'ensemble, ces caractéristiques indiquent que dans les petites et moyennes agglomérations le phénomène de l'îlot de chaleur doit être interprété principalement à l'**échelle microclimatique**, avec une attention particulière aux conditions locales et à la configuration des espaces, plutôt qu'un effet uniforme à l'échelle urbaine.

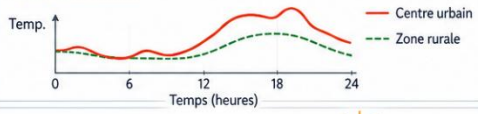
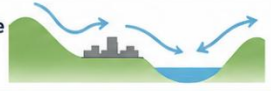
DIMENSION	CARACTÉRISTIQUE PRINCIPALE	IMPLICATIONS
 TEMPORELLE	Forte variabilité 	 Phénomène intermittent et sensible aux conditions météorologiques
 MÉTÉOROLOGIQUE	Forte dépendance au vent et au rayonnement solaire 	 Dissipation rapide en présence de vent, intensification en conditions stables
 SPATIALE	Distribution discontinue 	 Présence de points chauds localisés
 MORPHOLOGIQUE	Influence de la configuration urbaine 	 Effets concentrés dans les espaces imperméabilisés et compacts
 TERRITORIALE	Rôle de la topographie et de l'eau 	 Modulation locale du phénomène
 ÉCHELLE	Phénomène microclimatique 	 Pertinent à l'échelle d'espaces spécifiques (places, cours, etc.)

FIGURE 5 : DYNAMIQUE MICROCLIMATIQUE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN DANS LES PETITES ET MOYENNES VILLES. CE PHÉNOMÈNE EST INFLUENCÉ PAR LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES, LA CONFIGURATION SPATIALE URBAINE ET LE CONTEXTE TERRITORIAL, ET SE MANIFESTE PRINCIPALEMENT PAR DES POINTS CHAUDS LOCALISÉS PLUTÔT QUE PAR UN EFFET CONTINU À L'ÉCHELLE DE LA VILLE.

2.4 Facteurs pertinents dans les contextes de faible densité

Dans les zones à faible densité, l'intensité et la répartition du phénomène d'îlot de chaleur urbain dépendent principalement de facteurs locaux liés à la configuration du bâti et aux conditions environnementales. Contrairement aux grandes agglomérations, où l'effet est déterminé par l'ampleur de l'urbanisation, dans les petites villes, ce phénomène est fortement influencé par des caractéristiques morphologiques et microclimatiques spécifiques.

Un premier facteur déterminant est **la géométrie urbaine**. Ce n'est pas tant la taille globale de l'agglomération qui influence le phénomène, mais plutôt la configuration de l'espace bâti, notamment le volume de bâtiments par unité de surface et le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur des espaces ouverts (Ivajnsiĉ et al., 2014). Cela signifie que même des zones à forte densité de bâtiments peuvent générer d'importantes conditions de surchauffe, y compris en milieu rural (Vardoulakis et al., 2013).

Un deuxième facteur crucial est **la couverture du sol**. Le remplacement des surfaces végétalisées par des matériaux imperméables tels que l'asphalte et le béton entraîne une réduction de l'évapotranspiration et une augmentation de l'accumulation de chaleur, avec pour conséquence une hausse des températures de surface et de l'air. Cet effet est particulièrement marqué durant les périodes sèches estivales, typiques de nombreux contextes alpins et méditerranéens, où même la végétation rurale peut souffrir de stress hydrique, réduisant ainsi sa capacité de refroidissement (Tan et Li, 2015 ; Dienst et al., 2018).

Un autre facteur clé réside dans **les conditions de ventilation locales**, qui jouent un rôle particulièrement important dans la modulation de l'intensité et de la persistance du phénomène dans

les petites villes. Une plus grande exposition aux flux d'air et une moindre complexité morphologique rendent le microclimat plus sensible aux variations météorologiques, favorisant ainsi la dissipation de la chaleur accumulée.

Enfin, des facteurs liés au **contexte environnemental et territorial**, tels que la topographie, l'exposition et la présence de plans d'eau, peuvent influencer considérablement le comportement thermique local. Ces éléments contribuent à déterminer des conditions microclimatiques spécifiques, amplifiant ou atténuant les effets du réchauffement climatique selon les caractéristiques du site.

2.5 Interprétation et implications pour le projet

Les données analysées indiquent que, dans les petites et moyennes agglomérations, le phénomène d'îlots de chaleur urbains ne peut être interprété comme une condition uniforme à l'échelle urbaine, mais plutôt comme un ensemble d' **effets localisés**, liés à la configuration des espaces et aux conditions microclimatiques.

Il s'ensuit que l' **échelle d'analyse et d'intervention la plus appropriée** est celle de l'espace individuel, plutôt que celle de l'ensemble de l'agglomération. Dans ces contextes, la surchauffe se concentre dans des zones spécifiques – telles que les places, les cours et les surfaces imperméabilisées – tandis que d'autres zones conservent des conditions thermiques proches de celles des zones rurales.

Cette caractéristique implique que, dans les petites villes, l'atténuation du phénomène ne nécessite pas forcément d'interventions importantes ou structurelles, mais peut être efficacement abordée par **des actions spécifiques et généralisées**, ciblant les principaux facteurs contribuant à la surchauffe urbaine.

En particulier, les stratégies qui agissent sur :

- la présence et la qualité du couvert végétal
- perméabilité et matériaux de surface
- l'intégration des éléments de l'eau
- la configuration des espaces en relation avec la ventilation

Dans ce contexte, **les espaces publics** constituent les zones d'intervention prioritaires, car ce sont les lieux où le phénomène est le plus manifeste et où l'on peut obtenir les meilleurs résultats en termes de confort thermique et de qualité de vie. Parmi ceux-ci, les **cours d'école** sont particulièrement importantes, car elles combinent des conditions d'exposition à la chaleur et une forte présence d'usagers vulnérables.

3. Cadre climatique et territorial de la zone d'étude

3.1 Zone d'étude

La zone d'étude comprend la **province de Cuneo** en Italie et le département des **Hautes-Alpes** en France (Figure 6), territoires transfrontaliers appartenant à l'arc alpin occidental et caractérisés par une orographie complexe. Bien que partageant un caractère montagneux, ces deux territoires présentent des configurations d'habitat différentes, qui influent sur les conditions microclimatiques locales et leur vulnérabilité aux réchauffements urbains.

Les Hautes-Alpes sont un département à **faible densité de population** (environ 25,5 habitants/km²), caractérisé par une forte proportion d'espaces naturels et une urbanisation limitée. La population est principalement concentrée dans les pôles urbains de Gap et de Briançon, tandis que le reste du territoire est structuré autour d'un réseau de petites communes, traduisant une organisation de l'habitat à la fois **polarisée et dispersée** (INSEE, 2022). Bien que le département présente dans son ensemble un caractère montagnard marqué, il existe une certaine variabilité climatique interne, certaines zones étant davantage influencées par les conditions méditerranéennes et donc plus exposées aux épisodes de fortes chaleurs estivales. Du point de vue socio-sanitaire et environnemental, les Hautes-Alpes présentent plusieurs caractéristiques qui renforcent la vulnérabilité face aux épisodes de chaleur. Le département se distingue par une population en moyenne plus âgée que la moyenne régionale, une forte proportion de résidences secondaires et une saisonnalité touristique marquée, qui entraîne d'importantes fluctuations de population durant la période estivale, au moment même où les épisodes de chaleur sont les plus fréquents (ORS PACA, 2022). Dans les secteurs les plus isolés, la dispersion de l'habitat et la faible densité du réseau de services et d'équipements peuvent également limiter l'accès aux ressources de rafraîchissement et aux dispositifs d'assistance lors d'événements extrêmes.

La province de Cuneo présente une structure d'habitat plus complexe, caractérisée par la **coexistence de zones alpines, vallonnées et de plaine**. Avec une densité de population d'environ 83 habitants/km², elle est nettement plus densément peuplée que les Hautes-Alpes, mais conserve un **système polycentrique et étendu**, avec une pluralité de petites et moyennes agglomérations et une forte proportion de communes de moins de 5 000 habitants. L'habitat se développe principalement le long des fonds de vallées alpines et des plaines et collines du secteur oriental, où se concentrent les principaux centres urbains. D'un point de vue socio-démographique, la province de Cuneo est également touchée par un **vieillissement progressif de sa population**, particulièrement marqué dans les communes de montagne les plus isolées, où la part des personnes âgées dépasse souvent la moyenne provinciale (CCLimaTT, 2019). Cette situation, combinée à l'étalement urbain et à la fragmentation territoriale, définit un profil de vulnérabilité à la chaleur qui, bien que différent de celui des Hautes-Alpes en termes de structure et d'intensité urbaines, partage la caractéristique d'une répartition territoriale non uniforme du risque, difficile à gérer avec des outils conçus pour les contextes métropolitains.

Dans les deux zones, les établissements humains se développent principalement le long **des fonds de vallée** et des principaux axes de communication, selon une **configuration linéaire** typique des contextes alpins (Convention alpine, 2022). Cette structure, combinée à la rareté des terrains constructibles, favorise la concentration des surfaces urbanisées dans les zones les plus accessibles.

D'un point de vue microclimatique, la morphologie des vallées joue un rôle important dans les deux contextes : une ventilation réduite et des inversions de température fréquentes peuvent influencer la dispersion de la chaleur de manière complexe, créant parfois des conditions favorables à un

réchauffement local, et dans d'autres cas, atténuant le différentiel de température entre zones urbaines et rurales par l'accumulation d'air froid dans le fond des vallées (« plaques d'air froid »). Dans un contexte alpin particulièrement sensible aux changements climatiques, ces dynamiques constituent un élément clé pour comprendre la vulnérabilité urbaine, qui nécessite toutefois une interprétation contextualisée et ne peut se réduire à une relation linéaire entre morphologie et réchauffement (Convention alpine, 2021 ; OMM, 2023).



FIGURE 6 : APERÇU GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE TRANSFRONTALIÈRE. LA LIGNE ROUGE REPRÉSENTE LE PÉRIMÈTRE DU DÉPARTEMENT DES HAUTES-ALPES (FRANCE), TANDIS QUE LA LIGNE BLEUE REPRÉSENTE LA LIMITE DE LA PROVINCE DE CUNEO (ITALIE). LA CARTE MET EN ÉVIDENCE LA CONTINUITÉ TERRITORIALE ET LA TOPOGRAPHIE ALPINE COMMUNES AUX DEUX CONTEXTES ANALYSÉS.

3.2 Dynamique thermique et caractéristiques climatiques pertinentes

Les régions alpines sont reconnues comme l'un des principaux **points chauds du changement climatique** en Europe, avec un rythme de réchauffement supérieur à la moyenne mondiale (Convention alpine, 2021 ; GREC-SUD, 2018). Comme le montre la Figure 7, le réchauffement est généralisé sur l'ensemble de l'arc alpin, constituant le contexte climatique dans lequel se développent les dynamiques locales analysées dans les zones d'étude.

Sur le plan climatique, la région se caractérise par un **climat de montagne tempéré**, fortement influencé par l'altitude et le relief. La région des Hautes-Alpes présente des conditions plus typiquement alpines, avec un ensoleillement important et des précipitations relativement faibles, tandis que la province de Cuneo affiche une plus grande variabilité, englobant à la fois des climats alpins et des plaines plus chaudes et plus humides.

Une caractéristique marquante est l'importante **amplitude thermique journalière**, avec des nuits généralement plus fraîches favorisant le refroidissement naturel. Cependant, dans le fond des vallées, la ventilation peut être limitée et **les inversions de température sont fréquentes**, ce qui réduit le brassage de l'air et favorise la stagnation.

Les conditions de vent sont en effet fortement influencées par la topographie : outre les phases de faible ventilation locale, des épisodes de vents descendants (**föhn**) peuvent se produire, caractérisés

par un air chaud et sec, susceptibles d'entraîner des hausses temporaires de température et une baisse d'humidité. Toutefois, ces épisodes sont ponctuels et ne compensent pas les conditions de **faible ventilation qui prévalent dans les fonds de vallée**.

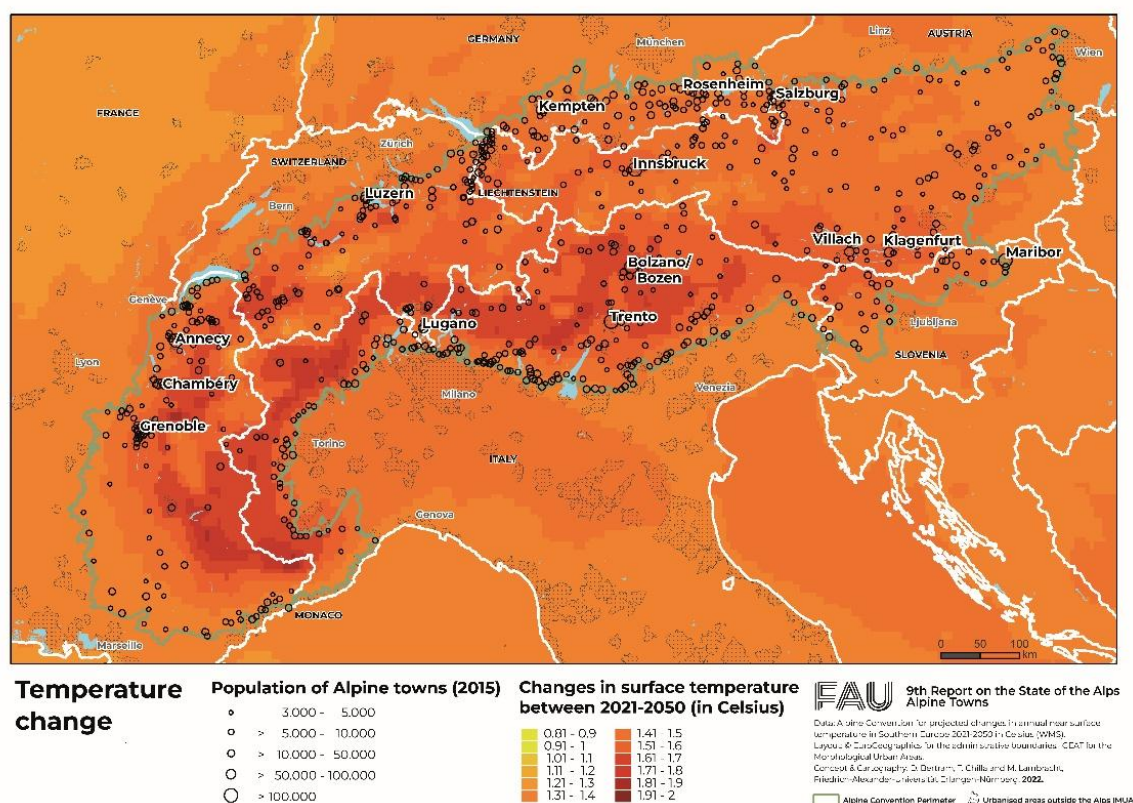


FIGURE 7 : PRÉVISIONS DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DE SURFACE DANS LES RÉGIONS ALPINES, MONTRANT UN RÉCHAUFFEMENT GÉNÉRALISÉ SUR L'ENSEMBLE DE L'ARC ALPIN. LES POINTS REPRÉSENTENT LES PRINCIPAUX CENTRES URBAINS. SOURCE : CONVENTION ALPINE (2022).

Du point de vue hydroclimatique, les principales évolutions observées concernent moins une diminution systématique des précipitations annuelles qu'une **modification des régimes de précipitation et des régimes hydrologiques**. Les données disponibles mettent en évidence une **diminution progressive de l'enneigement**, une fonte nivale plus précoce ainsi qu'une augmentation de l'évapotranspiration liée à la hausse des températures. À cela s'ajoutent une **fréquence accrue des épisodes de sécheresse estivale**, une **forte variabilité interannuelle des précipitations** et une **intensification des événements de fortes précipitations**. Dans leur ensemble, ces évolutions contribuent à **réduire la disponibilité de la ressource en eau** durant la période estivale et à accroître la vulnérabilité du territoire face aux effets du changement climatique (GREC-SUD, 2018; ARPA Piemonte, 2019).

Dans les Alpes du Sud, la **température moyenne de l'air a déjà augmenté d'environ 2,5 °C** par rapport à l'ère préindustrielle (GREC-SUD, 2018). À l'échelle locale, les données disponibles pour la province de Cuneo montrent une tendance à la hausse significative, avec une augmentation moyenne d'environ 0,26 °C par décennie ces dernières décennies (ARPA Piémont, 2019). Côté français, l'outil **Climadiag Commune de Météo-France** (Figure 8) fournit des projections climatiques à l'échelle communale pour plusieurs indicateurs particulièrement pertinents dans le cadre de cette étude. Pour les communes de Gap et de Briançon, les projections, établies selon la Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC), mettent en évidence une **augmentation** attendue

du nombre de **jours très chauds et de nuits chaudes**, en cohérence avec les tendances décrites à l'échelle régionale par le GREC-SUD (Météo-France, 2022). Dans le même temps, on observe une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de chaleur extrême, avec des effets sur la santé déjà documentés : durant l'été 2024, environ **500** décès attribuables à la chaleur et près de **2 000** visites aux urgences pour des causes liées aux températures élevées ont été enregistrés dans la région PACA, les impacts les plus graves étant concentrés dans le groupe d'âge des plus de 75 ans (Santé publique France, 2025).

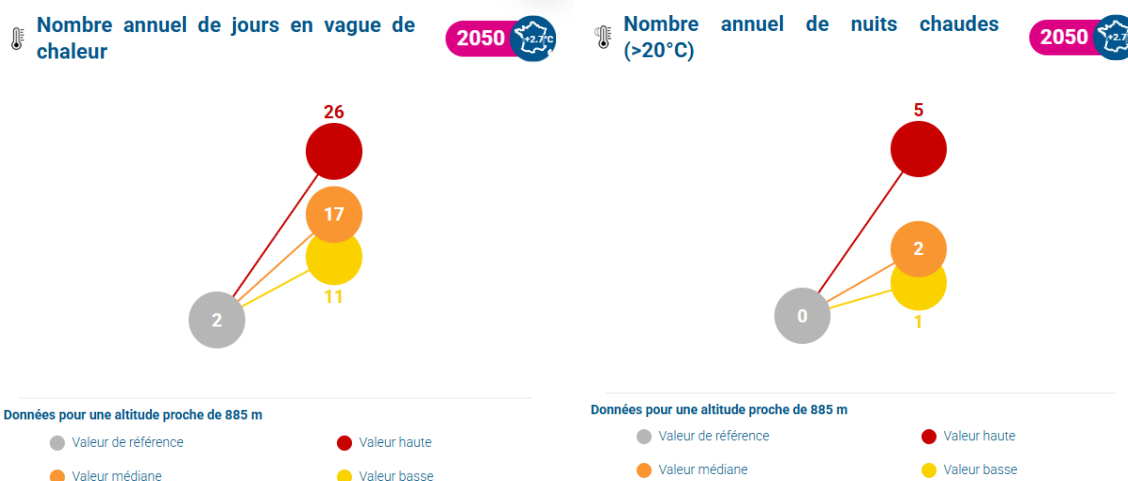


FIGURE 8: PROJECTIONS CLIMATIQUES À L'HORIZON 2050 POUR LA COMMUNE DE GAP, RÉALISÉES À PARTIR DE L'OUTIL CLIMADIAG COMMUNE DE MÉTÉO-FRANCE. LA FIGURE PRÉSENTE LE NOMBRE ANNUEL DE JOURS EN VAGUE DE CHALEUR (À GAUCHE) ET LE NOMBRE ANNUEL DE NUITS CHAUDES (À DROITE), EN COMPARANT LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE AUX PROJECTIONS POUR L'HORIZON 2050.

À l'échelle régionale, ces dynamiques s'inscrivent dans un cadre climatique différent de celui des zones voisines. Comparées au reste du **Piémont**, caractérisé par des conditions plus chaudes et plus humides en plaine, les régions alpines connaissent généralement des températures moyennes plus basses et une plus grande variabilité altitudinale. Cependant, dans les fonds de vallée, ces différences tendent à s'atténuer et, en période de stabilité atmosphérique, des températures comparables peuvent être enregistrées. De même, au sein de la région **Provence-Alpes-Côte d'Azur**, le département des Hautes-Alpes se caractérise par des conditions alpines plus marquées que les zones côtières et périalpines, qui bénéficient d'un climat plus doux et d'une urbanisation plus importante. Toutefois, même dans les Hautes-Alpes, les spécificités des fonds de vallée peuvent engendrer des microclimats locaux où se produisent, durant l'été, des dynamiques de réchauffement similaires à celles observées en milieu moins montagneux.

Ces tendances climatiques ont des conséquences directes sur le phénomène d'îlot de chaleur urbain. L'augmentation des températures ambiantes, la diminution du refroidissement nocturne et la ventilation insuffisante dans les vallées contribuent à amplifier les effets du **réchauffement local** dans les centres urbains. En ce sens, le changement climatique agit comme un facteur d'intensification des dynamiques microclimatiques urbaines.

3.3 Facteurs de couverture terrestre et de vulnérabilité urbaine

La vulnérabilité des centres urbains dans la zone d'étude ne dépend pas exclusivement des tendances climatiques mondiales, mais est étroitement liée aux **caractéristiques physiques du territoire**, à la configuration des **établissements humains** et à la composition de la **population** (Convention alpine, 2022). En contexte alpin, ces facteurs jouent un rôle particulièrement important en raison de la forte interaction entre la morphologie, l'occupation des sols et les conditions microclimatiques.

Un premier facteur concerne **l'occupation du sol et son degré d'imperméabilisation**. En milieu urbain, la présence de surfaces artificielles telles que l'asphalte et le béton réduit la capacité du sol à dissiper la chaleur par évapotranspiration, favorisant ainsi l'accumulation d'énergie thermique. Bien que le département des Hautes-Alpes présente une part globale de surfaces artificielles très limitée (environ 1,4 %) (ORS PACA, 2025), celles-ci sont fortement concentrées dans les fonds de vallée et les grands centres urbains, où les données d'occupation du sol et les analyses satellitaires de la température de surface (LST) signalent des conditions localisées de surchauffe potentielle. En l'absence de mesures directes de la température de l'air dans la canopée, ces indicateurs doivent être considérés comme des approximations des conditions à risque, et non comme une mesure directe de l'îlot de chaleur urbain (ICU). De même, dans la province de Cuneo, l'étalement urbain et la fragmentation du territoire exercent une pression croissante sur les plaines et les fonds de vallée, entraînant une réduction progressive de la capacité du sol à assurer sa fonction de régulation thermique (ARPA Piémont, 2019).

La répartition de l'occupation du sol sur les deux territoires est clairement visible à partir **d'images satellitaires multispectrales en fausses couleurs** (figure 9), obtenues à partir des bandes du proche et du moyen infrarouge. Dans ces représentations, la végétation apparaît en nuances de vert, tandis que les surfaces urbanisées et artificialisées sont mises en évidence en magenta, permettant d'identifier immédiatement les principaux éléments du paysage. Les images montrent que les zones urbanisées sont fortement concentrées dans les fonds de vallée et le long des principaux axes de communication, tandis que les espaces naturels et agricoles occupent la majeure partie du territoire environnant. Bien que ces images ne représentent pas directement la température des surfaces, elles fournissent des informations précieuses sur la répartition des surfaces imperméabilisées et du couvert végétal, deux facteurs étroitement liés aux processus d'accumulation et de dissipation de la chaleur. À ce titre, elles constituent un support d'interprétation utile pour identifier **les secteurs potentiellement les plus exposés à la surchauffe** et pour mieux comprendre les relations entre la structure territoriale, l'occupation du sol et la vulnérabilité climatique.

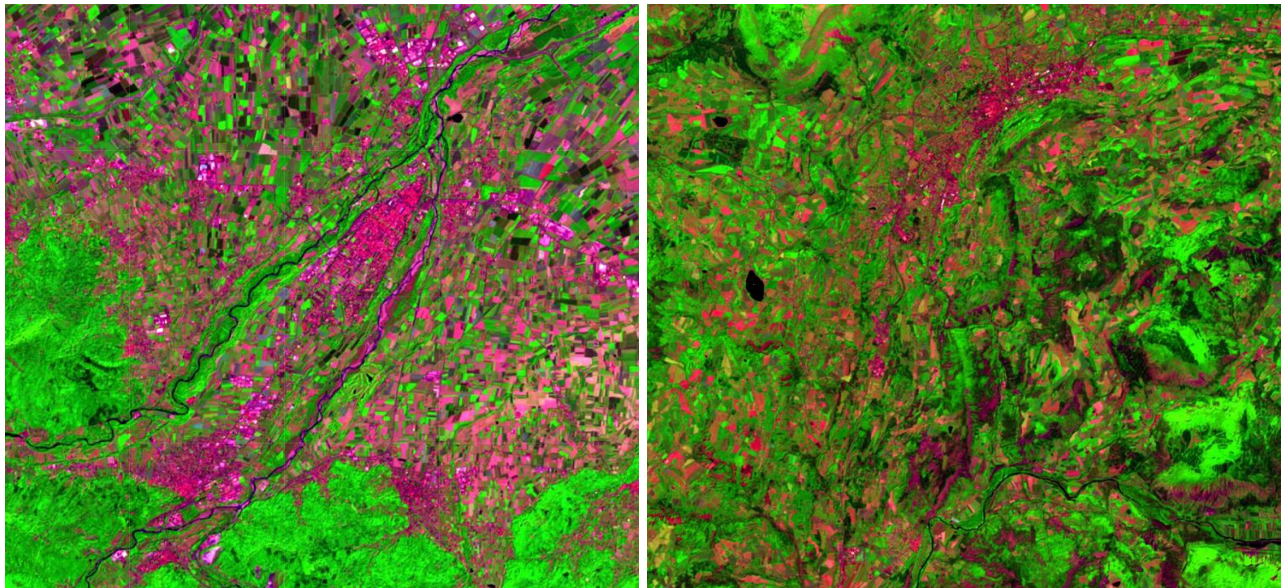


FIGURE 9 : IMAGES SATELLITAIRES MULTISPECTRALES EN FAUSSES COULEURS (NIR–SWIR) DES ZONES URBAINES DE CUNEO (À GAUCHE) ET DE GAP (À DROITE). LA VÉGÉTATION APPARAÎT EN NUANCES DE VERT, TANDIS QUE LES SURFACES URBANISÉES ET ARTIFICIALISÉES SONT REPRÉSENTÉES EN MAGENTA. SOURCE : ÉLABORATION PROPRE À PARTIR D'IMAGES SENTINEL-2.

Un second facteur concerne **la morphologie urbaine et territoriale**. En milieu alpin, la configuration des fonds de vallée et la structure des établissements humains influencent directement la ventilation et la dispersion de la chaleur, contribuant ainsi à l' **accumulation de chaleur** à l'échelle locale. Par exemple, dans les centres de vallées comme Gap ou les principales villes de la région de Cuneo, la concentration des établissements le long d'axes linéaires et la présence d'espaces urbains imperméabilisés favorisent la formation de microclimats locaux plus chauds, notamment le soir et la nuit, comparativement aux zones rurales environnantes. Ce comportement, typique de la couche de canopée de l'îlot de chaleur urbain, n'a pas été mesuré directement dans les villes de la zone d'étude, mais il est cohérent avec ce qui a été documenté dans des contextes alpins comparables et avec les caractéristiques physiques du territoire analysé (voir chapitre 4). Dans **les centres historiques**, le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur des espaces ouverts contribue également à limiter la dispersion du rayonnement, renforçant ainsi les effets du réchauffement climatique.

Un autre facteur clé est **la vulnérabilité sociodémographique**. Dans les régions alpines, le vieillissement progressif de la population constitue un enjeu important, en particulier dans les petites communes et les zones les plus isolées (Convention alpine, 2022). Toutefois, la vulnérabilité à la chaleur concerne également d'autres groupes de population, notamment les jeunes enfants, les femmes enceintes, les personnes atteintes de pathologies cardiovasculaires ou respiratoires, ainsi que les travailleurs exerçant une activité en extérieur. Dans ces contextes, l'exposition à des épisodes de chaleur intense peut avoir des conséquences importantes sur la santé, en particulier lorsque les logements ou les espaces publics offrent peu de possibilités de rafraîchissement. Dans les Hautes-Alpes, la forte proportion de résidences secondaires (plus de 45 % du parc immobilier) et la **saisonnalité marquée** du tourisme entraînent également d'importantes variations de la population résidente, avec **une pression accrue sur les services** et une dégradation des conditions de confort durant l'été (ORS PACA, 2025).

La combinaison des caractéristiques du sol, de la morphologie de la vallée et de la vulnérabilité de la population contribue donc à définir le **niveau d'exposition à la chaleur dans les zones habitées**. Dans ce contexte, l'intégration de critères microclimatiques dans la planification urbaine est un élément clé pour réduire les risques et améliorer les conditions de vie.

4. Preuves de l'existence d'un îlot de chaleur urbain sur le territoire et dans des contextes comparables

4.1 Études locales

L'examen des sources disponibles révèle un degré de consolidation variable dans l'étude des îlots de chaleur urbains dans les deux zones analysées. Dans les deux cas, il n'existe pas d'analyses systématiques et intégrées du phénomène à l'échelle municipale ; toutefois, une base de connaissances solide et **des outils institutionnels opérationnels** permettent de définir un cadre généralement fiable et d'identifier les principales exigences méthodologiques d'une évaluation structurée.

Cela s'explique en partie par la nature des données disponibles pour analyser le phénomène. Les deux régions disposent **de réseaux de surveillance météorologique bien établis** (ARPA Piémont et Météo-France), qui fournissent des séries historiques fiables de températures de l'air. Cependant, ces réseaux ne sont pas conçus pour mesurer systématiquement l'effet d'îlot de chaleur urbain, car ils n'assurent pas une répartition spatiale des stations permettant des comparaisons directes entre les zones urbanisées et les contextes ruraux de référence. Par conséquent, l'évaluation du phénomène repose principalement sur des **indicateurs indirects**, notamment les données de température de surface issues d'observations satellitaires, qui constituent actuellement la principale source d'information spatialement continue pour l'analyse de la surchauffe urbaine.

Dans le cas de la **province de Cuneo**, le cadre institutionnel semble plus développé, notamment grâce à son rattachement au système régional piémontais. **L'ARPA Piémont** coordonne depuis plusieurs années un système de suivi des effets des vagues de chaleur sur la population, fondé sur l'intégration de données météorologiques et d'indicateurs de santé. Ce système a récemment été renforcé par l'introduction de l'indice **d'alerte aux journées chaudes** (WDA), qui permet d'évaluer l'intensité des événements extrêmes en fonction des conditions climatiques locales (ARPA Piémont, 2025). Ce système est étayé par des analyses de scénarios qui indiquent, pour la **ville de Cuneo**, une hausse des températures moyennes et une augmentation de la fréquence des nuits tropicales au cours du siècle (ARPA Piémont, 2019).

À l'échelle régionale, des méthodologies d'analyse de la vulnérabilité intégrant données satellitaires et informations sociodémographiques ont également été développées. L'**étude de la région du Piémont** (2024), en particulier, combine la température de surface (LST ; voir section 1.7), l'indice de couverture végétale (NDVI) et la répartition de la population, en accordant une attention particulière aux groupes les plus vulnérables (enfants et personnes âgées). Cette approche ne mesure pas directement l'îlot de chaleur urbain (ICU) lié à la canopée, mais permet de construire un **indice d'exposition potentielle au réchauffement climatique** en combinant la variable de surface (LST) avec la variable démographique. Les zones les plus critiques sont celles caractérisées simultanément par une température de surface élevée, une faible couverture végétale et une forte concentration de populations vulnérables.

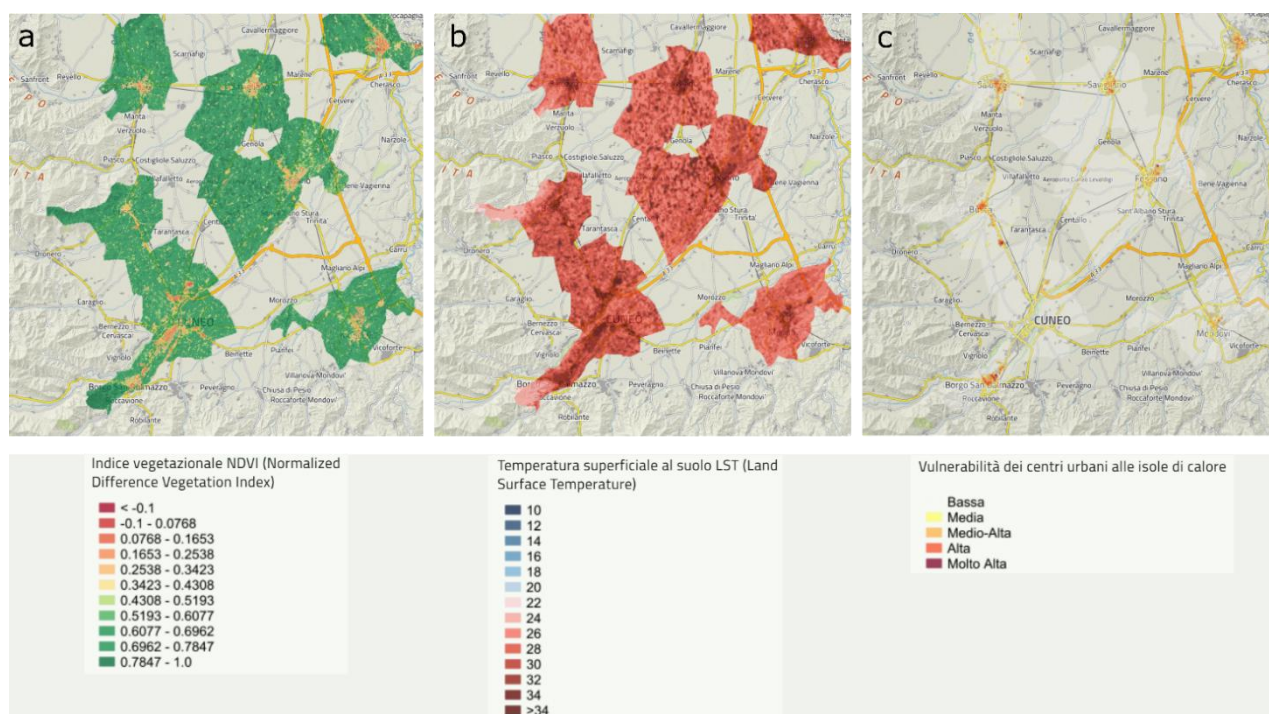


FIGURE 10 : ANALYSE INTÉGRÉE DE LA PROVINCE DE CUNEO. (A) CARTE NDVI DU COUVERT VÉGÉTAL ; (B) CARTE DE LA TEMPÉRATURE DE SURFACE DU SOL ; (C) INDICE DE VULNÉRABILITÉ CALCULÉ SUR UNE BASE DÉMOGRAPHIQUE (POPULATION < 10 ANS ET > 65 ANS). TRAITEMENT PROPRE À PARTIR DES CARTES DU GÉOPORTAIL DU PIÉMONT.

La Figure 10 illustre ces calculs à travers la répartition spatiale de la vulnérabilité à la chaleur dans la province de Cuneo. Les cartes mettent en évidence la concentration des conditions les plus critiques dans les zones urbaines denses à végétation clairsemée, tandis que les zones plus verdoyantes sont généralement moins exposées.

Parallèlement à ces analyses, il existe des applications à l'échelle locale. Parmi celles-ci, une étude récente a utilisé le modèle InVEST Urban Cooling pour évaluer la capacité de refroidissement de différentes configurations de sols urbains dans le parc Ferruccio Parri à **Cuneo** (Denaro et al., 2025). Les résultats montrent que l'augmentation du couvert végétal contribue à réduire les températures locales, mais que l'efficacité globale des interventions, lorsqu'elles sont considérées sur des zones limitées, demeure restreinte, ce qui souligne la nécessité d'actions intégrées à l'échelle urbaine.

Concernant les **Hautes-Alpes**, les sources disponibles mettent en évidence un nombre restreint d'études spécifiques consacrées à la mesure directe des ICUs à l'échelle locale. Ce manque ne s'explique pas par une absence de données de base, mais plutôt par des analyses moins formalisées que dans d'autres contextes régionaux. Les bases d'information sont pourtant vastes et comprennent des données météorologiques historiques et prévisionnelles, des cartes d'occupation des sols et des outils institutionnels déjà opérationnels, permettant une appréciation du risque thermique même en l'absence de mesures dédiées.

En matière d'outils d'analyse climatique, la principale référence pour la France est **Climadiag Commune** (Météo-France, 2022), un outil en ligne gratuit et accessible qui fournit des projections à l'échelle communale des indicateurs climatiques les plus pertinents – notamment les journées très chaudes, les nuits chaudes et les vagues de chaleur – pour les horizons 2030, 2050 et 2100. Ces projections sont calculées à partir des projections DRIAS 2020 et de la Trajectoire de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC). Pour les communes des Hautes-Alpes, cet outil constitue la principale source de données quantitatives à l'échelle locale sur les projections de stress

thermique, données directement exploitables pour l'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire . Pour les administrations nécessitant une analyse plus approfondie, **Climadiag Chaleur en ville** (Météo-France) propose un service de diagnostic pour les unités de soins intensifs (USI) avec une résolution spatiale allant jusqu'à 100 m, permettant de simuler des scénarios d'adaptation (verdissement, désimperméabilisation, albédo des matériaux) et d'évaluer leur efficacité face à un changement climatique (Météo-France, 2024). Cet outil a été développé principalement pour les communes et agglomérations urbaines ; son applicabilité aux petites et moyennes communes alpines des Hautes-Alpes doit être vérifiée en fonction des seuils de taille définis par le service.

Concernant la classification morphologique du tissu urbain, la principale référence technique est la **cartographie nationale des Zones Climatiques Locales** élaborée par le CEREMA (2022). Celle-ci permet d'associer à chaque zone urbaine une sensibilité thermique attendue, calculée en fonction de la densité des bâtiments, des matériaux de construction et de la présence de végétation (Figure 11). Il convient de noter que cette cartographie a été principalement conçue pour les métropoles françaises de plus de 50 000 habitants : son application aux communes plus petites des Hautes-Alpes, telles que Gap et Briançon, est possible, mais doit être envisagée comme un point de départ analytique et non comme une couverture systématique du territoire. Pour les communes en deçà des seuils de référence, la méthodologie du CEREMA relative aux ZCL reste applicable, même en l'absence de cartographie préexistante (CEREMA, 2022).

Concernant les impacts sanitaires déjà observés, le profil socio-sanitaire et environnemental des Hautes-Alpes établi par l'ORS PACA (2022) documente les principales caractéristiques de vulnérabilité de la population du département, en particulier les personnes âgées et les conditions d'isolement qui caractérisent de nombreuses petites communes. La prise en compte opérationnelle de ce sujet crucial se manifeste également dans les politiques d'adaptation locales : dans les grandes agglomérations, comme Gap et Briançon, des interventions de rafraîchissement urbain et d'amélioration du couvert végétal ont été lancées, conformément aux stratégies régionales (Atmosud, 2025). Cette dernière source doit être comprise comme une référence au contexte opérationnel des politiques locales, et non comme une donnée scientifique sur la dynamique des soins intensifs dans des centres spécifiques.

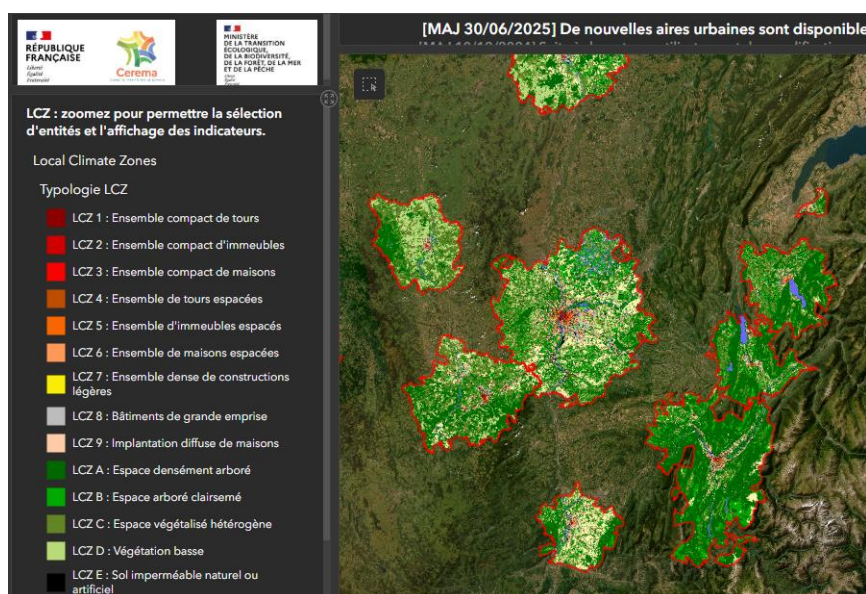


FIGURE 11 : CARTOGRAPHIE DES ZONES CLIMATIQUES LOCALES (ZCL) POUR UNE PARTIE DE LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES ET SES ENVIRONS. TRAITEMENT BASÉ SUR LES DONNÉES CEREMA (2022). LA

LÉGENDE IDENTIFIE LES DIFFÉRENTS TYPES DE TISSU URBAIN ET RURAL, FOURNISSANT LA BASE MORPHOLOGIQUE DE L'ANALYSE DU RISQUE THERMIQUE LOCAL.

Bien que les analyses disponibles présentent un niveau de détail différent dans les deux territoires, la classification des zones climatiques locales (LCZ) permet de décrire de manière homogène les caractéristiques morphologiques des principaux centres urbains étudiés. La Figure 12 présente la classification LCZ des zones urbaines de Cuneo et de Gap, obtenue à l'aide de l'outil **LCZ Generator** (Demuzere et al., 2021), déjà présenté dans la section 1.7. Dans les deux cas, on observe une prédominance de tissus urbains de faible et moyenne densité, insérés dans un contexte largement dominé par des espaces agricoles et végétalisés. La cartographie met également en évidence la forte concentration des zones urbanisées dans les fonds de vallée et le long des principaux axes de communication, une configuration caractéristique des territoires alpins qui contribue à structurer la répartition des facteurs d'exposition à la chaleur. Bien qu'elle ne représente pas directement l'intensité de l'îlot de chaleur urbain, la classification LCZ constitue un outil d'interprétation particulièrement utile pour évaluer la **susceptibilité des différents tissus urbains au phénomène de surchauffe et pour comparer de manière cohérente les deux contextes territoriaux.**

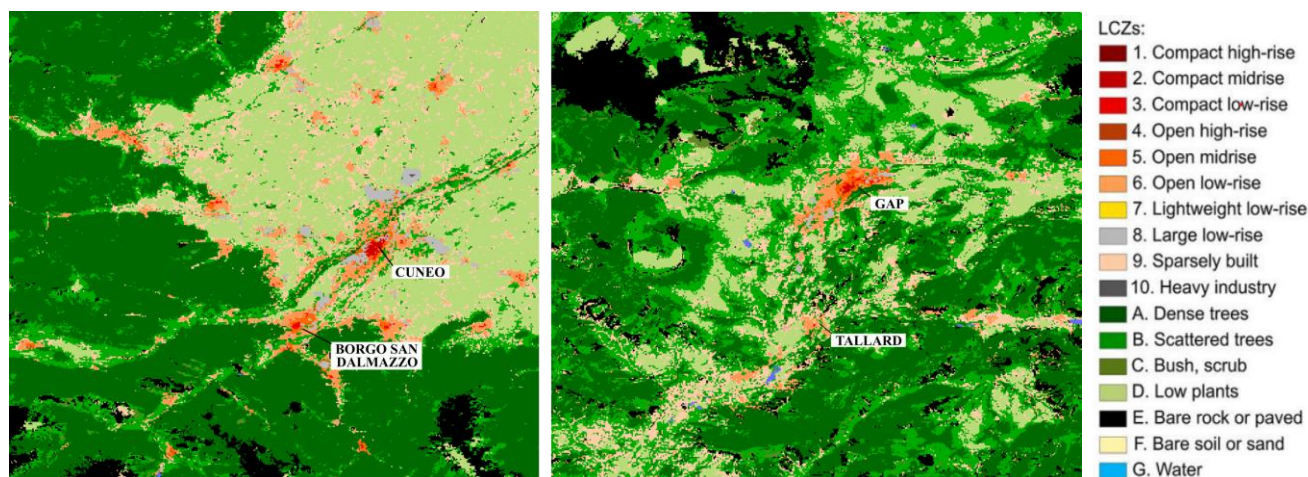


FIGURE 12: CLASSIFICATION DES ZONES CLIMATIQUES LOCALES (LCZ) DES ZONES URBAINES DE CUNEO (À GAUCHE) ET DE GAP (À DROITE), OBTENUE À L'AIDE DE LCZ GENERATOR. SOURCE : ÉLABORATION PROPRE À PARTIR DE LCZ GENERATOR (DEMUZERE ET AL., 2021).

4.2 Preuve indirecte

En l'absence de mesures directes et systématiques de la température de l'air à l'échelle urbaine, la présence et l'intensité des îlots de chaleur urbains dans les zones analysées peuvent être reconstituées grâce à une combinaison d'indices climatiques, environnementaux et territoriaux indirects. Ces indices, déjà disponibles dans des sources régionales et des données climatiques, permettent d'identifier les conditions propices au développement du phénomène, même dans des contextes de petite et moyenne taille comme ceux étudiés.

Un premier élément concerne l'évolution des **indicateurs de stress thermique**. Dans le cas de la province de Cuneo, les analyses climatiques mettent en évidence une augmentation de la fréquence des nuits tropicales et, plus généralement, une plus grande persistance des fortes chaleurs, même nocturnes (ARPA Piémont, 2019). Ce type d'indicateur est particulièrement pertinent en milieu urbain, car il reflète la capacité limitée du bâti à dissiper la chaleur accumulée durant la journée. Même dans les Hautes-Alpes, malgré des conditions climatiques moyennement plus fraîches, on observe une

augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, avec des conséquences possibles pour la population (ORS PACA, 2025).

Un second élément est représenté par **les différentiels de température de surface**, dérivés de données satellitaires. Les analyses basées sur la température de surface terrestre (LST) révèlent d'importants contrastes thermiques entre les surfaces artificielles et les zones végétalisées, mettant en évidence des zones de surchauffe en milieu urbain par rapport aux zones environnantes (Région du Piémont, 2024). Ce type d'indicateur, bien que se rapportant à la température de surface (îlot de chaleur urbain de surface [S-ICU]) et non directement à la température de l'air dans la canopée (îlot de chaleur urbain de sous-bois [CL-ICU]), constitue un indicateur indirect fiable du potentiel d'accumulation de chaleur dans les centres urbains : la corrélation entre S-ICU et CL-ICU (chapitre 1) est documentée dans la littérature, mais elle est non linéaire et dépend des conditions météorologiques, de l'heure et de la morphologie urbaine (OMM, 2023).

L'occupation des sols apporte également des informations précieuses. Dans les zones analysées, les surfaces imperméables sont fortement concentrées dans les zones urbanisées des fonds de vallée, où se situent les principaux centres de population. Cette configuration réduit l'évapotranspiration et contribue à l'accumulation de chaleur à l'échelle locale. Dans le cas des Hautes-Alpes, malgré une superficie totale de terres artificielles relativement faible, leur concentration spatiale dans les centres urbains accentue les effets locaux du réchauffement climatique. De même, dans la province de Cuneo, la répartition des agglomérations et la pression exercée sur les plaines et les fonds de vallée contribuent à créer des conditions favorables à ce phénomène.

Un autre facteur spécifique aux régions alpines est **la morphologie des vallées**. Dans les fonds de vallée, la ventilation limitée et les fréquentes inversions de température influencent de manière complexe le brassage de l'air et le comportement thermique local. En présence d'inversions de température, l'accumulation d'air froid dans les couches inférieures (« poches d'air froid ») peut, dans certains cas, atténuer le différentiel de température nocturne entre les zones urbaines et rurales, rendant plus difficile l'isolement du signal de l'îlot de chaleur urbain (ICU) lié à la pollution lumineuse (CL-ICU) du signal orographique naturel. Dans d'autres contextes, et notamment lors des vagues de chaleur, les mêmes conditions de stabilité atmosphérique qui génèrent des inversions de température créent également le contexte idéal pour une intensification maximale de l'ICU, lorsque l'accumulation de chaleur dans les matériaux artificiels ne peut être dissipée. Cette ambivalence exige une interprétation contextualisée du phénomène, qui ne peut se réduire à une relation linéaire entre la morphologie des vallées et le réchauffement climatique.

Enfin, des données à l'échelle locale confirment le rôle de la **couverture végétale** dans la régulation du microclimat urbain. Des études expérimentales menées en milieu urbain dans le nord de l'Italie montrent comment la présence et la qualité des infrastructures vertes contribuent à réduire les températures locales, tandis que les zones moins végétalisées sont davantage exposées au réchauffement climatique.

Les preuves indirectes décrites sont étayées par la littérature scientifique et par des études menées dans des contextes alpins comparables, qui sont analysées dans la section suivante.

4.3 Comparaison avec des contextes alpins comparables

L'analyse de contextes alpins similaires est essentielle pour comprendre la signature thermique spécifique des villes de montagne, où le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) ne disparaît pas, mais présente une dynamique spatiale et temporelle différente de celle des villes de plaine, fortement

influencée par la topographie, la pente et le trafic local. Dans ces contextes, les villes alpines, malgré leur faible population, exercent des fonctions urbaines et de services comparables à celles de centres urbains de plaine beaucoup plus importants, selon une logique souvent décrite comme un « **facteur 10** », qui amplifie leur rôle territorial et la pression exercée sur l'environnement (Convention alpine, 2022).

L'un des exemples les plus aboutis dans la région alpine est celui de **Grenoble**, dans le cadre du projet CASSANDRE (Rome et al., 2025). Un réseau de surveillance microclimatique à haute densité y a été mis en place, comprenant environ **62 à 64 points de mesure répartis dans des quartiers** classés selon les zones climatiques locales. Les résultats montrent une intensité d'îlot de chaleur urbain (ICU) variant de **+1 °C à +4,7 °C**, en fonction de la morphologie urbaine, de la saison et du couvert végétal. Cette étude de cas démontre clairement comment, même dans les vallées alpines profondes, l'ICU peut atteindre des valeurs significatives ayant un impact sur la santé humaine, tout en soulignant la forte hétérogénéité spatiale du phénomène.

Des expériences similaires sont documentées en Italie, notamment dans les villes de **Trente et Bolzano**, caractérisées par une population comparable à celle de Cuneo et leur situation en fond de vallée. À Trente, des études sur la « **signature thermique** » urbaine ont mis en évidence des contrastes thermiques marqués entre les zones urbaines et périurbaines, malgré la complexité des circulations d'air dans la vallée et des dynamiques locales. À Bolzano, des recherches plus récentes montrent comment l'utilisation de réseaux de capteurs à bas coût, fixes et mobiles, permet une analyse efficace de la variabilité du microclimat urbain, en palliant les limitations des stations météorologiques institutionnelles, non conçues pour la climatologie urbaine (Erell et al., 2011).

Des études menées en **Europe centrale apportent une confirmation supplémentaire** : l'intégration de données satellitaires (notamment Landsat 8/9) et de classifications morphologiques basées sur les zones climatiques locales (ZCL) a permis une analyse systématique de la variabilité spatiale du phénomène. En particulier, des analyses multicentriques ont mis en évidence que les zones urbaines caractérisées par une forte densité de bâtiments, une faible perméabilité des sols et une couverture végétale réduite (ZCL compactes et industrielles) présentent des températures de surface significativement plus élevées que les zones à faible densité ou à forte présence de végétation (Stewart & Oke, 2012). Ces différentiels de température de surface constituent un indicateur fiable du risque de surchauffe urbaine, même s'ils ne sont pas directement superposables aux mesures de température de l'air au niveau de la canopée. Des études menées dans les **zones montagneuses de Bavière** confirment également que l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est étroitement liée à la morphologie urbaine et à la densité de population, et non à la seule taille démographique de la ville. Ces études soulignent que même de petits centres urbains peuvent présenter des risques thermiques importants en cas d'imperméabilisation importante des sols (Doyle et al., 2026).

Globalement, les données disponibles indiquent que l'effet d'îlot de chaleur urbain dans les villes alpines présente une configuration plus complexe qu'en plaine. En particulier, la **composante nocturne** du phénomène est particulièrement importante, liée à la faible capacité du tissu urbain à dissiper la chaleur accumulée durant la journée, ce qui représente un facteur de risque majeur pour la santé des populations les plus vulnérables. Par ailleurs, l'estimation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain en milieu montagnard exige une attention particulière à la distinction entre l'effet urbain et les signaux orographiques naturels, tels que les inversions thermiques typiques des fonds de vallée alpins.

Un autre point de convergence entre les différentes études de cas concerne le rôle des **infrastructures vertes**. La littérature souligne que la présence de végétation, et en particulier la densité du couvert arboré, constitue l'un des principaux facteurs d'atténuation du réchauffement urbain (Erell et al., 2011).

La comparaison avec les contextes alpins analysés montre que le phénomène d'îlot de chaleur urbain exige une approche différente en milieu montagneux que dans les grandes villes de plaine. Dans les vallées, en effet, la combinaison de la morphologie, des conditions de ventilation et de la structure du tissu urbain rend le phénomène plus **variable**. Dans l'espace, il est plus difficile d'isoler les signaux climatiques naturels. C'est pourquoi les expériences étudiées suggèrent l'utilité d'intégrer différentes sources d'information (données satellitaires, classifications morphologiques telles que les zones climatiques locales et, le cas échéant, mesures locales à haute résolution) afin de fournir une représentation plus précise de la dynamique réelle du réchauffement urbain.

5 Implications opérationnelles et orientations méthodologiques pour le contexte de l'étude

Les analyses présentées dans les chapitres précédents ont mis en évidence la compatibilité des conditions morphologiques, climatiques et d'occupation des sols des principaux centres de la province de Cuneo et des Hautes-Alpes avec le développement de phénomènes de surchauffe urbaine similaires aux îlots de chaleur. En l'absence de réseaux de surveillance dédiés à la mesure directe de la canopée de l'îlot de chaleur urbain, cette conclusion doit être interprétée comme une évaluation du **risque potentiel**, et non comme une **mesure** du phénomène lui-même. Elle repose en effet sur des données indirectes issues de l'analyse de données satellitaires relatives à la température de surface, à la classification morphologique des zones de faible couverture végétale, aux indicateurs de vulnérabilité sociodémographique et à des comparaisons avec des contextes alpins comparables.

En l'absence de réseaux de surveillance dédiés à l'échelle urbaine, il est nécessaire de définir un cadre méthodologique et opérationnel capable d'aider les administrations locales à interpréter le phénomène et à élaborer des stratégies d'adaptation, en utilisant les outils déjà disponibles et les approches progressives.

5.1 Résumé des preuves et implications pour les territoires

L'étude met en évidence comment, bien que les villes alpines de la zone étudiée soient démographiquement petites, elles remplissent des fonctions urbaines et ont des densités de bâtiments qui génèrent des pressions thermiques importantes (Convention alpine, 2022).

Dans les deux zones analysées, différentes approches de la problématique émergent, liées aux structures institutionnelles et aux méthodes de production et d'utilisation des données. Dans la **province de Cuneo**, il existe une **chaîne d'approvisionnement institutionnelle structurée**, fondée sur la surveillance météorologique et sanitaire et sur des méthodologies régionales déjà développées pour la cartographie de la vulnérabilité (ARPA Piémont, 2025 ; Région Piémont, 2024). Dans ce contexte, le besoin principal concerne le transfert de ces outils à une **échelle plus fine**, permettant d'interpréter les différences entre quartiers et contextes urbains.

Dans le cas des **Hautes-Alpes**, on observe en revanche une forte disponibilité de données ouvertes et d'outils opérationnels (Météo-France, IGN, Copernicus), face à un cadre d'analyse du climat urbain à l'échelle des principaux centres habités, comme Gap et Briançon, non encore systématisé. Dans ce contexte, la priorité est de consolider l'intégration entre les différentes sources d'information et de développer des lectures systématiques du phénomène à l'échelle urbaine.

Ces différences n'indiquent pas un déficit de capacités, mais soulignent plutôt une **complémentarité** entre les deux systèmes, ce qui peut constituer un élément précieux dans une analyse transfrontalière.

Dans les deux zones, il est crucial de distinguer la contribution de la chaleur urbaine de celle des phénomènes orographiques naturels. Dans les fonds de vallées alpines, les inversions thermiques et la stagnation d'air froid peuvent modifier les gradients thermiques et compliquer l'interprétation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

5.2 Approche méthodologique pour l'analyse locale

Pour pallier le manque de mesures directes, nous proposons l'adoption d'une approche diagnostique intégrée, structurée sur trois niveaux et conforme aux meilleures pratiques développées dans des contextes alpins comparables.

La première phase consiste en un **criblage satellitaire** (îlot de chaleur urbain de surface), basé sur les données de capteurs tels que Landsat 8/9 ou ECOSTRESS. Ceci permet la production de cartes de température de surface (LST) et l'identification des zones les plus sujettes au réchauffement climatique, généralement associées aux surfaces minéralisées et aux tissus urbains denses (Piémont, 2024 ; Doyle et al., 2026).

Cette phase s'accompagne de la **cartographie morphologique du tissu urbain**, grâce à l'utilisation de zones climatiques locales (LCZ), qui permettent d'associer chaque zone urbaine à une sensibilité thermique spécifique basée sur la densité des bâtiments, les matériaux et la présence de végétation (Stewart & Oke, 2012).

Enfin, une phase **d'évaluation atmosphérique** (îlot de chaleur urbain), basée sur des réseaux de capteurs locaux à haute densité ou sur des systèmes mobiles à faible coût, peut être introduite si nécessaire. Ces instruments permettent de détecter les gradients thermiques nocturnes à hauteur humaine, particulièrement importants pour la santé publique, à condition que la conception des mesures tienne compte des spécificités orographiques du territoire (Rome et al., 2025).

Le cadre cognitif ainsi construit peut être intégré aux **données sociodémographiques** afin de développer une cartographie des risques qui croise le danger thermique avec la vulnérabilité de la population, avec une attention particulière aux zones caractérisées par une forte présence de personnes âgées ou d'enfants (Ellena et al., 2023 ; Région Piémont, 2024).

5.3 Directives opérationnelles pour la planification et l'adaptation

L'objectif ultime est de passer d'une gestion d'urgence des vagues de chaleur à une intégration structurelle des enjeux climatiques dans les outils courants de l'aménagement du territoire et de la **planification urbaine**. Conformément au principe du *mainstreaming* de l'adaptation, désormais largement reconnu dans les politiques européennes et la littérature internationale sur l'adaptation au changement climatique (Commission européenne, 2021 ; GIEC, 2022), cette approche implique l'intégration systématique de la dimension climatique dans les documents d'urbanisme (PRGC en Italie, PLU/PLUi en France) ainsi que dans les règlements de construction.

Parmi les priorités opérationnelles prioritaires figurent :

- l'adoption d'outils de gestion, tels que des **fiches d'action**, capables de définir clairement les responsabilités, les délais de mise en œuvre et les indicateurs de suivi des interventions ;
- le renforcement des **infrastructures vertes et bleues**, en accordant une attention particulière à l'augmentation de la couverture arborée, reconnue comme l'un des leviers les plus efficaces pour limiter les effets de la surchauffe urbaine dans le contexte local ;

- la mise en œuvre d'une **combinaison de solutions complémentaires**, fondées sur une approche intégrée associant végétalisation, gestion de l'eau, choix des matériaux, désimperméabilisation des sols et amélioration des conditions de ventilation, afin d'adapter les interventions aux caractéristiques spécifiques de chaque contexte urbain (ADEME, 2021 ; Plus fraîche ma ville, 2026) ;
- la prise en compte des **co-bénéfices associés aux stratégies d'adaptation**, notamment l'amélioration de la biodiversité, la restauration de sols urbains fonctionnels, l'augmentation de l'infiltration des eaux pluviales, la réduction du ruissellement, ainsi que les bénéfices pour le bien-être, la santé et la qualité des espaces publics. Une attention particulière devra toutefois être portée au choix des essences végétales afin de limiter d'éventuels effets indésirables, tels que les besoins en eau, les risques allergènes ou la faible résilience de certaines espèces face au changement climatique ;
- l'introduction de **critères de conception bioclimatique dans les règlements d'urbanisme et de construction**, tels que l'utilisation de matériaux à fort albédo, le développement des toitures végétalisées et le maintien de niveaux adéquats de perméabilité des sols ;
- le développement de **formes de gouvernance intersectorielle**, favorisant la coordination entre les secteurs de l'environnement, de l'urbanisme, de la santé et de la protection civile, afin d'intégrer les politiques d'adaptation aux stratégies de régénération urbaine et de santé publique (Ellena et al., 2023).

Bibliographie

- ADEME (2021). *Rafraîchir les villas : des solutions variées* . Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/4649-rafraichir-les-villes-9791029717475.html>
- ARPA Piémont (2019). *Analyse des scénarios climatiques futurs dans la province de Cuneo* , Département des risques naturels et environnementaux. Réalisée dans le cadre du projet Interreg VA Italie-France ALCOTRA « CClimaTT ».
- ARPA Piémont (2025). *Évaluation de la mortalité estivale en relation avec les vagues de chaleur à Cuneo – Été 2025* , Système régional de surveillance.
- AtmoSud (2025). *Ilots de chaleur urbains : des solutions inspirantes déployées en région Sud* . Portail Inspirons, Observatoire Régional de la Qualité de l'Air de la région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur. Disponible sur : <https://inspirons.atmosud.org/ilots-de-chaleur-urbains-marseille-nice-toulon-avignon-aix-en-provence-gap-solutions-inspirantes-en-region-sud/> (dernière consultation : 14 mai 2026).
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulation des interactions surface-plante-air dans les environnements urbains à l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel . *Environmental Modeling & Software* .
- CÉREMA (2022). *Cartographie nationale des zones climatiques locales (LCZ) : classification du tissu urbain pour la sensibilité thermique* .
- Cheval, S., et al. (2024). Revue systématique des liens entre îlot de chaleur urbain et vagues de chaleur. *Climate Risk Management* , 44.
- Municipalité de Bologne (2015). *Plan d'adaptation pour la ville de Bologne* . Version soumise à approbation à compter du 4 juin 2015. Projet LIFE+ BLUEAP (Plan local d'adaptation de l'environnement urbain de Bologne pour une ville résiliente).
- Convention alpine (2021). *Plan d'action pour le climat 2.0* . Secrétariat permanent de la Convention alpine.
- Convention alpine (2022). *9e rapport sur l'état des Alpes – Villes alpines. Clé du développement durable dans la région alpine* .
- Demuzere, M., Kittner, J., Bechtel, B. (2021). LCZ Generator : une application web pour la création de cartes de zones climatiques locales. *Frontiers in Environmental Science* , 9 : 637455. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455>
- Denaro, N., La Rosa, D., Privitera, R. (2025). Évaluation des bénéfices de la régulation climatique et de la perception sociale d'un parc urbain dans le nord de l'Italie. Dans : Diana, L., Colajanni, S., Sciuto, G., Sommesse, F. (dir.), *Valoriser la nature en ville. Cadres et stratégies pour des environnements urbains résilients et sains* , actes de conférence, Naples, 13-14 novembre 2025, Luciano Editore.
- Dienst, M., Lindén, J., et Esper, J. (2018). Détermination de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain dans les villages et son lien avec la couverture terrestre dans trois zones climatiques européennes. *Climate Research* , 76, 1-15.

Doyle, R., Leichtle, T., Pauleit, S., et Taubenböck, H. (2026). L'influence de la taille de la ville par rapport à la forme urbaine sur la variation de la température de surface terrestre et l'effet d'îlot de chaleur urbain de surface : une analyse comparative de villes allemandes. *Plos one*, 21(2), e0340060.

Ellena, M., Breil, M., et Soriani, S. (2020). Le lien chaleur-santé en milieu urbain : une revue systématique de la littérature explorant les vulnérabilités socio-économiques et les caractéristiques de l'environnement bâti. *Urban Climate*, 34.

Ellena, M., Melis, G., Zengarini, N., Di Gangi, E., Ricciardi, G., Mercogliano, P., & Costa, G. (2023). Évaluation des risques d'îlot de chaleur urbain à micro-échelle sur le lien chaleur-santé en milieu urbain en examinant les facteurs socio-économiques et les caractéristiques de l'environnement bâti : l'étude de cas de Turin (Italie). *Urban climate*, 49, 101514.

Erell, E., Pearlmutter, D., et Williamson, T. (2012). *Microclimat urbain : concevoir les espaces entre les bâtiments*. Routledge.

Gallo, E., Quijal -Zamorano, M., Méndez Turrubiates, RF et al. Mortalité liée à la chaleur en Europe en 2023 et rôle de l'adaptation dans la protection de la santé. *Nat Med* 30, 3101–3105 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03186-1>

GREC-SUD (2018). *Impacts du changement climatique et transition(s) dans les Alpes du Sud*. Cahier thématique du Groupe régional d'experts sur le climat en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Heaviside, C., Macintyre, H., et Vardoulakis, S. (2017). L'îlot de chaleur urbain : implications pour la santé dans un environnement en mutation. *Current environmental health reports*, 4(3), 296-305.

Huttner, S., Bruse, M. et Dostal, P. (octobre 2008). Utilisation d'ENVI-met pour simuler l'impact du réchauffement climatique sur le microclimat des villes d'Europe centrale. Dans : *5e Conférence germano-japonaise sur la climatologie urbaine* (Vol. 18, n° 18, p. 307-312). Fribourg-en-Brisgau, Allemagne : Institut météorologique, Université Albert-Ludwigs.

INSEE (2022). *Dossier complet – Département des Hautes-Alpes (05)*. Institut national de la statistique et des études économiques.

Iodice, S., Arbau, L., Maistrali, A., Marando, F., Melchiorri, M., Proietti, P., ... et Vandecasteele, I. (2024). Villes de l'UE et chaleurs extrêmes. *Policy Brief*, Commission européenne, Centre commun de recherche (JRC137891).

GIEC (2022). *Changements climatiques 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

ISPRA (2023). *Vers des villes résilientes : interventions du programme expérimental d'adaptation au changement climatique en milieu urbain*. Quaderni Ambiente e Società, 29/2023. ISBN 978-88-448-1203-4

Ivajnsiĉ, D., Kaligariĉ, M., & Źibera, I. (2014). Régression géographiquement pondérée de l'îlot de chaleur urbain d'une petite ville. *Géographie appliquée*, 53, 341-353.

Kopeck, R. J. (1970). Nouvelles observations sur l'îlot de chaleur urbain dans une petite ville. *Bulletin de l'American Meteorological Society*, 51(7), 602-609.

Lokoshchenko, M.A., & Eukova, Ye. A. (2021). Îlots de chaleur des petites villes et des villages de la région de Moscou. *Doklady Earth Sciences*, 500, 875–881.

Météo-France (2022). *Climadiag Commune – Outil de diagnostic des évolutions climatiques à l'échelle communale*. Disponible sur : meteofrance.com [consulté en mai 2026].

Météo-France (2024). *Climadiag Chaleur en ville – Service de diagnostic de la surchauffe urbaine*. Disponible sur : services.meteofrance.com [consulté Mai 2026].

Moyer, A. N., & Hawkins, T. W. (2017). Effets des rivières sur l'îlot de chaleur d'une petite zone urbaine. *Urban Climate*, 21, 262–277.

Noro, M., & Lazzarin, R. (2015). Îlot de chaleur urbain à Padoue, Italie : analyse de simulation et stratégies d'atténuation. *Urban Climate*, 14, 187–196.

Oke, T. R. (1973). Taille de la ville et îlot de chaleur urbain. *Atmospheric Environment*, 7(8), 769–779.

Oke, T. R. (1982). Les bases énergétiques de l'îlot de chaleur urbain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., et Voogt, J. A. (2017). *Climats urbains*. Cambridge University Press.

ORS PACA (2025). *États de santé des habitants des Hautes-Alpes. Synthèse du portrait socio-sanitaire et environnemental*. Observatoire Régional de la Santé Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Plus fraîche ma ville (2025). *Plateforme nationale d'accompagnement des collectivités pour l'adaptation des villes aux fortes chaleurs*. Disponible sur : <https://plusfraichemaville.fr/> (consulté en mai 2026).

Région du Piémont (2024). *Distribution de la criticité des îlots de chaleur urbains basée sur les données satellitaires Landsat 8 et les données démographiques de l'ISTAT*.

Ressources pour l'avenir (RFF) (2023). *Îlots de chaleur urbains : notions de base*. Disponible sur : <https://www.rff.org/publications/explainers/urban-heat-islands-101/>

Rome, S., Joseph Bicout, D., Bigot, S., Bisson, G., Casagrande, A., et al. (2025). *Impact climatique et sanitaire urbain du chauffe-eau à Échirolles et Grenoble*. Rapport final du projet CASSANDRE, ADEME. 58 p. <hal-05449285>

Santé publique France (2025). *Chaleur et santé en PACA. Bilan 2024*. Bulletin régional, 11 mars 2025. Disponible sur : santepubliquefrance.fr [consulté en mai 2026].

Steenneveld, G.J., Koopmans, S., Heusinkveld, B.G., et al. (2011). Quantification des effets d'îlot de chaleur urbain et du confort humain pour des villes de taille et de morphologie urbaine variables aux Pays-Bas. *Journal of Geophysical Research*, 116, D20129.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Zones climatiques locales pour les études de température urbaine. *Bulletin de l'American Meteorological Society*.

Tan, M., & Li, X. (2015). Quantification des effets de la taille des établissements sur les îlots de chaleur urbains dans des zones géographiques relativement uniformes. *Habitat International*, 49, 100–106.

Vardoulakis , E., Karamanis, D., Fotiadi , A. et Mihalakakou , G. (2013). L'effet d'îlot de chaleur urbain dans une petite ville méditerranéenne de Grèce. *Énergie solaire* , 94, 128-144.

Organisation météorologique mondiale (OMM). (2023). *Orientations sur la mesure, la modélisation et la surveillance de l'îlot de chaleur urbain de la couche de canopée* .

Interreg



Cofinancé par
l'Union Européenne
Cofinanziato
dall'Unione Europea

France – Italia ALCOTRA

RE-VERD



toutem
ASSOCIATI srl

05 Hautes-Alpes
c|a.u.e
Conseil d'architecture, d'urbanisme
et de l'environnement

Ce document a été rédigé par l'ingénieure Sofia Fellini du DIATI – Département d'ingénierie de l'environnement, du territoire et des infrastructures de l'École polytechnique de Turin, dans le cadre du microprojet Alcotra Reverd, cofinancé par le programme Interreg VI-A Italie-France ALCOTRA 2021-2027.