ICU

L'îlot de chaleur urbain

Que sait-on de lui ?
Comment le mesurer ?

Etude de cas en situation de canicule la plus fréquente (2012)
sur les agglomérations de Lyon, Saint-Etienne et Grenoble

Accompagnement par les agences d'urbanisme
des travaux de thèse de Mme Julita Diallo Dudek

SEPTEMBRE 2019

Concours financier
ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Avec le soutien de
GRANDLYON la métropole
SAINT-ÉTIENNE la métropole
SÉM
GRENOBLE ALPES MÉTROPOLE

Réalisation
Agences d'urbanisme en Auvergne-Rhône-Alpes

Sommaire

Introduction 3

L'ICU, comment fonctionne-t-il ? 6

L'ICU, comment l'étudier, avec quels outils et méthodes ? 11

L'ICU, comment se manifeste-t-il dans les agglomérations de Lyon, Saint-Etienne et Grenoble ? 14

Conclusion 22

Quelques définitions 24

Introduction

Depuis plusieurs années, les Agences d'Urbanisme de Lyon, Saint-Etienne et Grenoble travaillent à une meilleure compréhension des questions climatiques, en particulier sur la ville dense, là où se posent de forts enjeux d'adaptation au changement climatique. Cet horizon doit désormais être objectivé et combiné avec les questions d'actualité de stabilisation de l'artificialisation du territoire (Zéro Artificialisation Nette), de densification raisonnée des villes, de mixité des fonctions urbaines, de qualité de vie, d'attractivité et de renouvellement urbain, ou encore de mobilité. La perspective de subir des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses dans les années à venir doit être intégrée pour développer des solutions dans la construction neuve comme dans la rénovation, l'aménagement des espaces publics, la restauration écologique du territoire et la transition énergétique.

Les partenaires des Agences, au premier rang desquelles, l'Ademe et les 3 Métropoles de Lyon, Grenoble et Saint-Etienne, ont permis au réseau régional des Agences d'Urbanisme (Urba 4 aujourd'hui) de suivre et d'apporter leur concours aux travaux de thèse de Julita Diallo-Dudek du laboratoire de climatologie de l'Université Lyon III et de Météo France (compléments par Julita ?). Ce travail porte sur les mécanismes de formation et de comportement de l'îlot de chaleur urbain comparé sur les trois agglomérations rhône-alpines. Les bases de données de d'Urbalyon, de l'AURG et d'Epures, ont permis d'alimenter des modèles climatiques et de cartographier ces phénomènes dans trois configurations géographiques très différentes sur une même région. Ce travail apporte une rigueur scientifique et a constitué une opportunité pour les Agences d'échanger et de renforcer leurs connaissances pendant plusieurs années, sur les phénomènes d'ICU, sur sa mesure et l'interprétation des phénomènes.

> *« Les Parisiens sont sur les dents !*
> *On peste, on sue, on gesticule …*
> *Qu'ils soient dehors, qu'ils soient dedans,*
> *Tous redoutent tes accidents,*
> *Ô canicule ! »*
>
> Court poème signé Saint-Sylvestre, paru en 1911
> dans le quotidien français Le Soleil lors d'un été particulièrement chaud

L'Ilot de Chaleur Urbain, c'est quoi exactement ?

L'effet d'îlot de chaleur urbain fait référence à un phénomène d'élévation de température localisée en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines. L'ICU est particulièrement marqué la nuit, quand les zones rurales tendent à se rafraîchir alors que les matériaux de construction de la ville rayonnent de l'énergie accumulée durant la journée, issue essentiellement des radiations solaires et des activités humaines.

C'est chaud une ville, la nuit (d'été)

Le phénomène d'îlot de chaleur a toujours existé dans les agglomérations humaines. La littérature française du XIX^{e} siècle décrit la fournaise des villes les soirs d'été (Maupassant, dans *Bel Ami*). Le terme d'îlot de chaleur urbain a été proposé au milieu du XX^{e} par le climatologue britannique Gordon Manley mais les premiers rapports sur le contraste entre la « chaleur artificielle » de Londres et celle de la campagne remontent à 200 ans (1818).

Pourquoi avoir choisi la canicule de 2012 pour étudier l'ICU ?

La canicule de 2012 a été « normale ». Ce caractère non exceptionnel permet d'analyser l'îlot de chaleur urbain tel qu'il se manifeste dans des conditions les plus fréquemment observées dans les décennies précédentes..

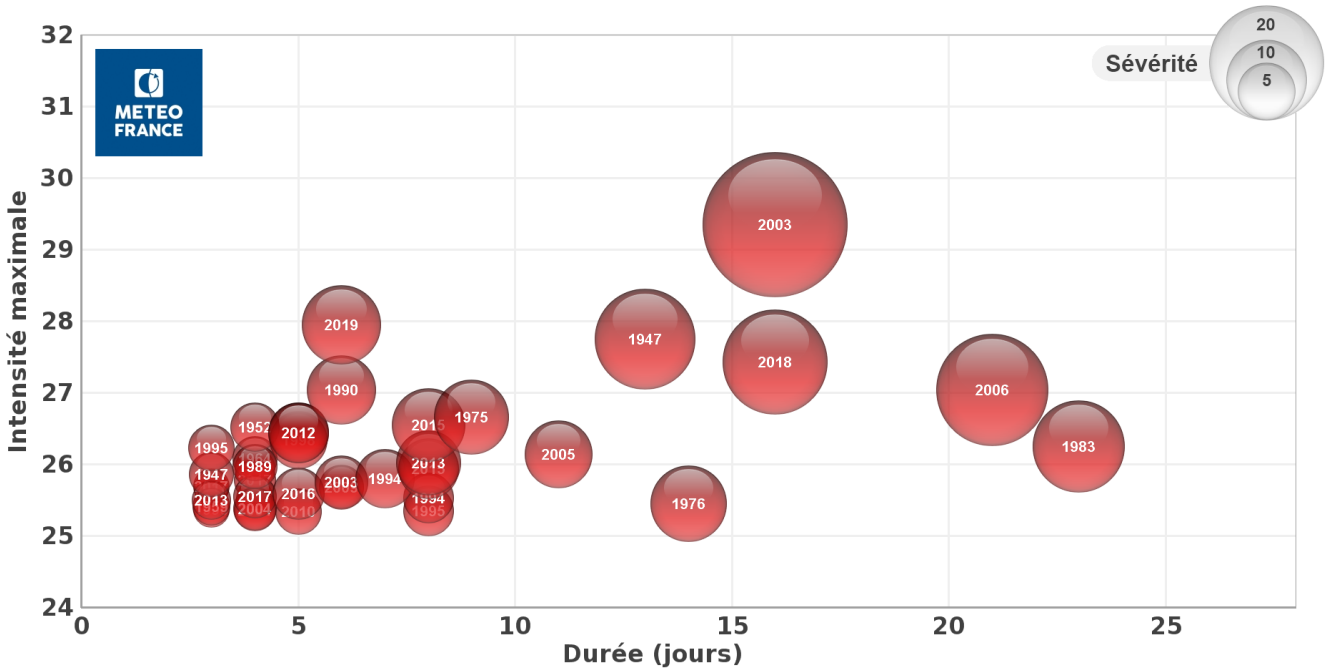
L'ICU n'est pas lié au changement climatique mais le risque est accru par une résilience faible des systèmes urbains.

Aujourd'hui, la population des villes mondiales a dépassé celle des villages ruraux et devrait concerner 66 % de la population de la planète à l'horizon 2050 (DESA, Nations Unies). Les auteurs de Mora et al. (2017), cités par J. Diallo Dudek, montrent que 30 % de la population mondiale doit déjà subir les effets de la canicule au moins 20 jours par an (la notion de canicule varie selon les pays, seuils de températures et durées varient). Avec le changement climatique et l'augmentation du nombre des habitants des grandes villes, il est possible que ce chiffre puisse croître entre la moitié et les trois quarts en fonction du scénario d'émission de gaz à effet de serre.

Avec des épisodes caniculaires rapprochés et des températures en moyenne plus chaudes, l'inconfort des villes va grandissant, se combinant aux épisodes de pollutions atmosphériques, affectant les populations les plus sensibles et désormais chacun d'entre nous.

Les principales vagues de chaleur enregistrées en France

1947 à juin 2019 : 40 épisodes identifiés



Source : Météo-France, seuils utilisés : 25,3°C / 23,4°C / 22,4°C

En 2003 en Europe, 70 000 personnes sont décédées de l'excès de température (Robine et al. , 2008).

Cette surmortalité a été plus forte à Paris qu'à Lyon, elle-même plus élevée qu'à Grenoble. Les politiques de prévention et les stratégies d'adaptation de l'environnement urbain à la chaleur (et non à l'ICU proprement dit, la surmortalité était également forte en zone rurale) ne peuvent pas attendre. L'isolation des bâtiments et leur conception générale font généralement peu cas du confort d'été et les constructions neuves bioclimatiques ne domineront le parc d'habitat que dans de trop longues années au rythme des démolitions et des reconstructions. La conception des bâtiments est pourtant importante pour mieux protéger les habitants et éviter l'utilisation de solutions de climatisation électrique. Pendant la canicule de 2003, la consommation d'électricité a augmenté de 10% (Le Bras, 2015) et la consommation d'eau a grimpé.

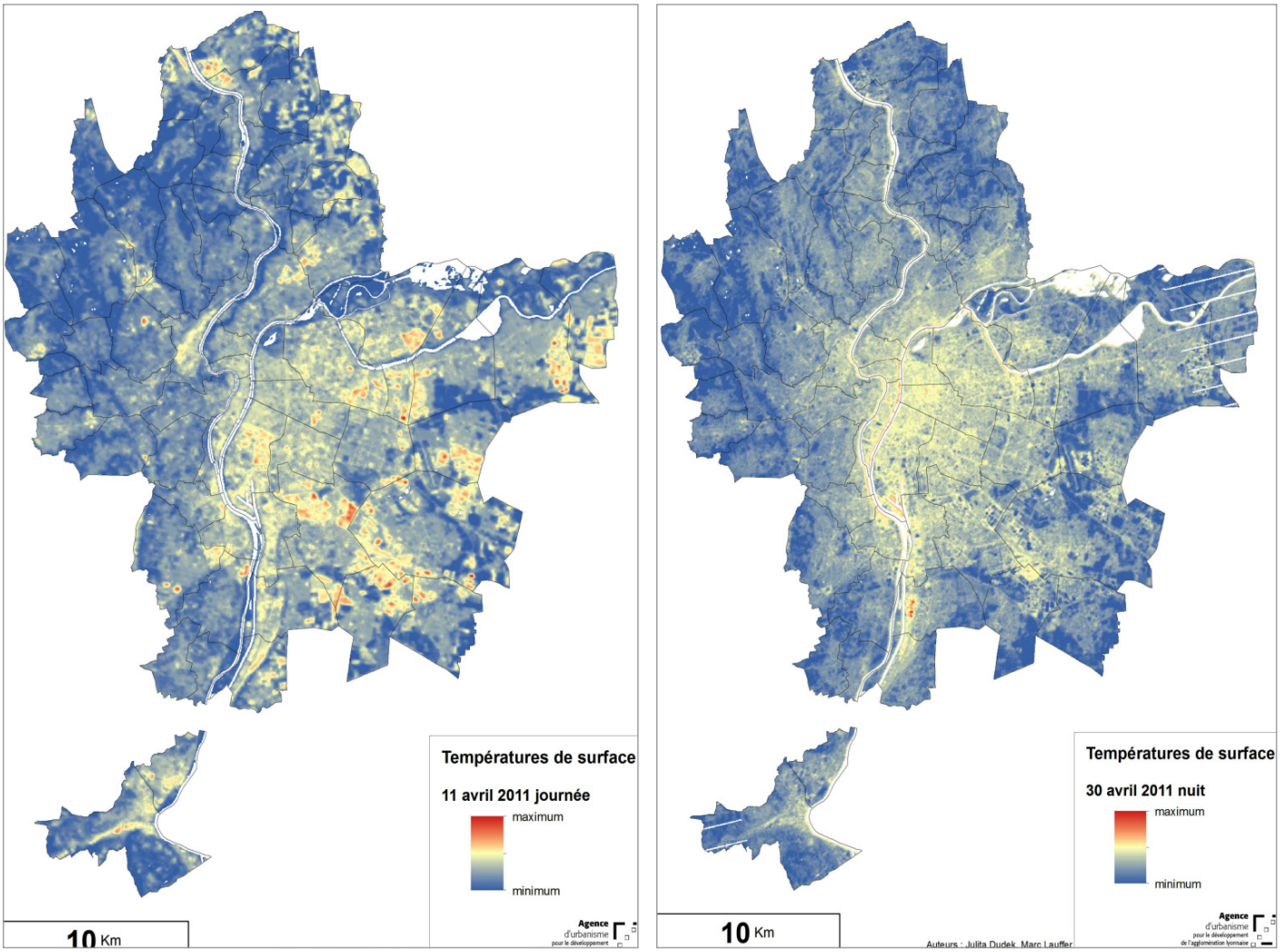
Comment représenter et localiser l'îlot de chaleur urbain ?

Les premières représentations cartographiques de l'ICU ont été établies par les Agences d'urbanisme rhônalpines avec l'utilisation des images satellites (Landsat), mais il ne s'agit que d'une simple moyenne de description de l'îlot de chaleur urbain et généralement fausse car la plupart des images sont prises pendant la journée alors que l'îlot de chaleur urbain est un événement surtout nocturne et que la comparaison des températures entre le milieu urbain (présenté par le toit) et le milieu rural (présenté par le sol) est faite sur deux niveaux différents.

En conséquence, les informations obtenues par les images satellites doivent être recoupées avec d'autres types de données, notamment de modélisation.

C'est ce que nous propose le travail de Julita Diallo Dudek, doctorante au laboratoire de climatologie de l'Université Lyon III, que les agglomérations de Grenoble, Saint-Etienne et Lyon ont décidé de suivre pendant plusieurs années avec le concours de leurs agences d'urbanisme.

Températures de surface jour et nuit



Source : Agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine lyonnaise

Comment fonctionne-t-il ?

Une couche d'air naturellement sous influences

Sous l'influence des vents, les couches urbaines peuvent se décaler sur les secteurs périphériques, qui subissent alors l'ICU. La rugosité du sol ralentit ce vent et la chaleur stagne. L'évaporation des eaux de surface et des sols, l'évapotranspiration du végétal, l'inertie thermique des matériaux et le stockage (voire la production anthropique) de chaleur sont les autres facteurs physiques influençant l'ICU.

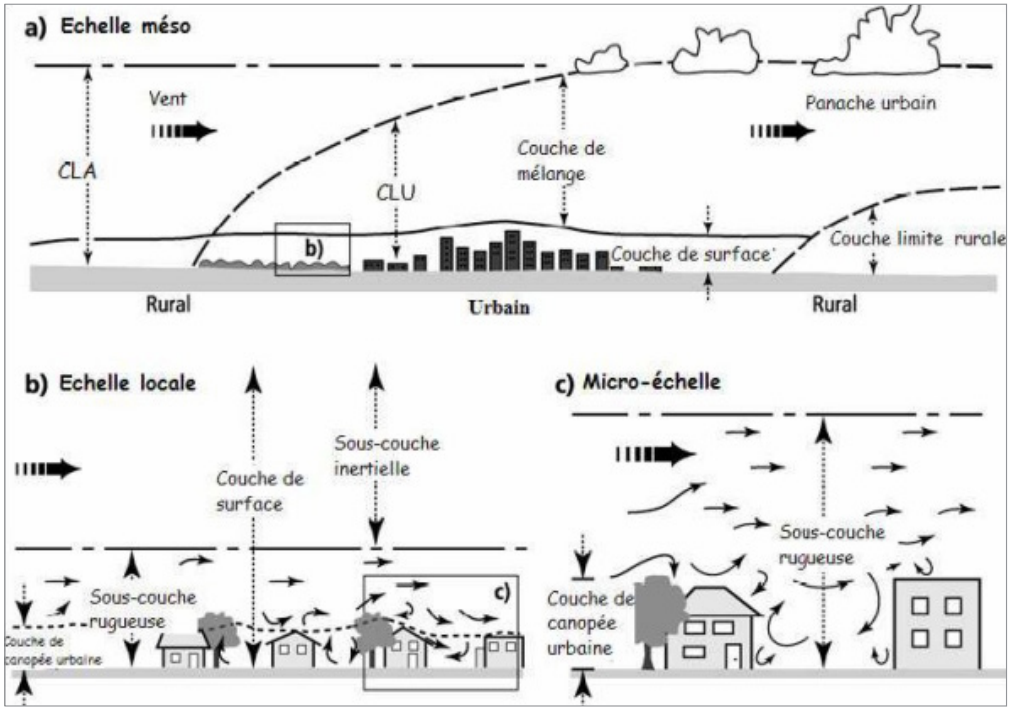
Les modèles climatiques intègrent aussi les turbulences créées en vertical avec les autres masses d'air (stable, instable ou neutre), s'élevant quand elles sont chaudes et descendant quand elles se refroidissent et variant au cours de la journée.

Dans le milieu urbain, la couche limite atmosphérique (CLA) est appelée couche limite urbaine (CLU). Elle s'étend sur la zone de l'agglomération et exclusivement en présence d'un vent très faible. Ses limites peuvent être décalées au-dessus de la zone rurale par la présence d'un panache urbain.

A l'échelle locale, seules les couches basses (dites rugueuses) sont influencées par les bâtiments, l'orientation des rues, la végétation,… qui ralentissent les vents, contribuant à l'ICU.

A l'échelle du quartier, il est appelé l'îlot de chaleur urbain de surface (ICUS). Il est caractérisé par des valeurs de températures beaucoup plus élevées par rapport à la température d'air à 2 m du sol seulement. Certaines villes seraient donc plus ou moins chaudes selon leurs « textures », la nature de leur tissu urbain ?

Le comportement de la couche atmosphérique au-dessus de la ville

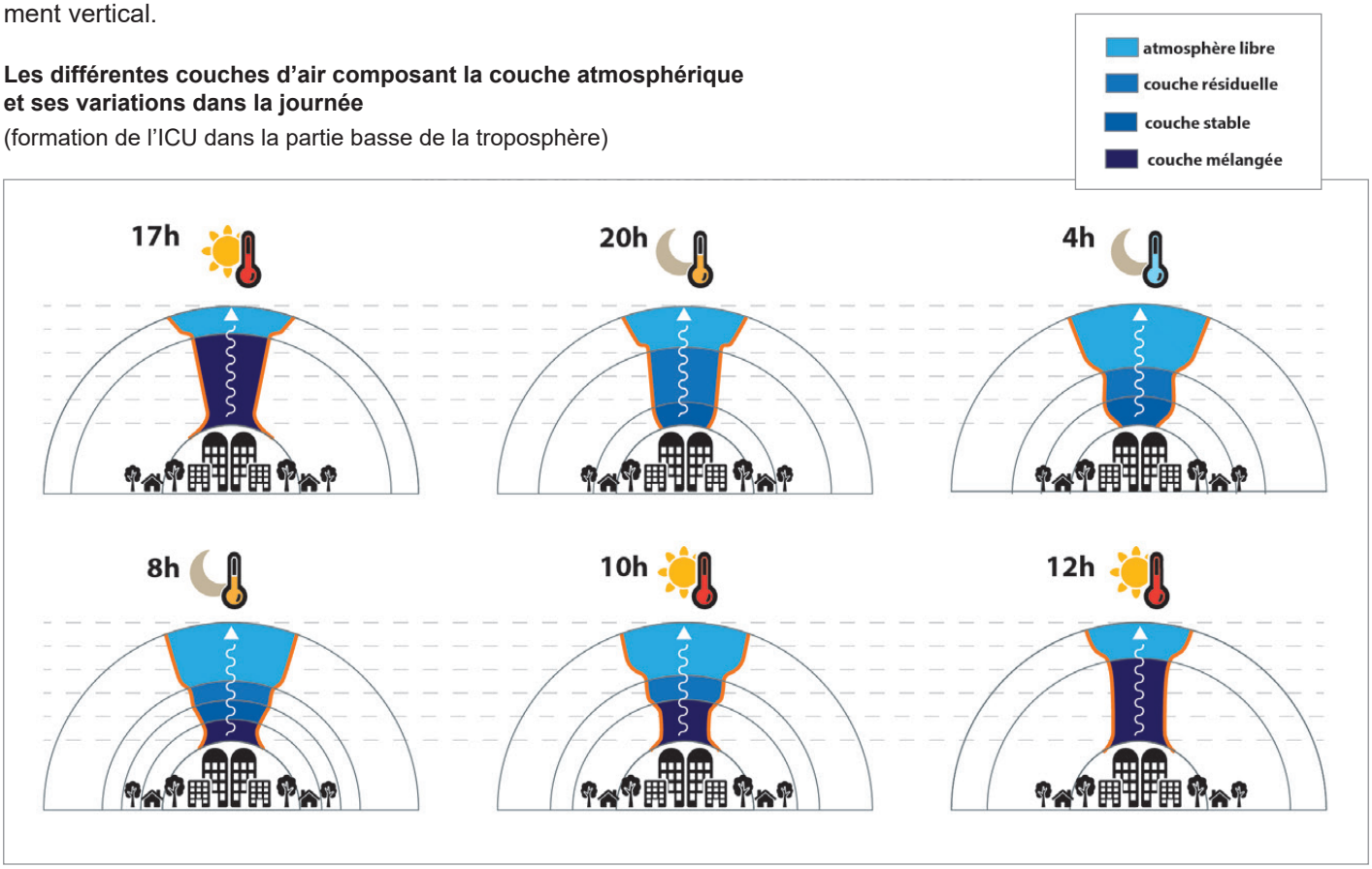


Source : Oke et Leroyer, 2006

Entre midi et le coucher du soleil, une couche convective (CM) très instable se forme quand le ciel est dégagé et le sol chaud, finissant en inversion thermique. La déstabilisation thermique provoque un mouvement vertical.

Les différentes couches d'air composant la couche atmosphérique et ses variations dans la journée

(formation de l'ICU dans la partie basse de la troposphère)



Source : Agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine lyonnaise, d'après Stull, 2012

La Couche Limite Atmosphérique (CLA) constitue la partie la plus basse de la troposphère qui touche directement la surface, et subit son influence. C'est dans cette couche d'air, celle où nous vivons, que se forme l'ICU. Il est le résultat du changement de type de surface (artificialisation des sols par l'urbanisation), dans le sens ou le bilan énergétique entre les surfaces urbanisées et les surfaces naturelles sont différents, elles-mêmes présentant des variations selon leur nature.

Les modèles atmosphériques de surface prennent en compte toutes les données d'occupation des sols (flux infrarouge et réémission de chaleur différentes), le relief et la rugosité de la surface (influençant les vents), jusqu'à la micro-échelle, à l'échelle du quartier, en intégrant les différences des revêtements urbains (toitures, routes) et des surfaces naturelles (types de végétations, eau).

En ville, l'effet de réchauffement est accentué par les grands immeubles, qui bloquent les courants d'air refroidissants, et l'absence d'une couverture végétale susceptible de créer des zones ombragées et d'augmenter l'humidité de l'air.

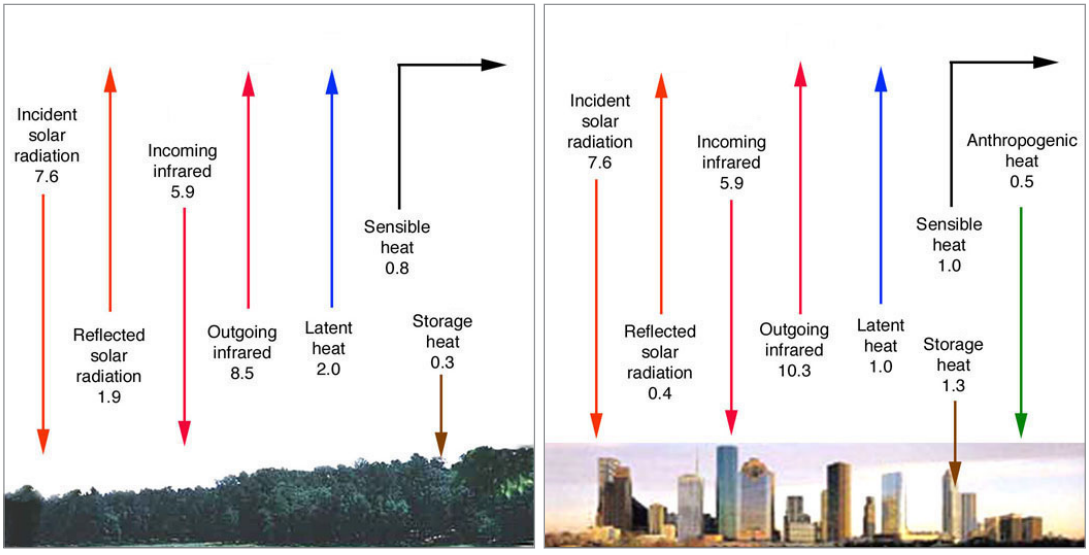
Végétaliser la ville est la solution privilégiée de régulation du microclimat urbain : une vision du projet pour le « réaménagement » du quartier de Gerland à Lyon ?

Source : Agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine lyonnaise, VIJ 2011

En ville, la valeur de l'albédo dans le proche infrarouge est moins élevée que pour des surfaces naturelles, et il se caractérise par une grande hétérogénéité. Enfin, la grande capacité thermique des matériaux urbains va augmenter l'inertie thermique de la ville et freiner ainsi le refroidissement de surfaces urbanisées à l'opposé des surface naturelles. En milieu urbain, parce que les matériaux de construction et les sols contiennent peu d'eau, l'énergie provenant du flux solaire est utilisée surtout sous la forme de flux de chaleur sensible pour réchauffer l'air alentour, et est très peu transformée en flux de chaleur latente (deux fois moins qu'à la campagne).

La différence de température entre la ville et la zone rurale conduit ainsi à la création d'un ICU. Cette différence est à l'origine d'une brise urbaine qui se déclenche seulement en journée, mais pas la nuit (forte stabilité au-dessus de la couche neutre résiduelle), limitant en quelques sortes toutes formes de « climatisation naturelle » de la ville.

Les matériaux de construction et leurs bilans radiatifs à l'origine de l'ICU donnent des écarts de radiation importants entre la ville minéralisée et la campagne (ou le couvert végétal urbain).



Source : Shepherd, 2005 (bilans énergétiques des surfaces en kWhm²/jour)

L'ICU en trois dimensions

Il est donc difficile de mesurer l'ICU seulement par l'occupation des sols et les matériaux de construction de la ville ou encore de l'expliquer juste par l'îlot de chaleur de surface (moins de 2 mètres, Masson, 2017). Le relief et les comportements physiques de l'air dûs à la présence d'une forêt ou de la mer modifient aussi l'ICU. Horizontal, vertical l'ICU, possède plusieurs dimensions.

Le cas particulier des villes de montagne

La mise en place d'une inversion thermique, comme par la génération d'une circulation locale, est typique pour les régions montagneuses comme à Grenoble. Des facteurs locaux comme le relief influent sur le mécanisme d'inversion thermique.

Comme en plaine, le développement d'inversion dans une vallée est lié au refroidissement nocturne de la basse couche mais en région montagneuse, l'inversion de basse couche peut être renforcée dans les vallées. Elle peut néanmoins se développer dès la fin d'après-midi selon l'exposition de la vallée au soleil.

Au couchant, la surface se refroidit et la couche d'atmosphère aussi (la couche stable ou CS, qui gagne sur les couches supérieures durant la nuit).

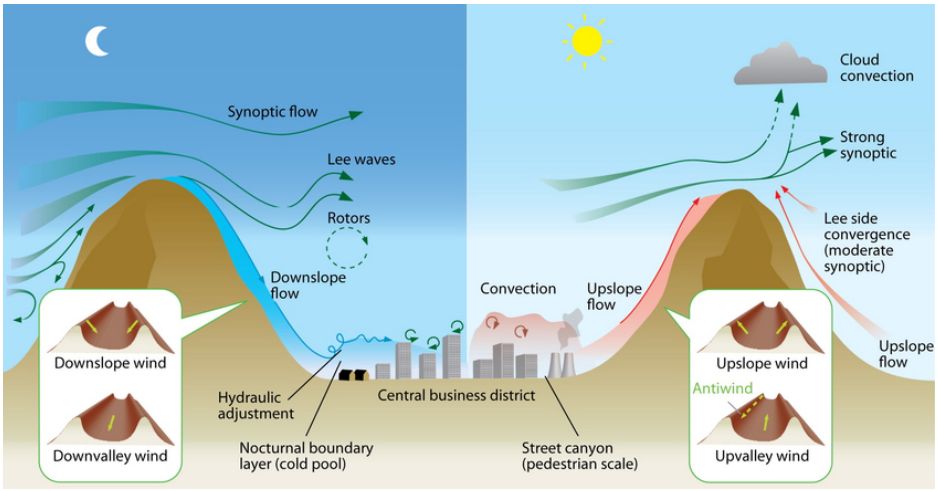
En montagne, la stabilité de la basse couche est renforcée par le vent catabatique (descendant à flanc de montagne) qui apporte de l'air plus froid d'altitude dans le fond de la vallée.

Pendant la nuit, ce vent descendant la pente subit un ajustement, puis, dans la ville, l'influence du canyon urbain, des rues, sur la stratification de cet air stable est encore méconnue.

Au lever du soleil, le sol commence à se réchauffer provoquant alors une convection. Au milieu de la matinée, la convection et le vent anabatique (montant à flanc de montagne) contribuent à la destruction de l'inversion (la couche stable disparaît).

Toutefois, il est difficile de généraliser les interactions entre l'îlot de chaleur urbain et la topographie. Cette dernière, par effet d'abris, peut empêcher l'évacuation de l'air plus chaud des zones urbaines situées à proximité du flanc de montagne ou encore augmenter la température pendant la journée juste par la subsidence d'air dans la vallée.

Les villes en cuvette comme Grenoble subissent l'influence des reliefs renforçant l'ICU.



Source : Fernando, 2010

Dans les villes de plaine, continentales comme Lyon et Saint-Etienne, les écarts de température peuvent varier de 2 °C à 12 °C entre ville et campagne

Les écarts couramment constatés sur la région lyonnaise sont en moyenne plutôt de 5 °C entre le centre de Lyon et les Monts du Lyonnais à 25 km à l'ouest, mais ils peuvent être de 12 °C dans les cas extrêmes observés, comme à Łódz en Pologne (Kłysik and Fortuniak, 1999). Pendant la canicule de 2003, l'intensité moyenne d'ICU de Paris était de l'ordre 2 à 4 °C avec un maximum de 8 °C. Certains chercheurs corrèlent l'intensité de l'ICU au nombre d'habitants, mais c'est un raccourci qui ne tient pas compte des mécanismes physiques. La morphologie urbaine et les matériaux (et le relief bien sûr) détermineraient mieux encore les intensités observées.

Les Monts du Lyonnais ont longtemps été le refuge climatique de la bourgeoisie lyonnaise, qui venaient y chercher un peu de fraîcheur lors des étés chauds.

Propriété Le Razat à Vernaison

Comment l'étudier, avec quels outils et méthodes ?

Depuis le XIX^{e} siècle des méthodes de recherche sur la question de l'ICU ont évolué : des thermomètres jusqu'aux mesures de flux de milieu urbain aux observations d'état de surface par des satellites ou encore le développement des modèles physiques d'atmosphère, l'ensemble des outils ont été mobilisés pour la thèse de J. Diallo Dudek.

La carte des sources de chaleur par le satellite Landsat

Des données de température issues de l'imagerie satellitaire sont un outil intéressant mais qui nécessite une préparation des données et une prudence dans les interprétations. Elles doivent également faire l'objet de corrections atmosphériques.

En effet, les satellites mesurent les ondes qui sont « réflectées » (émises) par l'atmosphère et la surface. La difficulté est de corriger l'effet d'atmosphère pour avoir la température de surface réelle, le rayonnement étant modifié par la présence des gaz atmosphériques (azote, oxygène, vapeur d'eau, ...) et par celle des particules, gouttelettes d'eau, poussières, ... Quand les conditions ne sont pas bonnes, la donnée ne peut être conservée. Pour obtenir une image exploitable, Julita Diallo Dudek s'est attachée à corriger les données. Pour obtenir la réflectance de la surface, elle a supprimé les effets de l'atmosphère.

Exemple de corrections

Pour le 11 avril 2011, la température maximale de surface artificielle aurait atteint 39.9 °C.

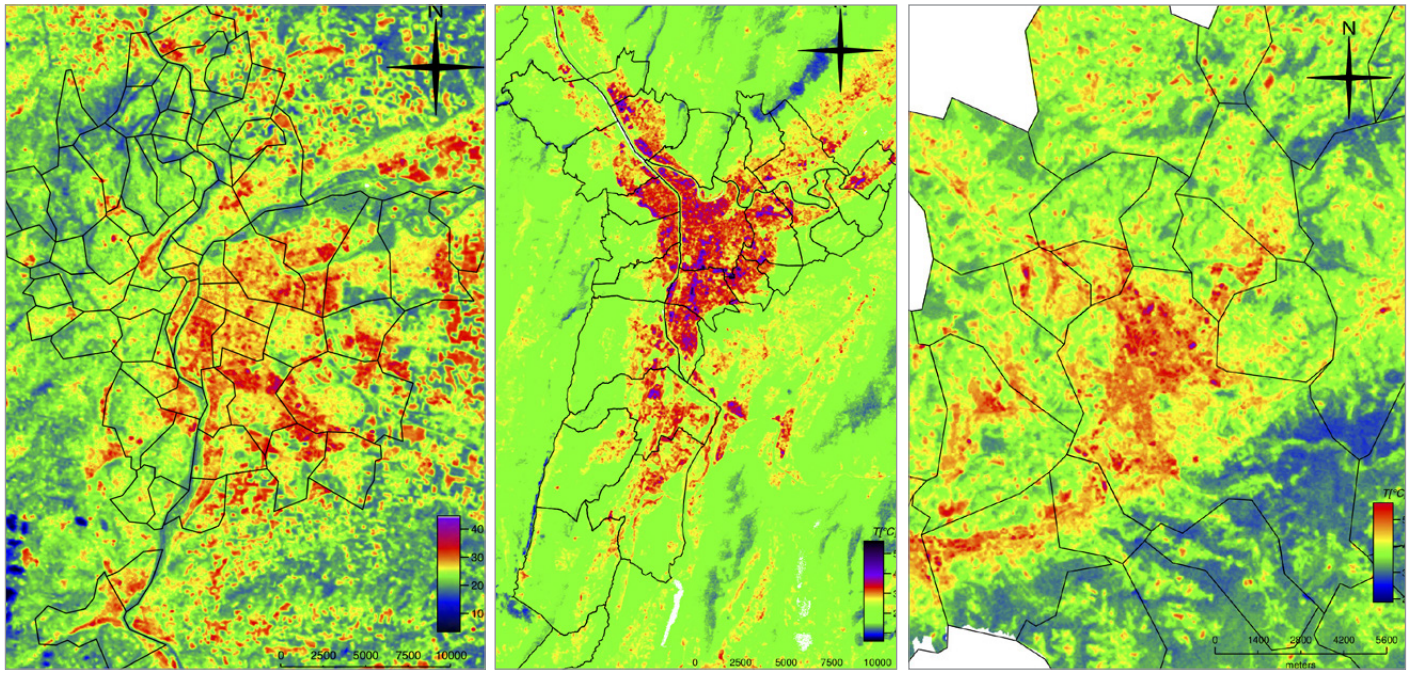
L'ensemble de ces surfaces artificialisées doit être réévalué de 3 à 4 °C par rapport aux données affichées par Landsat.

Dans des zones industrielles et des zones d'activités, l'écart de température peut atteindre 11 °C.

Dans le centre où les pixels sont plutôt de type mixte, les écarts de température varient de 4 à 5 °C.

La température de la végétation en dehors de la ville, comme pour la surface végétale dans le centre-ville, doit être réévaluée de 2 °C.

Température de surface (agglomérations de Lyon, Grenoble et Saint-Etienne)



Source : J. Diallo Dudek

Les images révèlent des secteurs généralement très minéraux qui peuvent appeler une végétalisation ou un changement de matériaux de surface pour limiter la production de chaleur.

Pour cette raison, les cartes Landsat dites des sources de chaleur, ont été proposées sur l'Open Data de la Métropole de Lyon (2011, 2015).

La modélisation est cependant une meilleure solution car les températures de surface ne définissent ni ne localisent l'ICU proprement dit. L'ICU possède plusieurs dimensions et se déplace en fonction des vents. Donc, les zones les plus chaudes de la carte Landsat ne sont pas forcément les zones les plus inconfortables, ni les secteurs sur lesquels il faut agir en priorité.

Pour calculer la température, deux étapes préalables sont nécessaires :

- le calcul de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), pour définir les classes de type de surface à partir de l'infra-rouge,
- le calcul d'émissivité des surfaces, dont l'indice de végétalisation.

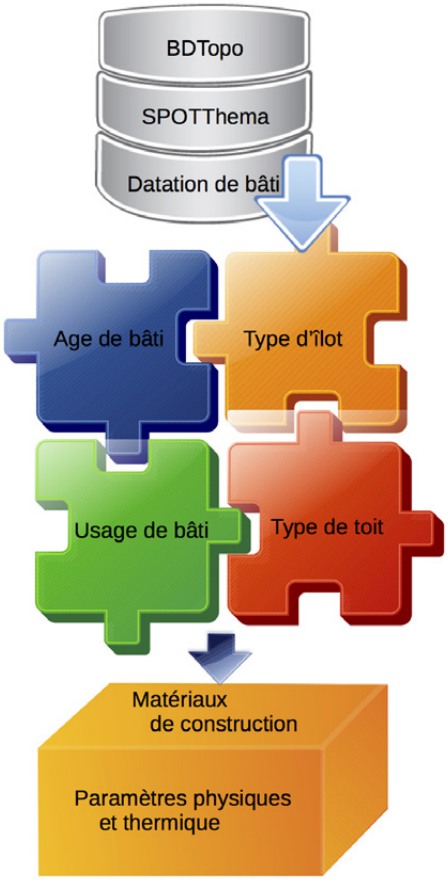
La modélisation permet de mieux cerner l'ICU

Le modèle de méso-échelle (Méso-NH) est le premier modèle utilisé (version MNH-V5-1-3). Il est développé par le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM) et Laboratoire d'Aérologie (LA) et peut être utilisé pour des études de cas réels. Méso-NH est un modèle atmosphérique régional (échelle 10 km à 100 mètres). Pour les spécialistes : http ://Méso-NH.aero.obs-mip.fr/Méso-NH53/BooksAndGuides

Ce modèle simule les processus atmosphériques au-dessus de la surface qui nécessite un couplage avec un modèle de plus grande échelle.

Des données « d'entrée » sont nécessaires au fonctionnement du modèle concernant la nature des surfaces au sol (SURFEX et ECOCLIMAP, base d'occupation des sols, complétée par des bases de données sur l'occupation des sols, utilisées par les agences d'urbanisme, à une résolution plus fine (250 m).

Les paramètres utilisés pour la modélisation

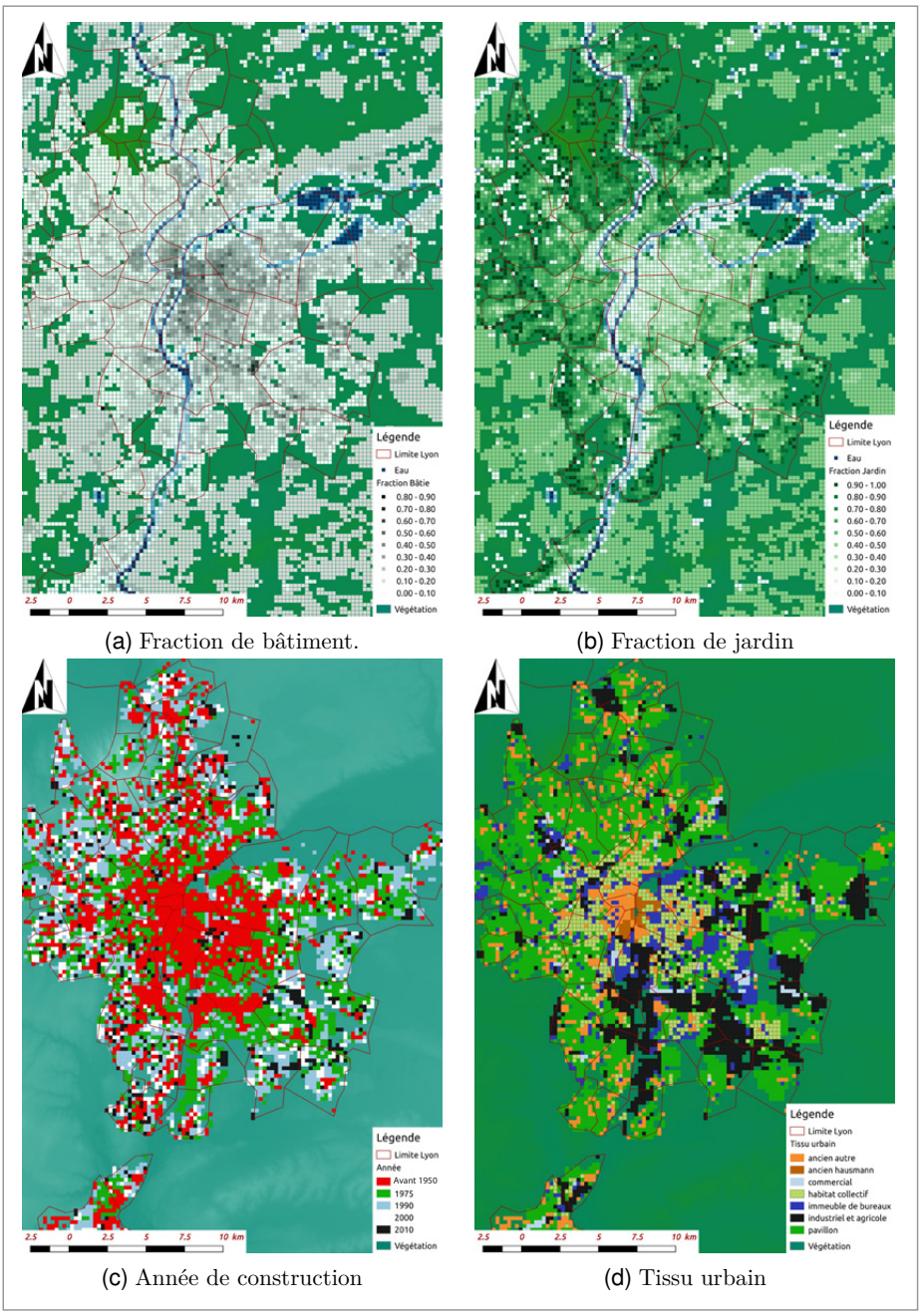


Source : J. Diallo Dudek

Les bases de données utilisées

- Spot thema 2010, base d'occupation des sols, produit par Astrium, images avec une résolution de 2.5m à 20m obtenue par la classification d'images satellitaires SPOT. Cette classification est effectuée à trois échelles : 1/50 000^{e} (8 classes), 1/25 000^{e} (29 classes) et 1/10 000^{e} (46 classes).
- Espaces Végétalisés 2009 (Urbalyon), base de données du Plan Local d'Urbanisme.
- BD topo (routes, bâtiments, orographie mais également végétation etc.).
- Surfaces vertes d'ECOCLIMAP (pour Saint-Etienne et Grenoble)
- Age du bâtiment (1950-2010 pour Lyon, Nicolas Ferran), permettent notamment de relier le bâti aux matériaux de construction utilisés et ainsi de déterminer les paramètres physiques et thermiques de celui-ci.

Les données d'entrées dans le modèle Méso-NH



(a) Fraction de bâtiment.

(b) Fraction de jardin

(c) Année de construction

(d) Tissu urbain

Source : J. Diallo Dudek

Pour modéliser les flux qui proviennent de surfaces urbanisées, SURFEX utilise le schéma de la ville TEB développé par Masson, qui calcule le bilan radiatif de toutes les surfaces urbaines.

Les effets d'ombre des « rues canyons » sont prises en compte. Avec TEB-veg, il est désormais possible d'intégrer le végétal dans le tissu urbain - toitures végétalisées, arbres etc.

La rue Garibaldi réaménagée
Cette artère de Lyon a été végétalisée. Les arbres restituent de l'humidité dans l'air grâce à un arrosage permis par le stockage de l'eau de pluie dans les anciennes trémies. Les voies cyclables et les trottoirs élargis bénéficient de l'ombrage.

Comment se manifeste-t-il dans les agglomérations de Lyon, Saint-Etienne et Grenoble ?

La situation de la canicule de 2012

Sources : Rapport Climat 2012, Météo France

Cette canicule n'a ni une durée ni une intensité très importante. Elle s'inscrit dans le type de canicule moyenne.

Le début de l'été 2012 est très humide et plutôt frais sur toute la France jusqu'au 15 août. Les premières semaines d'août sont caractérisées par le temps orageux en raison de la présence d'air chaud et instable en basses couches, lié au régime de flux de Sud-Ouest. Dans les Alpes, la convection sur le relief donne également quelques averses sur Grenoble mais le ciel reste peu nuageux sur Lyon et la vallée du Rhône. Le vent du Nord est observé dans la vallée, sans rafales importantes.

Du 7 au 14 août 2012 un anticyclone s'installe, avec le flux d'Ouest en altitude et la masse d'air sèche et plus fraiche en basse couche, accompagné par le vent du Nord. Les 16 et 17 août, le passage d'une perturbation orageuse relié au flux de Sud-Ouest avec une goutte froide, provoque la baisse de température et des fortes précipitations avec de la grêle.

Météo-France fait commencer la période de canicule au 15 et indique qu'elle se prolonge jusqu'au 21 août.

Cette période est marquée par trois journées de très forte chaleur (>35 °C) et cinq de forte chaleur (>30 °C). Elle est interrompue le 16 août, au moment du passage d'une perturbation orageuse. Du 19 au 25 août, les valeurs de températures sont de 4 °C à 12.4 °C plus hautes que la normale.

Les valeurs de températures minimales sont pendant toute la période au-dessus de la normale *Tn* = 14.4 °C (sauf le 17 août) et atteignent la valeur maximale de 22.2 °C (le 22 août) c'est-à-dire +7.8 °C que la normale.

A partir du 17 août, une hausse de température est observée, accompagnée au début de cette période encore par un faible vent du Nord, puis du Sud et enfin de Sud-Est. En altitude, une dorsale et en basse couche, un anticyclone provoque l'advection d'une masse d'air très chaude et sèche.

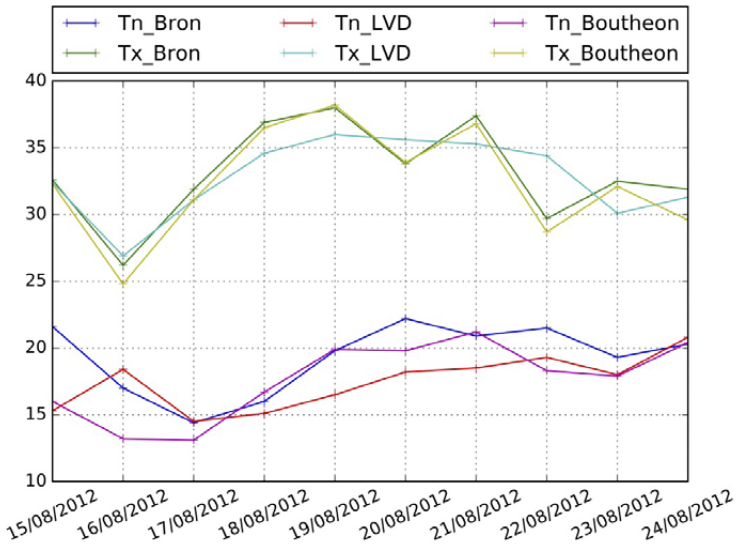
Les six départements de la région sont mis en vigilance canicule. Les températures maximales varient autour de 38 °C. Les minimales oscillent autour de 20 °C, la nuit en montagne.

Le 23, des anomalies d'altitude déstabilisent l'air chaud et la convection se développe fortement en provoquant des orages. A partir du 24 août, le flux de Sud-Ouest cyclonique en altitude, en réagissant avec l'air doux et humide en basse couche, provoque le passage des axes pluvio-instables et une activité orageuse dans la région Rhône-Alpes.

A partir 26 août, la région va être sous l'influence du temps anticyclonique avec vent faible et augmentation de température. Le mois d'août se finit avec une perturbation liée au flux de Sud-Ouest. Un épisode orageux est observé pendant les trois jours suivants et se finit le 31 au moment de l'arrivée de la goutte froide avec la masse d'air froide et humide en basse couche.

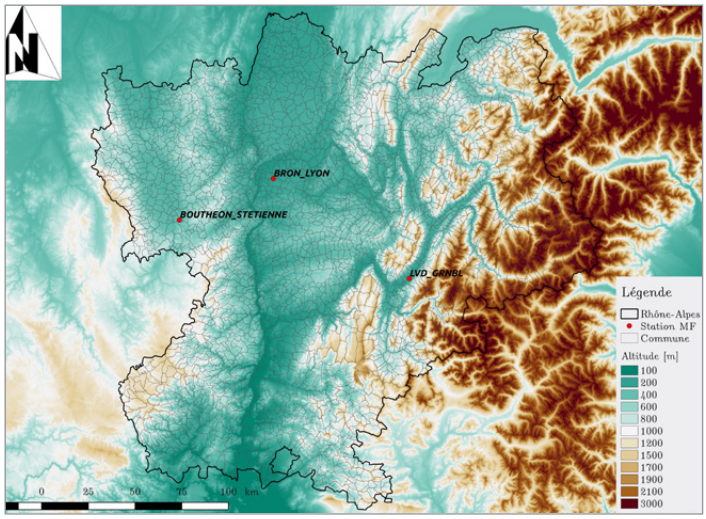
L'installation de la canicule dans la région Rhône-Alpes est observée sur les trois stations principales de Météo-France : Bron pour Lyon, Bouthéon pour Saint-Etienne et Le Versoud pour Grenoble.

Les températures du 15 au 24 août 2012
sur les trois stations de Météo-France

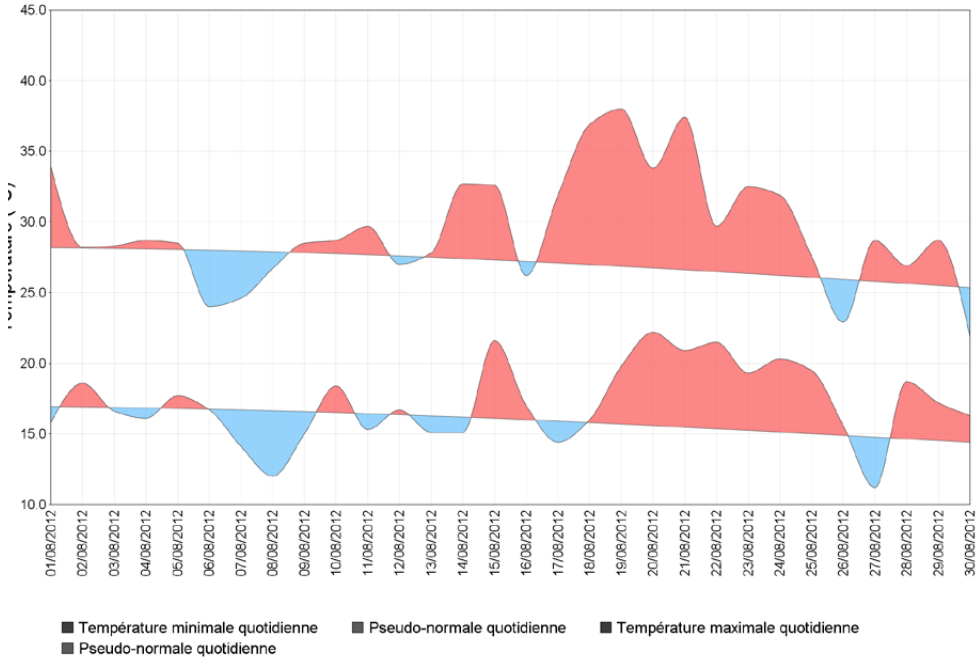


Source : J. Diallo Dudek

Les trois stations principales de Météo-France
Lyon Bron, Saint-Etienne Bouthéon et Lyon Le Versoud (LVD)



Indicateurs thermiques des températures minimales et maximales
pour le mois d'août 2012 pour la région Rhône- Alpes



Source : Météo-France

Lyon

Spécificités géographiques influençant le modèle climat

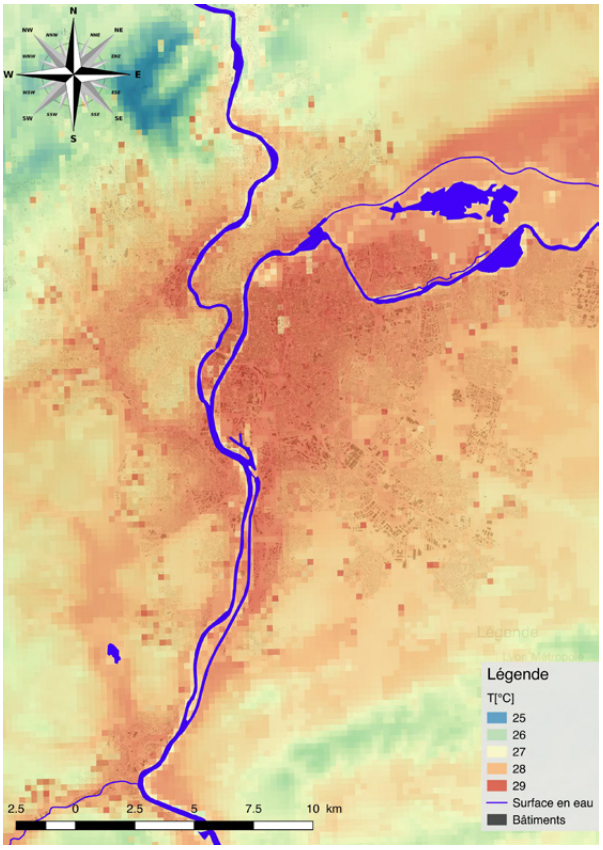
L'agglomération lyonnaise se situe dans l'axe de la vallée du Rhône et de la Saône et sur la plaine de l'Est lyonnais. L'extrémité nord de l'agglomération suit le cours de la Saône. Le relief est plus marqué à l'ouest de ce couloir (Nord-Ouest de la carte), secteur plus boisé également. L'altitude minimale (162m) se trouve dans la partie basse de la vallée du Rhône et la maximale (Mont Verdun 625m) au nord de l'agglomération sur le sommet le plus haut des Monts d'Or. Au Sud, le Rhône coupe les contreforts du Pilat (Givors au Sud-Ouest).

Les stations météo disponibles pour la prise de mesure

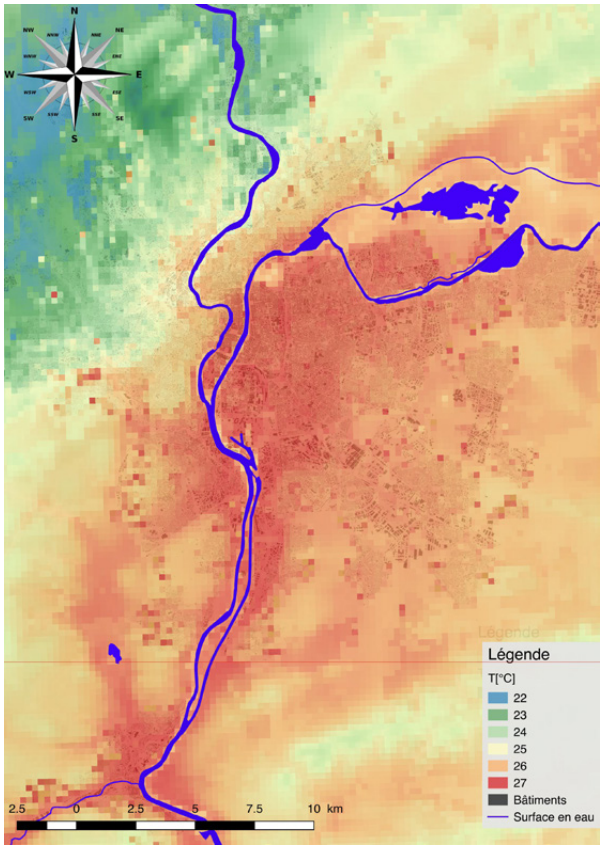
Lyon manque d'équipements de mesures de températures bien réparties sur la ville. La Métropole de Lyon a aidé la chercheuse à accéder non seulement aux stations de Météo France (Bron) mais aussi à des stations techniques comme celles de l'ENS de Lyon et du lycée à Saint-Genis-Laval. Les stations Ecole normale supérieure et Tête d'Or se trouvent à la même altitude (autour de 170m), dans l'axe de la vallée du Rhône. Plus au sud, sur le Monts du lyonnais se trouve la station Saint-Genis-Laval (285m). La partie Est de l'agglomération est représentée par deux stations : Bron (198m) et Saint-Exupéry (237m) située à l'extérieur de la métropole.

Température de l'air à 2m dans l'agglomération lyonnaise dans la nuit du 23 au 24 août 2012
(résultats de modélisation)

de 22h à 1h du matin



de 2h à 5h du matin



La campagne se refroidit plus vite que la ville ; les Monts d'Or, l'Ouest et le Val de Saône en premier.

NB : les pixels rouges isolés sont des erreurs issues du modèle climat

Dans l'agglomération lyonnaise la nuit du 23 août 2012 a été étudiée par le modèle. A deux heures d'intervalle, on perçoit bien l'évolution de l'îlot de chaleur urbain. Le rafraichissement se fait plus vite par les zones de relief les moins densément urbanisées de l'Ouest lyonnais. Mais l'Est lyonnais et le Rhône Amont restent aussi chauds que le Centre jusqu'à une heure avancée de la nuit.

La température minimale de cette nuit du 23 août ne dépasse pas les 19.5 °C sur les stations Bron, Tête d'Or et Lyon ENS. Le 23 août en journée, la température maximale dépasse les 33 °C sur les stations à Lyon, 32 °C à Bron et Saint-Genis-Laval et 31 °C à Saint-Exupéry.

Observation 1

Les périphéries de l'Est lyonnais peuvent être plus chaudes que le Centre.

Cette nuit du 23 août avait été précédée du 18 au 20 août par une hausse rapide de température (37 °C mesurées sur les stations météo de Lyon). La station de mesure de l'aéroport Saint-Exupéry enregistre la température la plus élevée de la région, plus chaude de 4°C que les stations météo du centre de Lyon (Lyon ENS, Bron et Tête d'Or).

En revanche le 19 août, il fait entre 37.1 °C à Saint-Exupéry et 39 °C à la station Tête d'Or (10.8 °C au-dessus de la normale saisonnière). S'en suit une période d'unification des valeurs de température minimale sur les stations Bron, Tête d'Or et Saint-Genis-Laval (l'écart entre ces stations est 0.7 °C) mais Saint-Exupéry reste « bouillante ». Après une journée très chaude le 18 août, la température minimale nocturne augmente considérablement. Les valeurs de températures de nuit augmentent entre 1 °C et 3.8 °C sur les stations ENS, Saint-Genis-Laval et Bron. La valeur maximale de la nuit du 19 août est de 24.3 °C pour la station Saint-Exupéry.

L'explication ? Dans l'Est lyonnais, la chaleur monte vite en début de période caniculaire. La plaine est reliée aux flux chauds Est-Sud ou Sud-Est et se réchauffe rapidement.

Observation 2

Il est donc difficile, en s'appuyant juste sur des analyses de données existantes, de relier des valeurs de l'ICU avec l'urbanisation dense. Vents et topographie influent fortement.

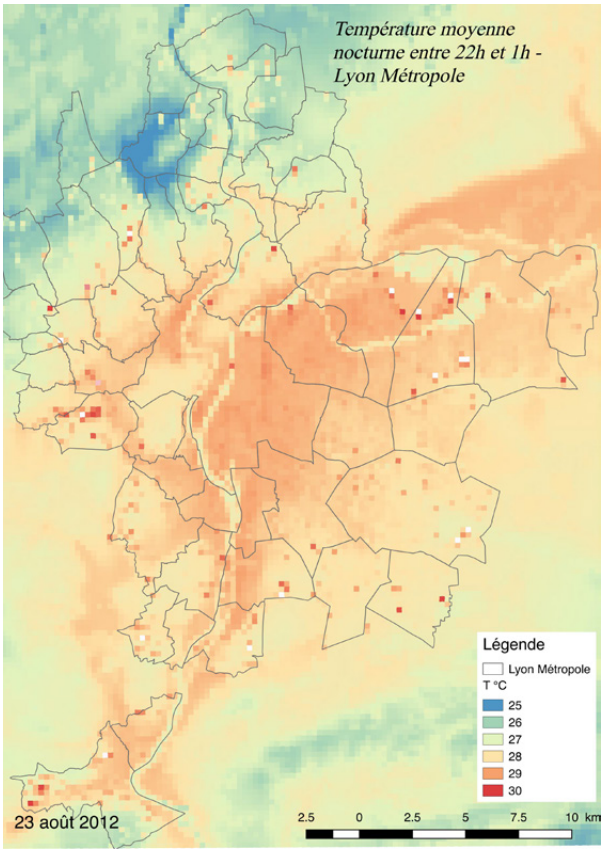
Ici, l'influence de l'altitude de la prise de température est déterminante.

En analysant des relevés de températures dans la métropole lyonnaise, on remarque que des valeurs de températures de nuit les moins élevées se situent dans l'axe de vallées du Rhône, surtout la station de ENS dans le quartier de Gerland identifié comme l'un des plus radiatifs par les cartes Landsat. C'est contre-intuitif, c'est la station la plus urbaine.

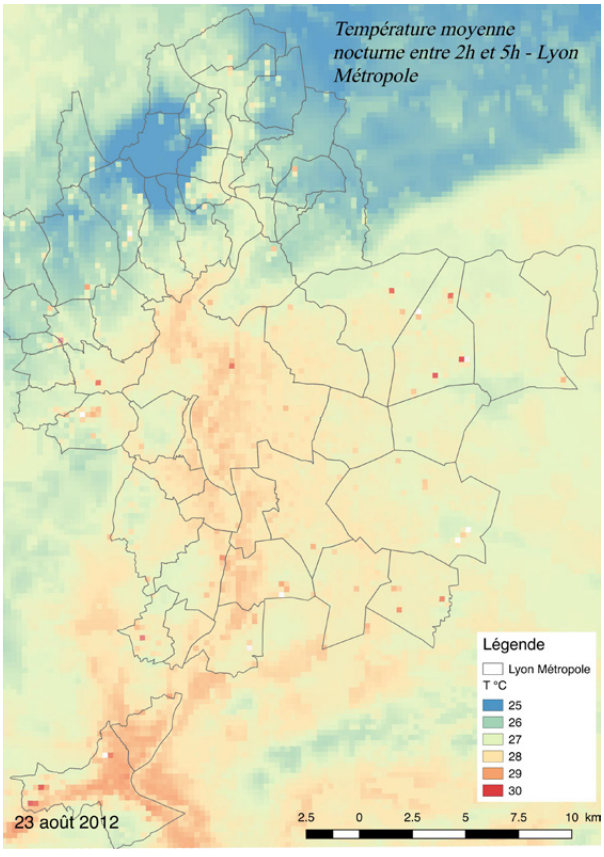
L'explication ? C'est aussi la station la plus basse en altitude. En début de canicule, du fait de la descente des masses d'air plus frais air plus dense) qui provoque la formation de l'inversion thermique, les températures les plus fraiches sont sur les lieux les plus bas de la ville.

Le « film » de la nuit du 23 au 24 août 2012 dans la métropole de Lyon (résultats de modélisation)

Température moyenne nocturne entre 22h et 1h



Température moyenne nocturne entre 2h et 5h



Saint-Etienne

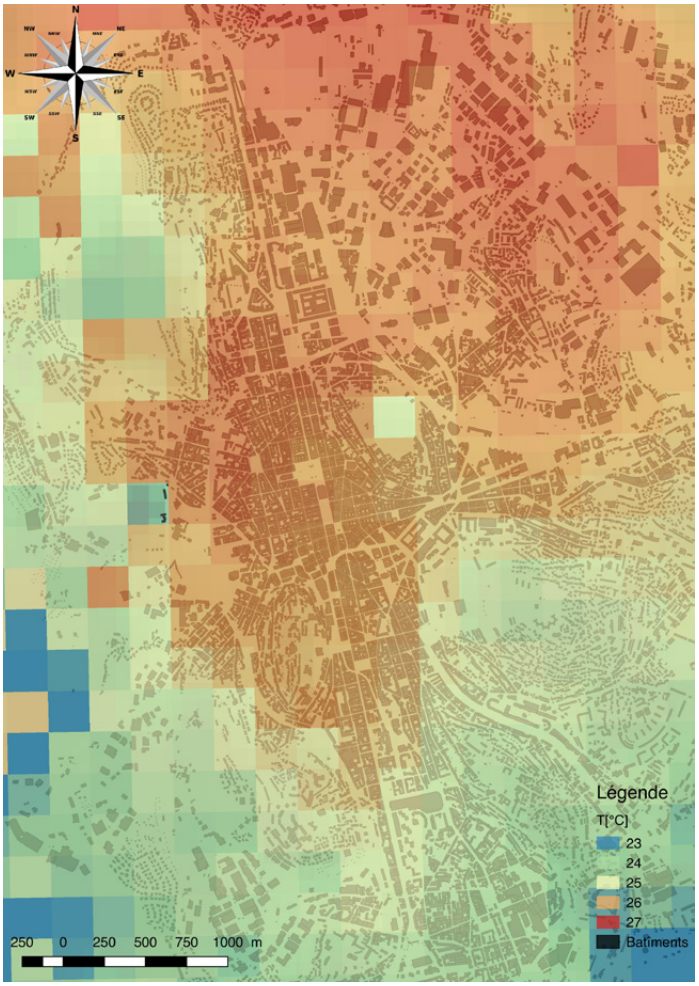
Spécificités géographiques influençant le modèle climat

La ville de Saint-Etienne se situe à proximité de la ligne de partage des eaux entre les fleuves Rhône et Loire. Elle se démarque par la présence de 7 collines rangées côte à côte et des vallées intramuros qui en découlent. Le centre-ville est dans une vallée peu profonde (dénivelé de 200m), parcourue par la rivière du Furan, recouverte sur l'ensemble de la partie urbaine. La Métropole de Saint-Etienne se caractérise aussi par la présence d'un fort dénivelé, avec une altitude allant de 422 m à 1 117 m.

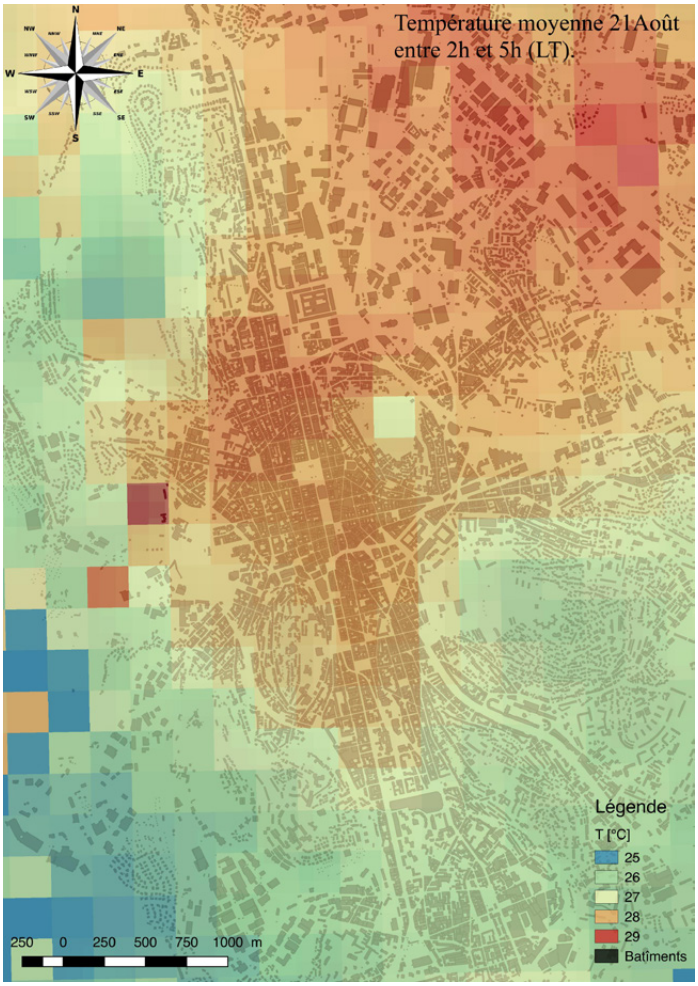
La modélisation de l'Ilot de Chaleur Urbain sur Saint-Etienne a été étudié la nuit du 20 au 21 Août 2012. Deux périodes de temps ont été analysées : les températures moyennes entre 22h et 1h et entre 2h et 5h. Sur cette période, la température maximale a été mesurée à 26,5°C sur près de la moitié des stations urbaines à 22h et la température minimale a été de 20,5°C à 5h.

Température moyenne dans l'agglomération stéphanoise dans la nuit du 20 au 21 août 2012

entre 22h et 1h (LT)



entre 2h et 5h (LT)



Observation 1 :
L'ICU est plus fort dans le secteur Nord de la ville de Saint-Etienne

La modélisation de l'ICU sur Saint-Etienne dans la nuit du 20 au 21 août montre des températures qui diminuent plus rapidement dans le Sud que dans le Nord de la ville. Cette dynamique s'explique par plusieurs phénomènes : la présence d'un vent dominant Sud et une altitude plus importante.

Aussi, le secteur Nord de la ville de Saint-Etienne est marqué par la présence de zones d'activités qui ont tendance à accumuler de la chaleur. On peut émettre l'hypothèse qu'ils continuent à diffuser de la chaleur la nuit de façon plus importante que dans les zones urbaines denses.

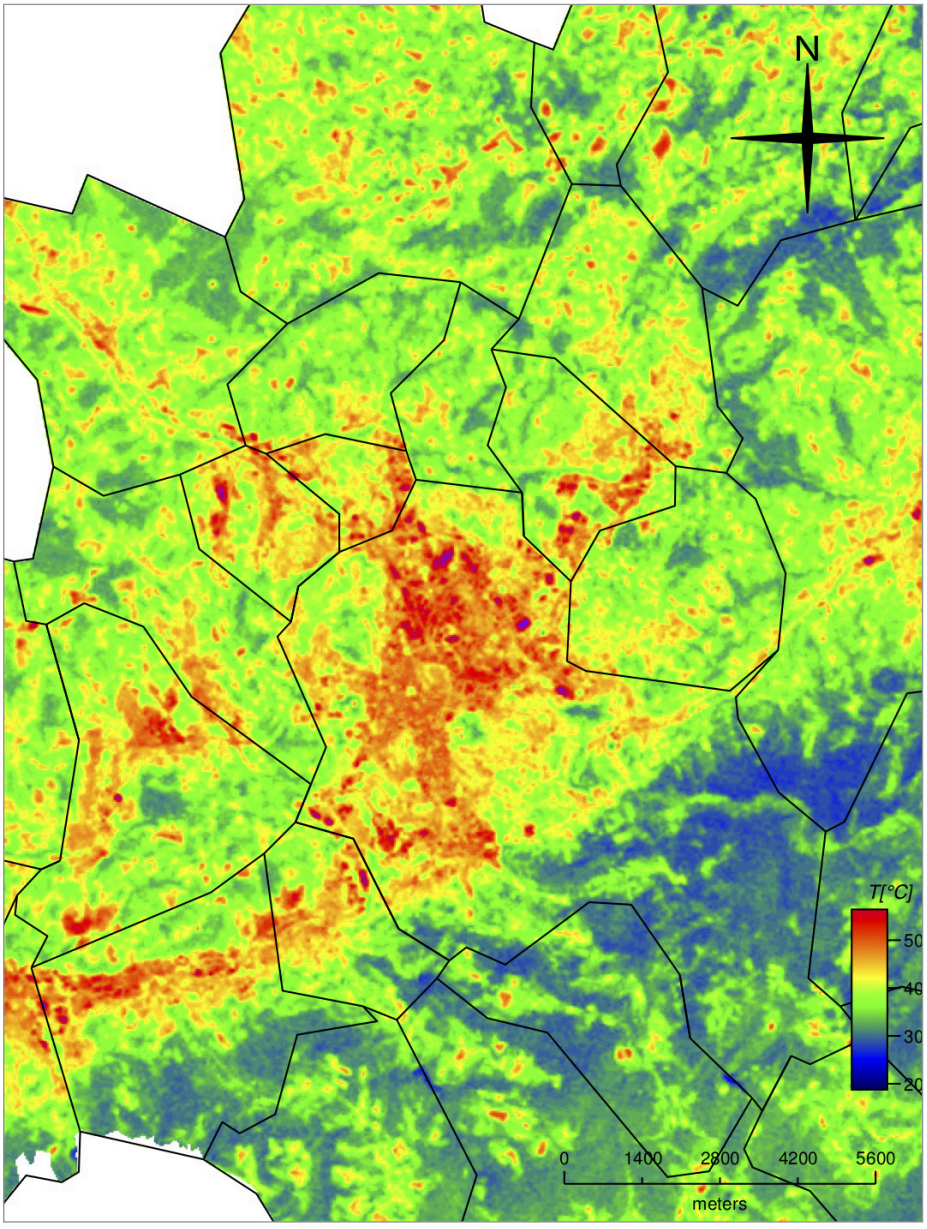
Observation 2 :
Un effet marqué de collines végétales de Saint-Etienne

La modélisation de l'îlot de chaleur urbain sur la ville de Saint-Etienne fait apparaître clairement l'effet des collines, qui jouent le rôle d'îlots de fraîcheur. Plusieurs facteurs concomitants contribuent à ce phénomène : la présence de la végétation, l'altitude et la ventilation de ces secteurs.

Observation 3 :
La ventilation des espaces publics, un facteur déterminant dans le rafraichissement nocturne en période de canicule

Les mesures de température effectuées durant la période de la canicule de 2012 ont été réalisées sur différents profils d'espace public, notamment des espaces bénéficiant d'un important couvert végétal et d'autres plus minéraux. Les résultats montrent qu'en période de canicule, la végétation joue peu, voire ne joue plus son rôle rafraichissant car le manque d'eau bloque sa capacité d'évapotranspiration. Dans ces périodes particulières, c'est plus la ventilation des espaces publics qui agira sur les températures nocturnes.

Température de surface (agglomération de Saint-Etienne, 26 juin 2001)



Grenoble

Quelles stations de mesure mobilisées ?

Successivement implantée sur l'ancien aérodrome d'Eybens et sur le domaine universitaire de Saint-Martin-d'Hères, la station automatique de mesure de Météo France est aujourd'hui localisée sur l'aérodrome du Versoud (en dehors des limites administratives de la métropole). Bien que son contexte soit très différent de celui de la ville-centre, elle est utilisée pour décrire le climat grenoblois.

Pour compléter les observations d'évolution de températures, la chercheuse a utilisé une station située sur la Presqu'île scientifique (propriété du CEA), ainsi que des stations d'altitude de Météo-France (Villard-de-Lans à 1027 m, Le Gua à 1970 m pour le massif du Vercors, et Saint-Hilaire à 1630 m pour la Chartreuse) ainsi que deux stations d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes localisées en milieu urbain (Le Rondeau, Les Frênes).

Une géographie spécifique et un climat atypique

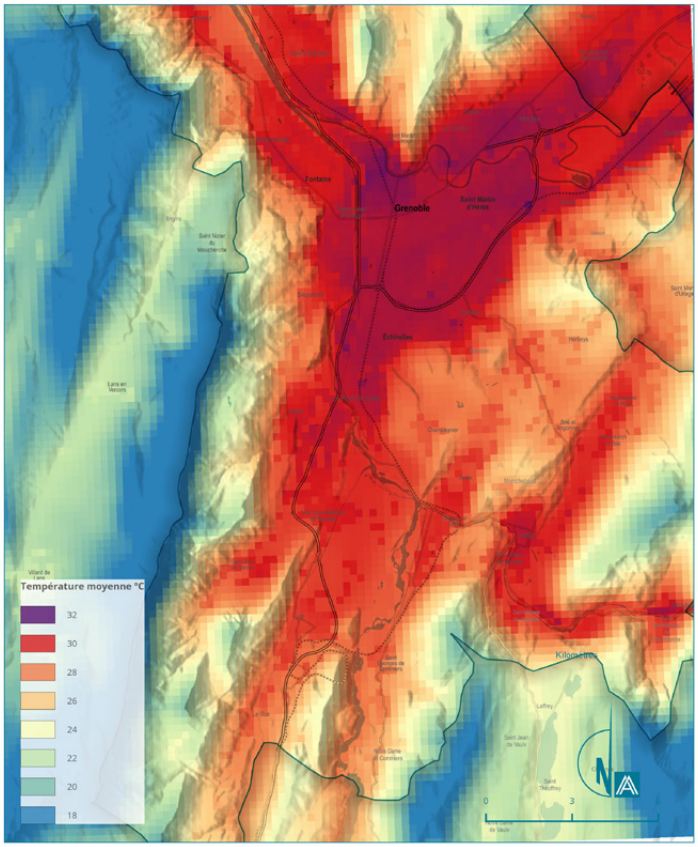
Encadré par les trois massifs alpins de Belledonne, Chartreuse et Vercors, le territoire de Grenoble-Alpes-Métropole est traversé par deux cours d'eau principaux : le Drac et l'Isère. La zone dense urbaine se développe sur 100 km², essentiellement en fond de vallée, entre 200 et 250 m d'altitude. La présence de la forêt (55 % du territoire) est importante, mais elle est située en périphérie de la métropole sur les contreforts des massifs. À ce contexte montagnard s'ajoute un climat soumis aux influences océaniques, continentales et méditerranéennes, se traduisant par d'importantes amplitudes thermiques, un nombre d'heures d'ensoleillement important (> 2100h), des précipitations supérieures à 800 mm/an et des phénomènes spécifiques comme le foehn ou les inversions thermiques…

Les premiers constats issus de mesures au niveau des stations météo du territoire

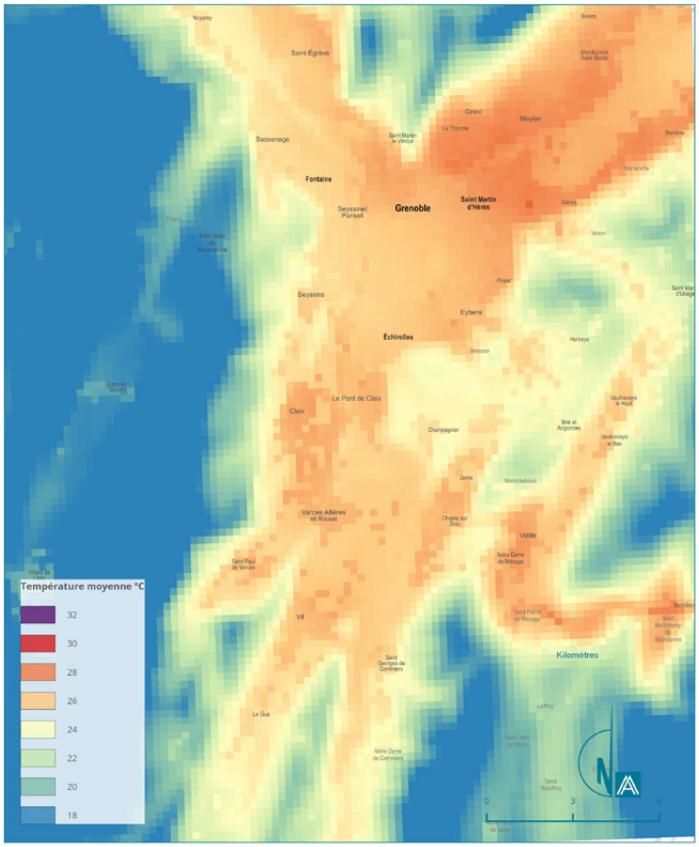
Durant la période de canicule étudiée (du 17 au 26 août 2012), les mesures (cf. fig. et explicatif ci-dessous dans l'encart sur les stations de mesure) ont mis en évidence des différences de températures notables entre milieu rural et urbain, ainsi qu'entre vallée et montagne. Les écarts de température peuvent atteindre jusque 5°C, alors que la situation de canicule est considérée comme moyenne. Ces écarts sont particulièrement marqués durant la nuit caractérisant bien le phénomène d'ICU. En début de canicule, le refroidissement est plus rapide en milieu rural qu'en milieu urbain.

Température de l'air à 2m dans la métropole de Grenoble dans la nuit du 23 au 24 août 2012
(résultats de modélisation d'après Julita Dudek)

entre 20h et 23h *(image 1)*



entre 0h et 3h *(image 2)*



En milieu de canicule, lorsque les conditions atmosphériques sont neutres météorologiquement (gradient de température pratiquement nul, sans turbulence), les écarts de températures sont plus faibles entre le jour et la nuit, la ville et la campagne et identique entre la campagne et la montagne. À la fin de la canicule, l'état de l'atmosphère devient instable, la vitesse du vent augmente et l'on observe une diminution rapide de la température tout d'abord en altitude puis à la campagne et à la ville.

Les variations de température ne dépendent pas uniquement de la nature de l'occupation du sol mais sont également liées au phénomène de ventilation (circulation locale de l'air)

L'étude du cycle horaire des vents sur différentes stations de mesure est riche d'enseignements. Selon les vallées, différentes directions, fréquences et vitesses du vent sont en effet observées, en lien avec l'effet de canalisation et l'orientation de ces vallées. À ce phénomène local s'ajoute la configuration urbaine de la ville influençant la dynamique d'évolution des températures (cf. image 1). Les stations de mesure mettent en évidence le rôle de la circulation locale de l'air par « l'advection[1] de l'air plus chaud du centre-ville en provenance du sud-est et des écoulements de l'air plus froid de direction nord-est dans la vallée du Grésivaudan » (Dudek J., 2019).

Sur l'image 1, la modélisation correspondant à la moyenne des températures (à 2m) entre 20h et 23h permet d'appréhender la problématique des ICU en milieu urbain. Les températures moyennes supérieures à 28°C sont concentrées dans les zones les plus denses du cœur de la métropole (les plus minérales). Cette répartition des températures semble plutôt homogène et il est difficile de distinguer des variations (de l'ordre de 2°C) au sein de la zone urbaine. Quelques secteurs se distinguent tout de même avec des température moyennes de plus de 30 degrés (Grenoble, Sassenage, Échirolles, Pont de Claix, Saint-Martin d'Hères, Meylan).

Dans les milieux moins denses (moins minéraux), comme au Sud de la métropole et sur le plateau de Champagnier, les températures moyennes sont moins élevées que dans le cœur de la métropole, mettant en évidence le rôle de l'occupation du sol.

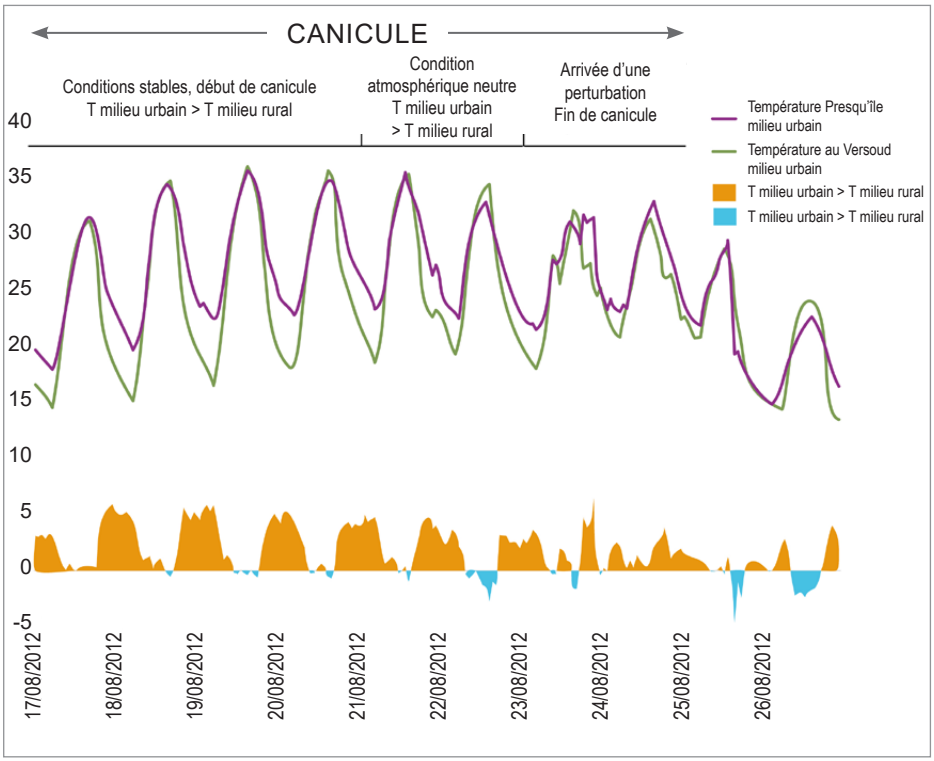
Lorsque les vents ne sont pas assez forts pour disperser la chaleur, des phénomènes de déplacements de masses d'air plus chauds sont observés

L'image 2 permet d'observer une situation illustrant le rôle particulier des vents dans la ville.

La modélisation entre minuit et 3 heures du matin met en évidence des températures moyennes plus élevées sur Meylan, la Tronche et sur Saint-Martin-d'Hères. L'explication retenue est que la faible vitesse du vent enregistrée (inf. 5m/s) est responsable d'un déplacement des masses d'air et de concentrations sur ces secteurs. Ces communes sont également exposées plus longuement au rayonnement solaire, notamment Meylan avec des versants exposés au sud. Cette situation est bien décrite par Monin M. (1962) : *« Ainsi à La Tronche, commune limitrophe au N.-E. de Grenoble, n'ayant pratiquement pas de brise, le brouillard est plus rare qu'à l'aérodrome ; le climat est relativement si clément que le lieu-dit "Montfleury" est appelé "Le petit Nice de Grenoble"»*[2].

De nombreux paramètres influent sur les conditions thermiques dans l'agglomération grenobloise : relief, orientations des vallées, vents, occupation du sol, configuration urbaine... Ceux-ci rendent complexes les interprétations de variations de températures mises en évidence par les stations de mesures et la modélisation. Cependant, ces résultats montrent que les phénomènes d'ICU sont clairement présents en zone urbaine dense et que le refroidissement de la ville est difficile tant qu'une perturbation météorologique ne change pas la situation.

Températures lors de la période de canicule (d'après Julita Dudek)



1. Dans notre cas, l'advection est le transport d'une quantité de chaleur à la vitesse du milieu environnant.

2. Monin M. Vents locaux et vents généraux dans la région de Grenoble. In: Revue de géographie alpine, tome 50, n°1, 1962. pp. 37-58;doi : https://doi.org/10.3406/rga.1962.1019https://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_1962_num_50_1

Conclusion

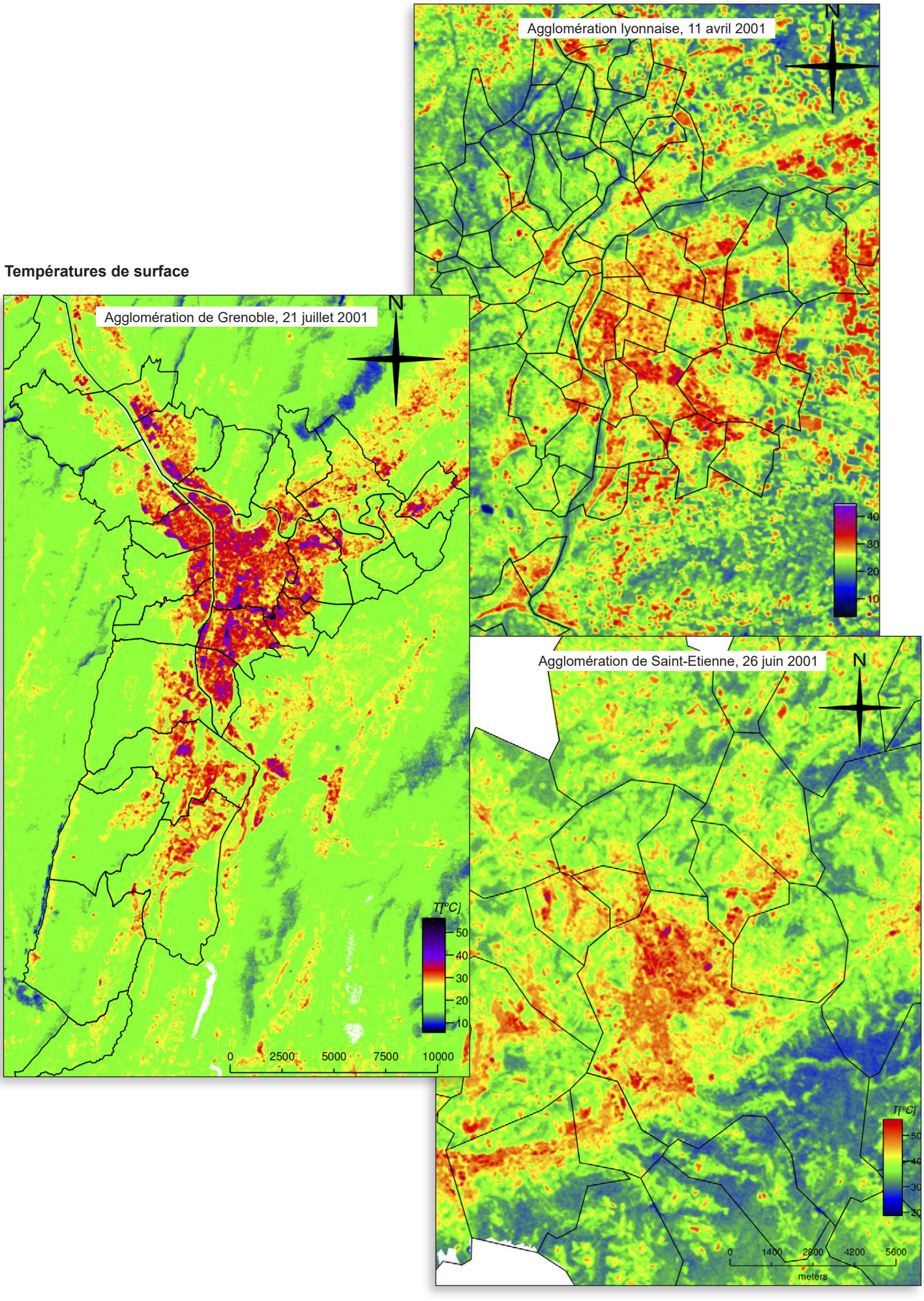
L'ICU est une notion que les aménageurs ont pris l'habitude de traiter à partir des cartes de températures au sol. L'action consiste ensuite au mieux à « éteindre » les principaux lieux d'inconforts thermiques en ville par des matériaux plus clairs, une dés-imperméabilisation des sols et plus de plantations.

Le travail de Julita Diallo-Dudek apporte une confirmation du rôle de ces facteurs et encourage des politiques publiques ambitieuses sur ces mesures d'adaptation.

Mais, il apporte aussi une vision dynamique de l'ICU, permet de mieux comprendre les phénomènes physiques complexes à l'œuvre, intègre la troisième dimension par la compréhension des mouvements aérologiques dans les premières couches de l'atmosphère urbain. Dans l'installation de l'ICU, la morphologie de la ville (Lyon dans le couloir rhodanien, Saint-Etienne adossée aux reliefs et Grenoble aux pieds des montagnes) joue un rôle déterminant. Les résultats de modélisation donnent à voir des phénomènes très différenciés à la grande échelle entre la ville et les campagnes environnantes.

La force physique de ce phénomène climatique interpelle nos stratégies urbaines qui doivent non seulement intégrer les solutions déjà mobilisées, avec le végétal notamment, mais également, l'appréhender plus largement dans une stratégie résiliente d'adaptation de toutes les fonctions urbaines au bouleversement de nos climats et ceci à toutes les échelles : de la protection du logement privé à l'accessibilité des « oasis de fraîcheur » des parcs publics, du centre-ville arborés aux potentiels « refuges climatiques » de la grande périphérie.

Températures de surface



Quelques définitions

Advection : déplacement d'une masse d'air dans le sens horizontal

Albédo : fraction de la lumière que réfléchit ou diffuse un corps non lumineux. Un corps noir possède un albédo nul

Anticyclone : centre de hautes pressions atmosphériques (opposé à dépression).

Canicule : épisode de températures élevées, de jour comme de nuit, sur une période prolongée (plus de trois jours).

Convection : mouvement vertical de l'air, ascendant ou descendant, par opposition à l'advection, qui désigne les mouvements horizontaux. Transfert de chaleur accompagné d'un transport de matière à l'état de fluide.

Inversion thermique : transport de chaleur dans un fluide, par déplacement de molécules. Une couche d'inversion est une couche d'air dont le gradient de température est positif, c'est-à-dire que celle-ci croît avec l'altitude. Dans la troposphère, la température de l'air diminue normalement avec l'altitude, d'environ 6,5 °C par 1 000 m.

Ilot de chaleur urbain (ICU) : élévations localisées des températures, particulièrement des températures maximales diurnes et nocturnes, enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales ou forestières voisines ou par rapport aux températures moyennes régionales.

Ilot de chaleur urbain de surface (ICUS) : îlot de chaleur urbain à l'échelle du quartier

Troposphère : couche atmosphérique comprise entre la surface du globe terrestre et la stratosphère. Sa limite supérieure, la tropopause, se situe à une altitude d'environ 8 à 15 kilomètres selon la latitude et la saison.