



**Lucille Alonso**

## **Caractérisation des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains lyonnais à l'aide de mesures satellitaires, mobiles et participatives**

---

ALONSO Lucille. *Caractérisation des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains lyonnais à l'aide de mesures satellitaires, mobiles et participatives*, sous la direction de Florent Renard (EVS), Frédéric Kuznik (CETHIL) et Luce Ponsar (Métropole de Lyon). - Lyon : Université Jean Moulin (Lyon 3), 2017.  
Mémoire soutenu le 16/06/2017.

---



Document diffusé sous le contrat Creative Commons « Paternité – pas d'utilisation commerciale - pas de modification » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

***Caractérisation des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains  
lyonnais à l'aide de mesures satellitaires, mobiles et  
participatives***

***Lucille Alonso***

**Master 2 Gestion de l'environnement - mention Géosystèmes environnementaux**

***Piloté par : M. Florent Renard (EVS), M. Frédéric Kuznik (CETHIL) et Mme Luce Ponsar (Métropole  
de Lyon)***

***Membres du jury :***

***Jacques Comby (Pr)***

***Dominique Dumas (Pr)***

***Florent Renard (MCF)***



# Remerciements

Avant de débiter ce mémoire, je tiens à remercier le Laboratoire d'Excellence Intelligence des Mondes Urbain (IMU) pour m'avoir permis d'effectuer ce stage dans de bonnes conditions.

Je remercie plus particulièrement Monsieur Florent Renard pour m'avoir accordé ce stage. Cette expérience a été pour moi très formatrice et la confiance qu'il m'a accordée très motivante. Je le remercie également de m'avoir permis de travailler en autonomie et d'accueillir mes réalisations avec intérêt.

Enfin, ma reconnaissance se porte aussi envers Monsieur Comby, Président de l'Université Jean Moulin Lyon 3, et Monsieur Dumas, pour avoir accepté de participer à mon jury de Master 2.



Remerciements .....	3
Sommaire .....	5
Introduction à la connaissance des îlots de chaleur urbains : une nécessité pour le territoire lyonnais .....	8
Partie 1. L'îlot de chaleur urbain dans le cadre du changement climatique : enjeux et impacts sur les espaces urbains .....	11
1.1 L'îlot de chaleur urbain : un microclimat naissant au cœur des villes et particulièrement chaud. 11	
1.1.1 Changement climatique global .....	11
1.1.2 Période de canicule et effet sur la population .....	12
1.1.3 Les sociétés et leur climat urbain : la formation des Ilots de Chaleur Urbains (ICU) .....	17
1.2 Est-il possible de quantifier et spatialiser l'ICU ? .....	21
1.2.1 A l'aide de mesures de température de surface : satellitaire et locale .....	21
1.2.2 A l'aide de mesures de la température de l'air .....	25
1.2.3 Le recours à la science participative : entre une ouverture au public et une production de données scientifiques.....	27
1.3 Caractérisation de l'ICU par la prise en compte des différents types de situation atmosphériques et par modélisation .....	33
1.3.1 Les facteurs d'observation du ciel influençant l'intensité des ICU .....	33
1.3.2 Les principes de la modélisation numérique .....	34
Partie 2 : Des méthodes complémentaires de traitement des températures de surface et d'air pour la caractérisation des ICU.....	36
2.1. Mesure des températures de surface par télédétection et mesures locales .....	36
2.2 Mesure de la température de l'air par mesures mobiles.....	42
2.3 Mesure de la température de l'air par participation citoyenne .....	45
2.4 L'interprétation des données à l'aide d'interpolation spatiale et de traitements statistiques ..	48

2.4.1 Méthodes d'interpolation spatiale de la température et de l'humidité relative.....	48
2.4.2. La régression linéaire entre les différentes méthodes d'appropriation des températures de surface et celles de l'air.....	53
Partie 3 : Des résultats prometteurs liées à l'utilisation de méthodes complémentaires.....	54
3.1. Des dynamiques thermiques journalières, diurnes et nocturnes misent en évidence à l'aide de techniques supplétives.....	54
3.1.1. La mise en évidence de variations de température de surface remarquables.....	54
3.1.2. Les campagnes de mesure en vélo révèlent de fortes variations de température de l'air.	73
3.2. Les campagnes participatives confirment les précédents résultats .....	76
3.2.1 La campagne de mesure de températures du 13 avril 2017.....	76
3.2.2 La campagne de mesure de températures du 29 mai 2017.....	81
3.3. Confrontation des températures de surface et du sol à l'aide des différents moyens d'acquisition : des résultats encourageants à conforter.....	85
3.3.1 Relation entre températures de surface de Landsat 8 et HVAC + .....	86
3.3.2 Relation entre températures de surface de Landsat 8 et températures de l'air .....	86
3.3.3 Relation entre températures de surface relevées par le HVAC+ et températures de l'air ..	86
Conclusion : des résultats complémentaires prometteurs à approfondir dans le cadre de mon doctorat.....	88
Bibliographie.....	90
Liste des figures.....	100
Liste des tableaux .....	104
Liste des abréviations .....	105
Annexes .....	106
Annexe 1 : Répartition des données issues de passage de jours sans nuages du satellite Landsat 5, 7 ( <i>on</i> et <i>off</i> ) et 8.....	106
Annexe 2-a: Flyer de programmation du village éphémère All Terre Nativ' (recto).....	108
Annexe 2-b: Flyer de programmation du village éphémère All Terre Nativ' (verso) .....	109
Annexe 3: Carte mentale thermique collective réalisée lors du village éphémère All Terre Nativ' .....	110
Table des matières .....	111



# Introduction à la connaissance des îlots de chaleur urbains : une nécessité pour le territoire lyonnais

« L'actualité place l'environnement au cœur des discours et des inquiétudes, comme si le sujet naissait subitement d'une prise de conscience tardive, quand, en vérité, il appartient pleinement à la conscience collective depuis bien des générations » (Proglio, 2007). Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) n'échappe pas à cette règle. En effet, Guy de Maupassant le décrivait dès 1885 dans *Bel-Ami* : « ils prirent un fiacre découvert, gagnèrent les Champs-Élysées, puis l'avenue du Bois de Boulogne », c'était déjà « une nuit sans vent, une de ces nuits d'étuve où l'air de Paris surchauffé entre dans la poitrine comme une vapeur de four ». Et c'est dès le 19<sup>ème</sup> siècle que cet îlot de chaleur a été mis en évidence par Luke Howard, pharmacien britannique, qui, en 1818, a publié un ouvrage intitulé « Le climat de Londres ». Durant son étude de 9 ans, il a montré une différence des températures nocturne de 4°C entre le centre de Londres et sa campagne. Ce concept des ICU désigne les écarts de températures observés entre les milieux urbains et les zones rurales environnantes (Guigère, 2009). Ce phénomène se caractérise par son intensité qui s'exprime par la différence entre la température de l'air de la zone urbaine étudiée et la température mesurée en périphérie où cette dernière fait office de mesure de référence (Oke, 1973). En outre, selon le Groupe intergouvernemental sur le climat (GIEC), onze des douze années les plus chaudes jamais observées dans le monde ont été enregistrées depuis 1995. Les espaces urbains, minéralisés, sont impactés par cette augmentation des températures qui accentue le phénomène d'ICU.

De ce fait, les politiques publiques d'aménagement du territoire doivent contribuer à diminuer ce méta-risque afférant à ces évolutions climatiques auxquels sont, et seront, soumis nos sociétés et leur environnement par diverses actions visant à « améliorer leurs adaptations, leurs capacités de réponses et à contribuer à leur atténuations, encore évaluer à l'heure actuelle comme insuffisante » (Quénolt, 2013). La Métropole de Lyon ne déroge pas à cela et a commencé à agir pour que la qualité de vie de la population ne diminue pas. C'est dans ce contexte qu'est né le projet EPOC (Étude de Préfiguration d'un Observatoire local du Climat, 2014-2016). EPOC s'inscrivait dans les toutes premières études relatives au climat urbain du territoire lyonnais (Maillard et al, 2014 ; Musy et al, 2015 ; Diallo-Dudek, 2015). Cependant ce dernier demeure encore aujourd'hui insuffisamment caractérisé, ainsi que le risque afférent sur la population. Sur ce territoire, les mesures des stations de surveillance professionnelles fournissent des données pour un nombre très limité d'emplacements. D'emblée, la mesure satellitaire, faiblement exploitée pour le moment sur l'agglomération peut s'avérer un bon substitut. Cependant, la participation des acteurs et des citoyens serait extrêmement utile pour l'observation et la prise de mesures sur le terrain à différents endroits de la ville, dans le but de collecter une plus grande quantité de données pour une approche plus réaliste des gradients thermiques lyonnais.

L'observatoire Popsu Europe (PUCA, 2015) appuie le fait d'un « besoin d'expérimentation pour faciliter la transition de la théorie à l'action et la formation d'environnements collaboratifs impliquant les acteurs de la ville et le milieu de la recherche » afin de « lutter contre le changement climatique à tous les niveaux d'action temporels et spatiaux et à tous les niveaux de gouvernance ». Ainsi, l'îlot de chaleur urbain, variant à l'échelle du quartier, est souvent présenté sous forme de recommandation

par une description uniquement qualitative. Comment alors produire une information adaptée évaluant qualitativement mais également quantitativement les îlots de chaleur urbains sur le territoire lyonnais afin de répondre au défi de l'adaptation des villes au changement climatique ? Peut-on inclure activement des citoyens participants, et leurs laisser une place de choix dans les mesures de température et d'humidité au vu d'une caractérisation fine des ICU lyonnais et d'une sensibilisation des parties prenantes ? La qualité et la quantité de l'information récoltée et diffusée peuvent-elles être fiables et exploitable ? L'essentiel de l'apport de mon travail de thèse aura pour objectif d'améliorer la connaissance du phénomène d'îlot de chaleur urbain et de l'impact des vagues de chaleur et canicules sur une population plus ou moins vulnérable à ce type d'aléa. Sur cette problématique, Lyon accuse un certain retard comparé à d'autres agglomérations. L'exposé en trois parties qui suit contribuera ainsi à la mise en place de ma problématique de thèse. La première est consacrée à la caractérisation théorique des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains (IFU) dans le cadre du changement climatique et de leurs effets sur les agglomérations. La seconde partie présente les principes méthodologiques complémentaires essentiels de caractérisation des ICU et IFU et seront une réelle base pour mon travail de thèse. Enfin, la dernière partie constitue une première série d'applications pratiques faisant preuve de concept, par le traitement de plusieurs événements, fondées sur une caractérisation des ICU et IFU par télédétection, mesures mobiles continues et mesures ponctuelles participatives.



# **P**artie 1. L'îlot de chaleur urbain dans le cadre du changement climatique : enjeux et impacts sur les espaces urbains

## **1.1 L'îlot de chaleur urbain : un microclimat naissant au cœur des villes et particulièrement chaud.**

D'après Vigneau (2005), l'ICU est un nouveau type climatique transzonal. Il est ainsi nécessaire d'en avoir un panorama mesuré, permettant de calculer les effets climatiques de ce phénomène dont « *la compréhension est aujourd'hui si utile pour se situer dans le monde où nous vivons et pour envisager son avenir* » (Foucault, 2009).

### **1.1.1 Changement climatique global**

Pour l'OMM (2011), la climatologie est « *l'étude du climat, de ses variations et de son impact sur diverses activités dont (sans exhaustivité) celles qui affectent la santé humaine, la sécurité et le bien-être* » (OMM, 2011).

La communauté climatique française, regroupant le CNRS (Centre National de Recherche Scientifique), le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), Météo-France, l'UPMC (Université Pierre et Marie Curie) et l'UVSQ (Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines), a simulé le climat passé et futur à l'échelle globale de la France (2011). Cette synthèse vient alimenter le dernier rapport du GIEC (2013), ayant pour mission de recenser et de résumer toute l'information scientifique sur le changement climatique, ses impacts et les solutions pour l'atténuer ou s'y adapter. Ainsi, à l'échelle de la France, leurs prévisions annoncent, à l'horizon 2100, pour le scénario le plus sévère, une hausse de 3,5 à 5°C des températures, et pour le plus optimiste, une augmentation de 2°C.

A l'échelle de la région Rhône-Alpes, les travaux de Météo-France (2011-b) ainsi que les résultats des modèles climatiques « régionaux » européens ; intégrant les scénarios RCP (*Representative Concentration Pathways*) 4.5 et 8.5 ; du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Jouzel et al, 2014) prévoient une augmentation des températures annuelles et saisonnières. Les températures estivales devraient connaître une hausse comprise entre 0,5 et 2° C à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005 (ORECC, 2016).

Sur le territoire de la Métropole de Lyon, une hausse des températures moyennes annuelles de 1,9°C a été observée pour la période 1959-2014 par rapport à la période de référence 1981-2010 (ORECC, 2016). Il peut aussi être constaté une élévation des températures mesurées par la station de Bron de Météo-France sur la période 1921-2016 (figure 1). Si en effet on remarque une variation à la hausse des températures annuelles moyennes maximales, la tendance la plus impressionnante reste celle des températures moyennes annuelles minimales.

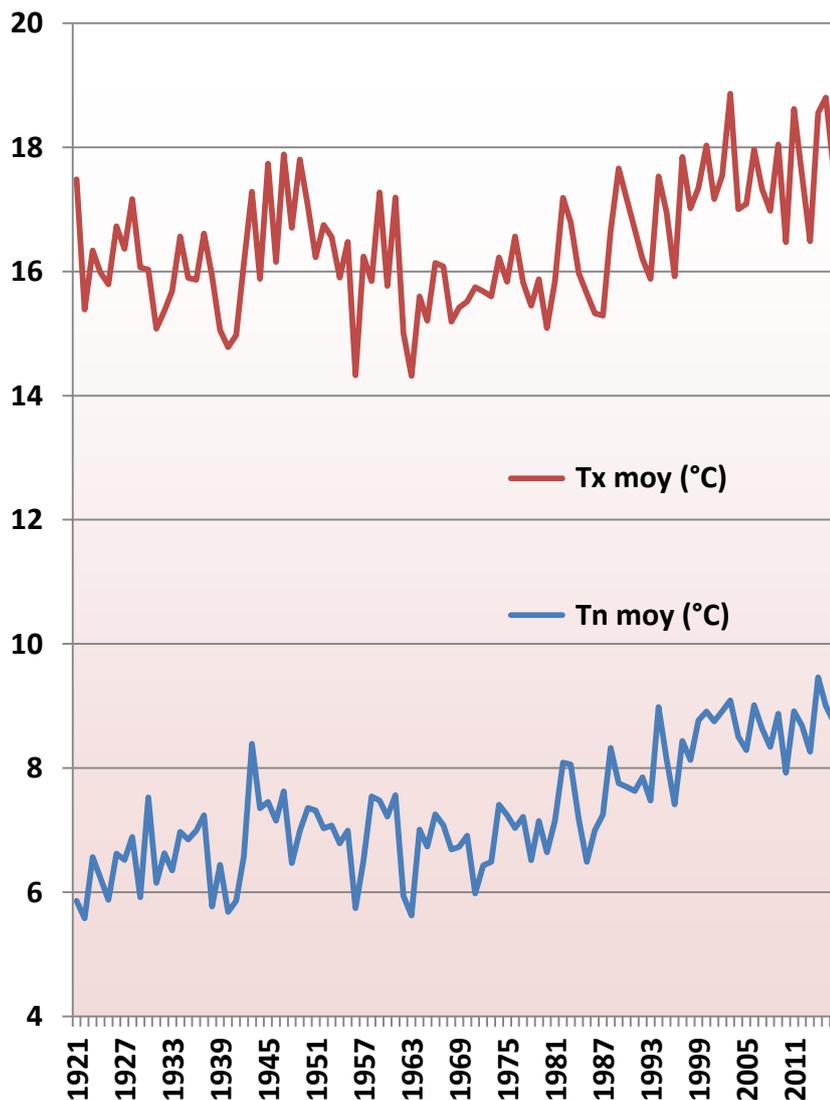


Figure 1: Evolution des températures annuelles moyennes maximales (Tx) et minimales (Tn) sur la période 1921-2016

Parallèlement, le nombre de jours de vagues de chaleur devrait être compris entre 0 et 10 jours, alors qu'il oscille entre 2 et 6 jours pour cette même période de référence (ORECC, 2016).

### 1.1.2 Période de canicule et effet sur la population

Comme vu précédemment, parmi les événements climatiques en constante augmentation, surtout en milieu urbain, on identifie les vagues de chaleur et les canicules.

La figure 2 montre l'accroissement du nombre de jour de forte chaleur sur la période 1921-2016, passant d'environ d'une à deux journées jusqu'au début des années 80 (exception faite de la sortie de la seconde guerre mondiale) à un accroissement depuis les années 2000 et des pics allant jusqu'à 22 ou 12 pour les années 2003 et 2015 respectivement. Les températures ont été enregistrées à la station de Lyon-Bron de Météo-France.

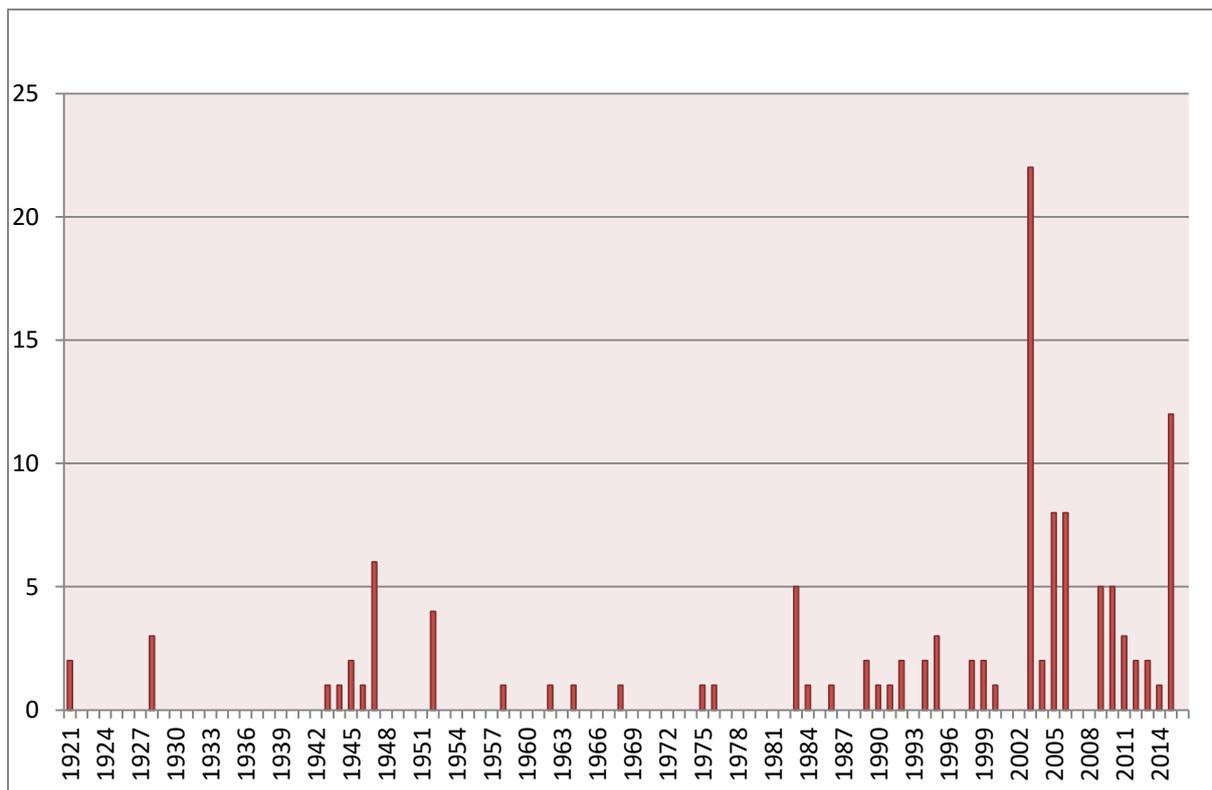


Figure 2: Evolution du nombre de jours de forte chaleur sur la période 1921-2016 à partir des données de températures de la station météorologique Lyon-Bron

Il est également nécessaire de suivre l'évolution du nombre de jours de canicule et du nombre de canicule. Une canicule, par définition de l'ORECC (2016), est « une succession d'au moins 3 jours consécutifs de fortes chaleurs. Le troisième jour est alors compté comme le premier jour de canicule ». Les seuils des températures fixés varient en fonction des départements, en fonction de conditions intrinsèques de la population (figure 3).

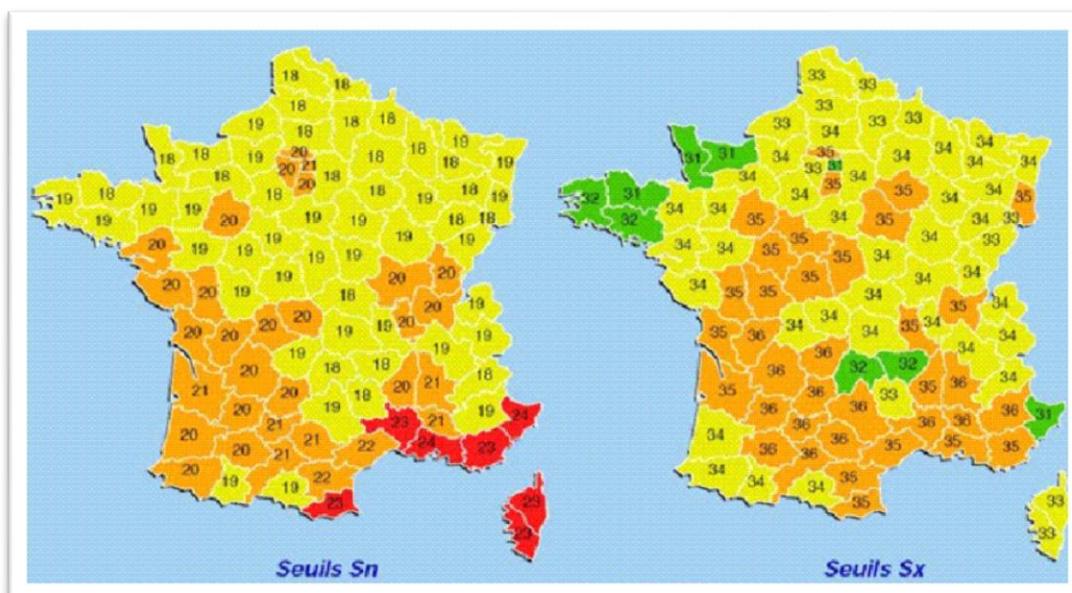


Figure 3: Seuil Tmin et Tmax (en °C) pour chaque département français - source Météo-France

Le tableau suivant indique les seuils retenus pour chaque département de Rhône-Alpes.

Département	Seuil de température minimale en °C	Seuil de température maximale en °C
Ain	20	35
Ardèche	20	35
Drôme	21	36
Isère	19	34
Loire	19	35
Rhône	20	34
Savoie	19	34
Haute-Savoie	19	34

Tableau 1: Seuils de canicule en Rhône-Alpes

Les seuils ont été fixés selon une méthode adaptée à six villes : Paris, Marseille, Lyon, Limoges, Nantes et Strasbourg. Cette méthode consiste à modéliser le lien entre indicateurs météorologiques et mortalité, à partir de modèles additifs généralisés pour sélectionner le percentile à partir duquel la surmortalité dépasse une valeur préalablement fixée, qui correspond aux seuils à partir desquels on a pu observer une surmortalité journalière supérieure de 50 à 100 %, par rapport à la moyenne glissante sur 3 ans de la mortalité pour la même journée. Ce type d'ajustement est fait par Météo-France et l'Institut de Veille Sanitaire.

Ainsi, dans le Rhône, ces bornes sont de 20°C pour les températures minimales et de 34°C pour les températures maximales. Les figures 4 et 5 présentent respectivement les valeurs de l'indicateur climatique nombre annuel de jour de canicule et celles du nombre annuel de canicule sur la période 1921-2016, à partir des températures moyennes minimales et maximales journalières enregistrées à la station Lyon-Bron.

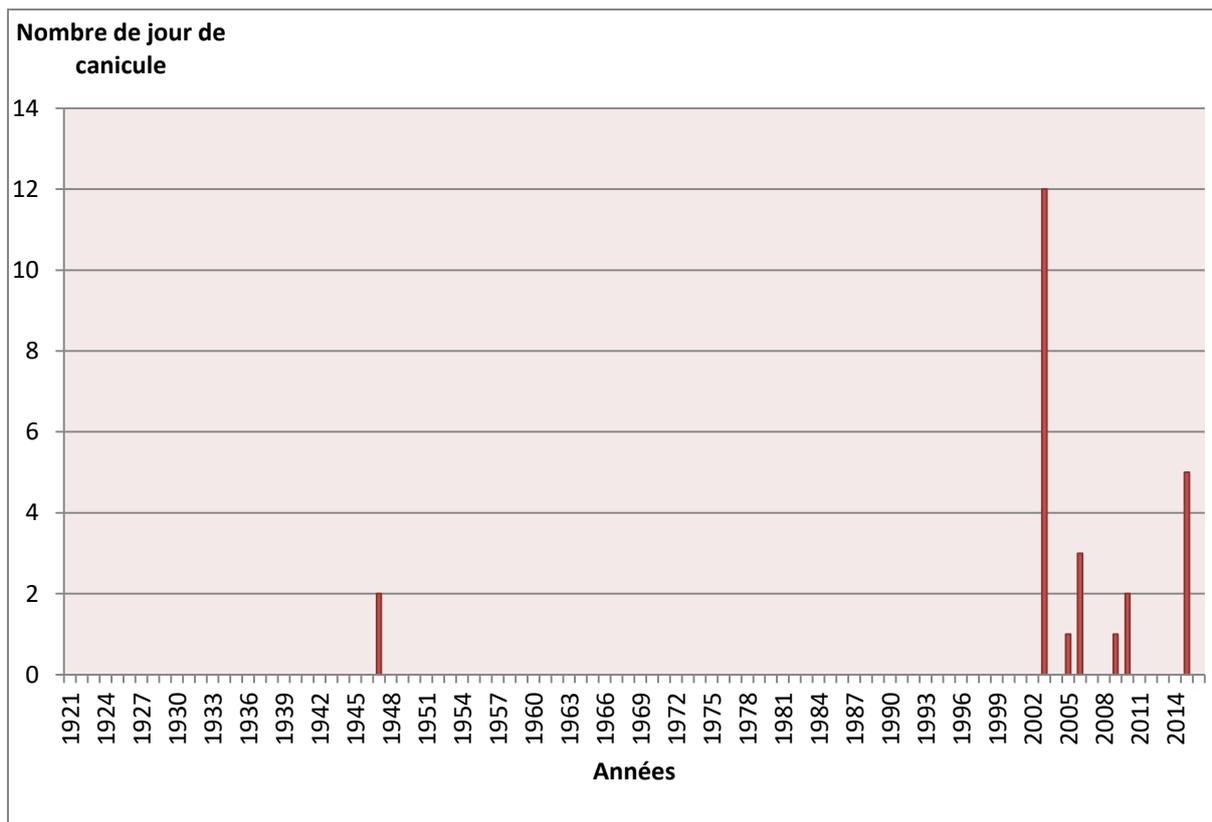


Figure 4: Evolution du nombre de jour de canicule sur la période 1921-2016 à partir des données de températures de la station météorologique Lyon-Bron

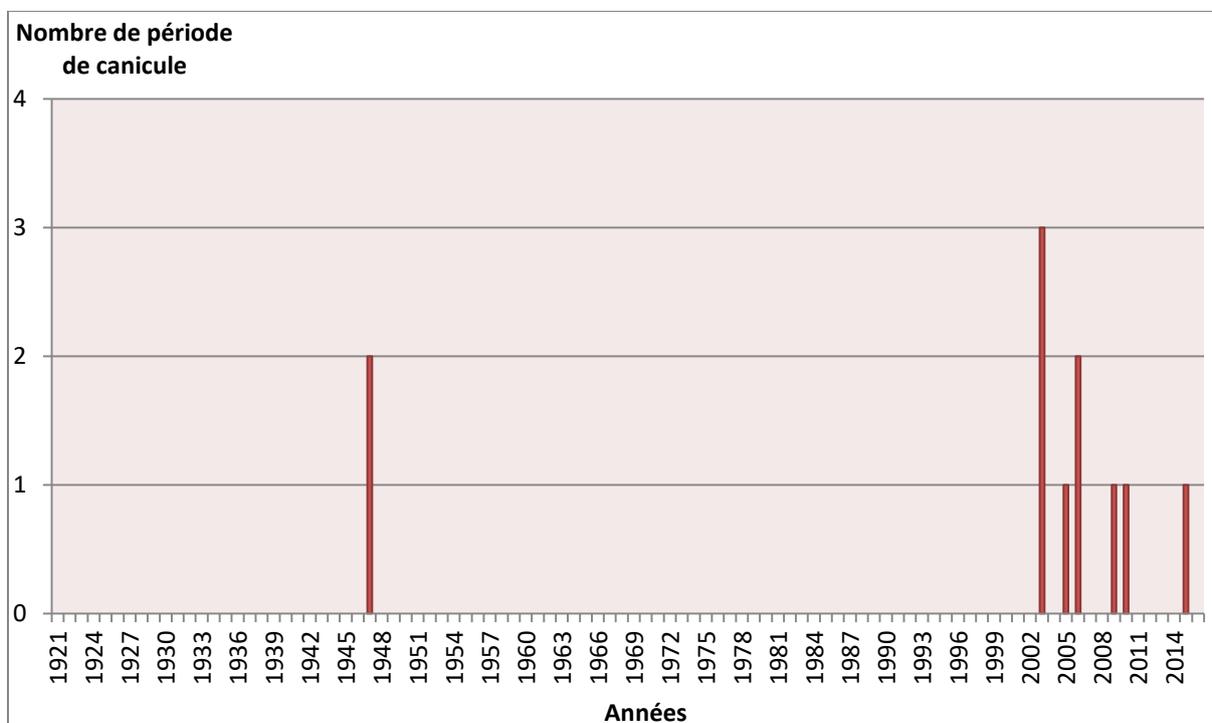


Figure 5: Evolution du nombre de période de canicule entre 1921-2016 à partir des données de températures de la station météorologique Lyon-Bron

De par ces deux illustrations, nous remarquons une augmentation en fréquence mais également en intensité des épisodes caniculaires depuis la station météorologique de Lyon-Bron, et ce depuis l'année 2003.

La relation climat-santé fait aujourd'hui l'objet d'attentions particulières (Renard et *al.*, 2015). En effet l'organisme exerce une régulation consistant en des échanges avec l'extérieur afin de lutter contre les variations de l'environnement atmosphérique. Les évolutions climatiques actuelles contribuent à une « relative dégradation de la qualité de vie avec une augmentation de l'inconfort thermique en milieu urbain » (RCT, 2010). Cet *indice d'inconfort thermique*, appelé aussi THI (*Temperature-humidity index*), se définit autour du « *confortable*, d'une gamme allant de l'*hyperglacial* au *torride* » (Vigneau, 2005). De par cette sensibilité de l'homme aux conditions thermiques extrêmes, l'impact des canicules sur la santé humaine a eu de graves conséquences au cours de ce 21<sup>ème</sup> siècle, et notamment en France. Les canicules de 2003, 2006, 2010 et 2015 ont provoqué respectivement 72210, 3418, 55736, 3685 morts en Europe (figure 6) d'après International Disaster Database EM-DAT.

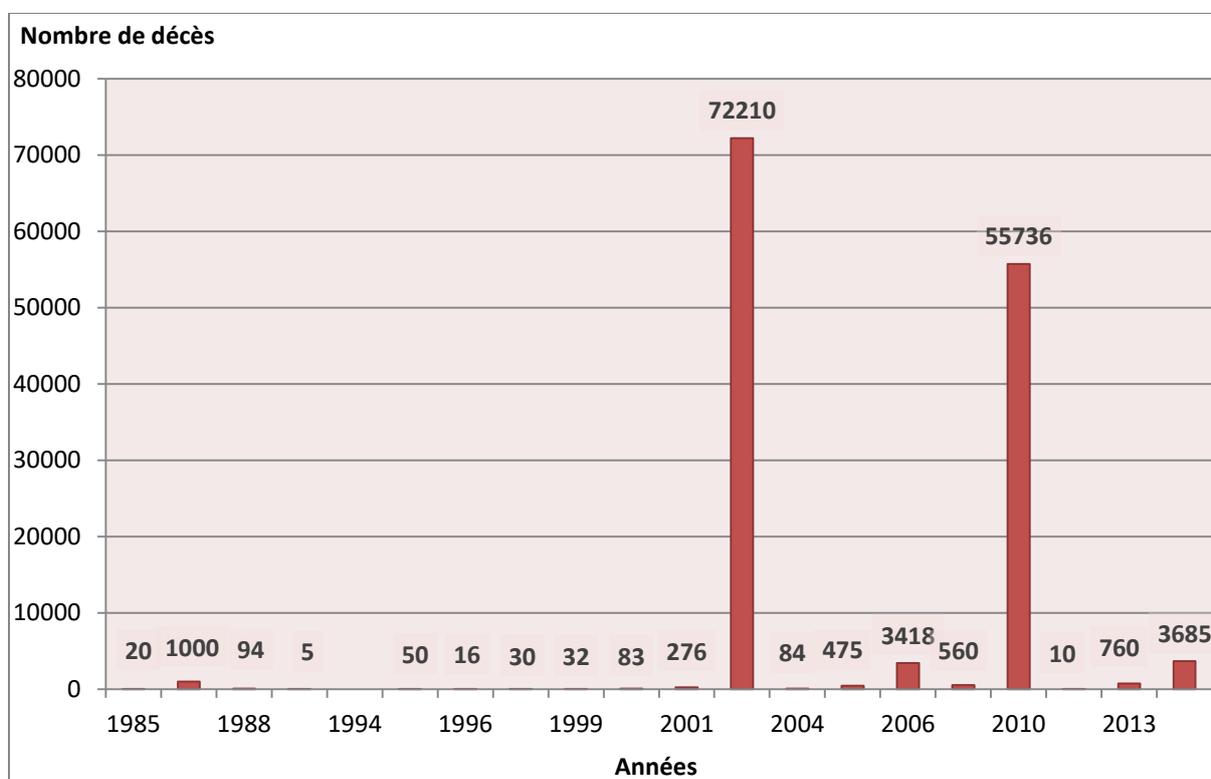


Figure 6: Impacts de l'aléa canicule sur la santé humaine en Europe depuis 1985 (source des données : Disaster Database EM-DAT)

Les données sur la France de la Disaster Database EM-DAT associées aux canicules de 2003, 2006 et 2015 mentionnent respectivement 19490, 1388 et 3275 morts (figure 7).

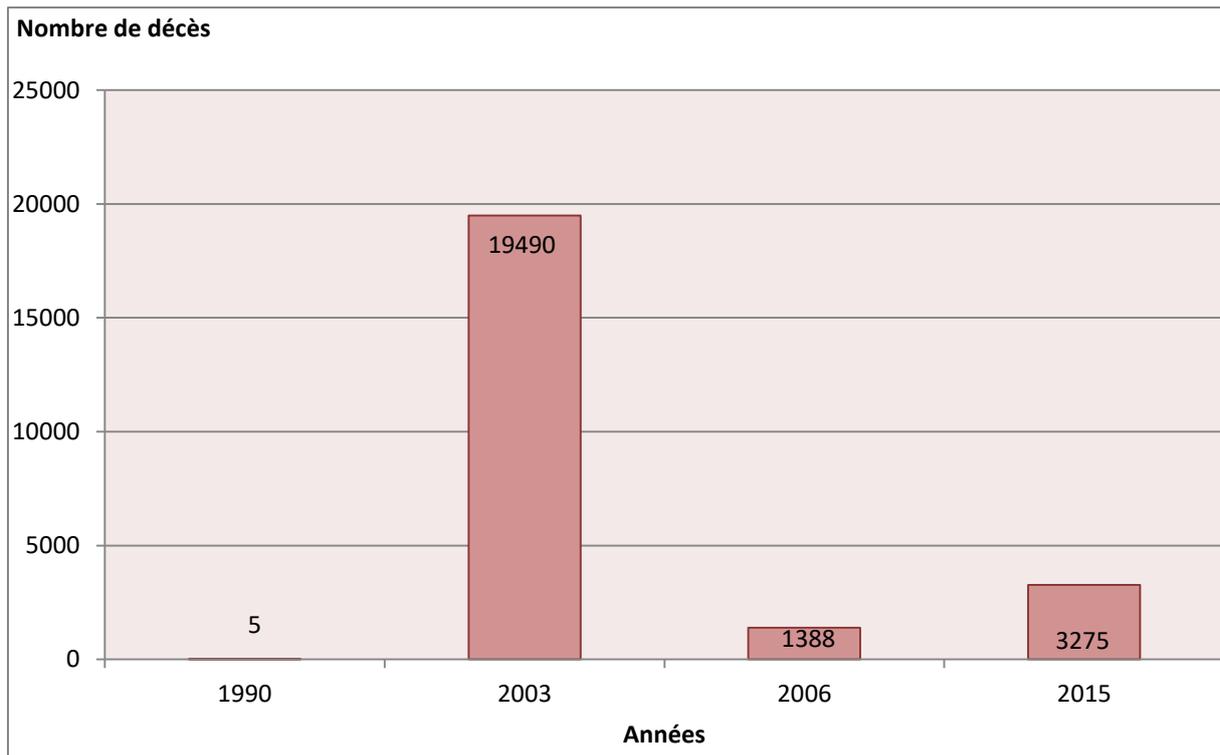


Figure 7: Impacts de l'aléa canicule sur la santé humaine en France depuis 1990 (source des données : Disaster Database EM-DAT)

Les sociétés, vulnérables aux changements climatiques, doivent aujourd'hui composer avec et se rendre plus résilientes face à ce risque. En outre, elles contribuent à le modifier involontairement de par l'impact de l'urbanisation.

### 1.1.3 Les sociétés et leur climat urbain : la formation des Ilots de Chaleur Urbains (ICU)

Dans un environnement donné, les propriétés radiatives, thermiques, hydriques et aérodynamiques régissent la répartition de l'énergie qui, elles-mêmes, influent la température d'air, l'humidité absolue ou encore le profil des vents (Oke, 1987). « Il est clairement apparu que la poussée urbaine, vertigineuse dans la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, induisait des effets spectaculaires. [...] L'ampleur de la modification est fonction de la taille de l'organisme urbain » (Vigneau, 2005). Les grandes agglomérations modifient donc leur climat local du fait des différences de densité du bâti et de matériaux utilisés, de la place réservée et laissée aux espaces verts, de la largeur et du tracé des voies de communications etc. Cette ambiance climatique urbaine entraîne des modifications dans les mécanismes aérologiques. Le rayonnement solaire direct est affaibli par la présence accrue d'aérosols et de poussière. En revanche, les pertes immédiates sont réduites du fait de la faiblesse de l'albédo. Le bilan énergétique n'est donc que peu modifié au-dessus des espaces urbains. Plusieurs mécanismes et changements interviennent par la suite :

- la libération de la chaleur piégée par le bâti décale d'une ou de deux heures les minimums et maximums de températures journalières ;

- la ville dispose d'une plus grande rareté des surfaces pouvant évapotranspirer. La restitution de la chaleur s'effectuera davantage sous forme de chaleur sensible et que peu sous forme de chaleur latente (figure 8). Le potentiel rafraîchissant des parcs urbains a fait l'objet de plusieurs publications (Spronken-Smith et *al.*, 2000 ; Lahme et Bruse, 2003 ; Yu et Hien, 2006 ; Robitu et *al.*, 2006 ; Slater, 2010 ; Oliveira et *al.*, 2011; Buyadi et *al.*, 2014).
- on constate de multiples combustions (industrielle, chauffage et transport), d'autant mieux conservées au-dessus des agglomérations que l'air est stable.

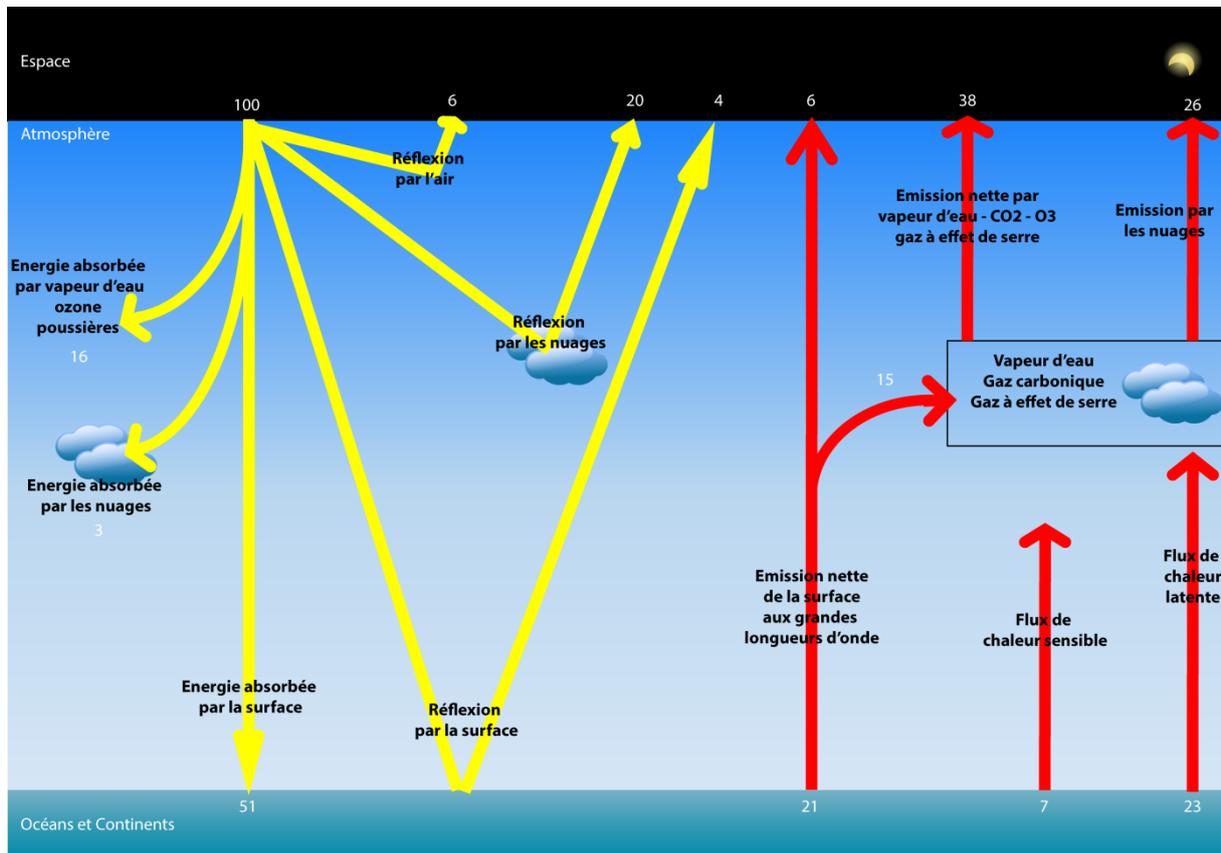


Figure 8: Différent processus du bilan radiatif terrestre

L'absorption de la partie non réfléchi du rayonnement solaire (flèches jaunes- figure 8) par l'atmosphère et la surface terrestre réchauffe le système climatique. Pour se refroidir, ce dernier doit émettre de l'énergie vers l'espace sous forme de rayonnement. Cette émission provient de la surface elle-même, mais aussi des nuages et de différentes molécules atmosphériques. Ces corps étant à des températures entre 220 et 300°K (degrés Kelvin), cette émission s'effectue dans l'infrarouge (flèches rouges – figure 8).

Tous ces phénomènes ont pour conséquence une élévation de la température de l'air environnant au sein de l'agglomération. Ainsi, le contact avec la ville donne à la *couche limite* (la partie la plus basse de la troposphère) un profil spécifique, davantage individualisé que la circulation atmosphérique est lente. On parle alors de « *couche urbaine* » (Vigneau, 2005) dont son épaisseur varie avec le cycle nyctéméral (alternance d'un jour et d'une nuit correspondant au cycle biologique de 24 heures) :

- la nuit, le niveau inférieur (couche de surface urbaine), en contact direct avec les constructions anthropiques reste mince. Le niveau supérieur, qui lui est stable, atteint seulement 200 à 300 mètres d'altitude, ce qui correspond à une dilatation un peu plus importante qu'en rase campagne (figure 9). « Pendant la nuit, les équilibres d'énergie et de rayonnement du canyon urbain et du champ nu ont différentes directions et/ou densités » (Stewart, 2011). Le rayonnement sortant du sol est considérablement réduit par rapport au champ nu, en raison d'une proportion de l'hémisphère du ciel visible réduite au niveau du sol du fond du canyon (Nunez et Oke, 1977).
- le jour, la convection donne davantage volume à ensemble. Le niveau supérieur (couche de mélange urbaine) s'élève alors jusqu'à 500 à 1000 mètres d'altitude, animé d'un brassage vertical lié à la convection (figure 10).

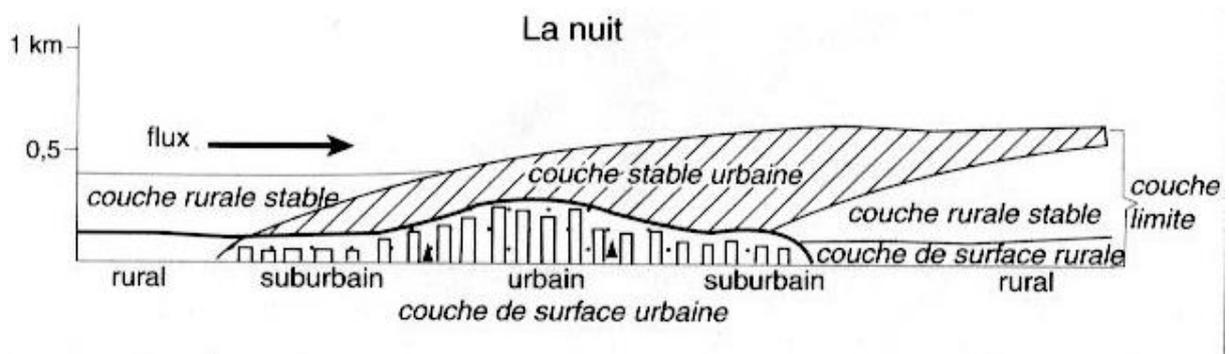


Figure 9: Spécificité nocturne de l'atmosphère urbaine (source : Vigneau, 2005 – d'après Hufty)

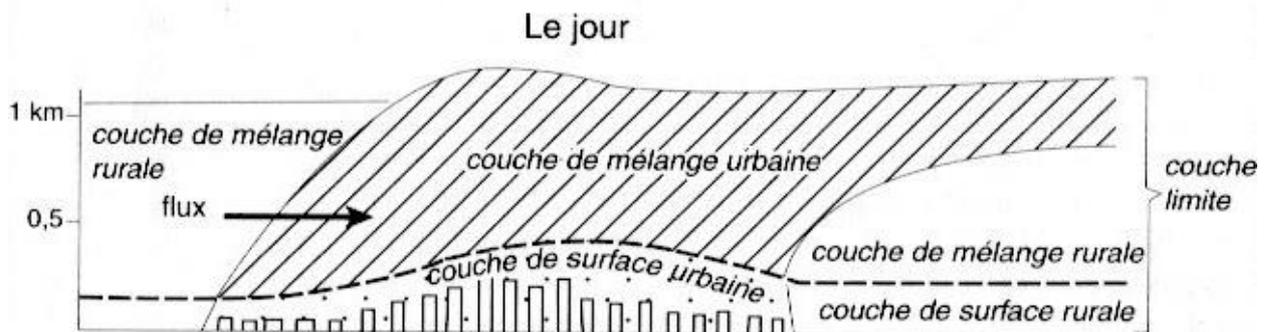


Figure 10: Spécificité diurne de l'atmosphère urbaine (source : Vigneau, 2005 – d'après Hufty)

L'empreinte urbaine se lit également sur la modification des régimes de vent. Dans le cas où flux est sensible, une rugosité accrue d'un substrat exerce un effet freinage et une convergence. La fragmentation et la décomposition du bâti produit des effets d'accélération et de canalisation des flux, inégaux selon les orientations des rues. Dans le cas où les flux sont faibles, le contraste température entre agglomération et milieu rural provoque une brise de campagne, venant de la périphérie rurale, commandée par cette différence de pression entre deux milieux, lui-même fonction d'un gradient thermique. Ces nuances de climats urbains sont difficiles à quantifier, souvent

par manque de postes fixes de stations météorologiques au sein même de l'agglomération et par manque de mesures itinérantes et ponctuelles. Par ailleurs, le climat urbain se structure généralement grâce à l'utilisation de trois échelles spatiales horizontales (Oke, 2003 ; Oke, 2006) :

- L'échelle mésoclimatique, s'appliquant à des phénomènes climatiques de taille comprise entre  $10^4$  et  $2.10^5$  mètres, c'est-à-dire englobant environ une agglomération.
- L'échelle locale regroupant des phénomènes étendus de  $10^2$  à  $5.10^4$  mètres.
- L'échelle microclimatique qui concerne des phénomènes dont la dimension spatiale est comprise entre  $10^{-2}$  et  $10^3$  mètres. Cette dimension vient compléter la définition du microclimat, à savoir le développement d'un climat différent du climat général environnant (Erell et al, 2011).

Ces composantes du temps subissent donc des forçages urbains, à l'origine de l'existence de climat urbain. La manifestation la plus flagrante est celle concernant le surplus de chaleur, l'îlot de chaleur urbain (ICU). La définition la plus fréquemment admise de l'ICU est la différence de température d'air entre une zone urbaine et sa campagne environnante (Oke, 1987 ; Gartland, 2010 ; Erell et al., 2011 – figure 11).



Figure 11: Profil horizontal schématisé d'un îlot de chaleur urbain se manifestant sur l'agglomération de Lyon.

Ainsi, il est fréquent de trouver des différences de température urbaines et rurales supérieures à 5 à 10 ° C dans des conditions «idéales», c'est-à-dire ciel dégagé et vents légers (Azevedo et al., 2016). Par ailleurs et dans de nombreux cas, l'UHI est la plus forte la nuit. Une étude à Paris a montré que l'ampleur de l'UHI de nuit était jusqu'à 7 ° C plus que l'UHI de jour (Lac et al., 2013).

Cette amplitude de température diffère bien sûr selon le cadre d'étude, l'agglomération et ses campagnes aux alentours.

## 1.2 Est-il possible de quantifier et spatialiser l'ICU ?

Il existe différents type d'ICU, possédant chacun leur échelle spatiale et temporelle ainsi que leur mécanisme et leur méthode de mesure (Oke, 1976 ; Oke, 1978 ; Stewart, 2011) :

- L'ICU souterrain s'illustrant par le fait que les températures du sous-sol urbain tendent à être plus élevées que celles du sous-sol des zones non urbanisées.
- L'ICU de surface concernant la différence de température de surface entre les zones urbaines et rurales. Cet écart peut s'expliquer par des utilisations éloignées des matériaux en ville qu'à la campagne. Il a été souligné que 80% de l'énergie générant l'ICU provient de l'énergie solaire absorbée par les matériaux (APUR, 2012).
- L'ICU atmosphérique de basses couches, *urban canopy layer* (Oke, 1978), situé entre le niveau du sol et le niveau moyen des toits et qui fait référence à la température de l'air. Une sous distinction peut encore s'opérer au sein de celui-ci avec l'ICU de couche limite urbaine et l'ICU de couche limite de la canopée urbaine.
- L'ICU atmosphérique urbain supérieur, *urban boundary layer* (Oke, 1978).

C'est pourquoi, il existe plusieurs méthodes pour quantifier l'îlot de chaleur urbain en fonction de ceux étudiés. Nous nous intéresserons ici à l'ICU de surface et celui faisant référence à la température de l'air, l'ICU atmosphérique de basses couches.

### 1.2.1 A l'aide de mesures de température de surface : satellitaire et locale

Depuis 1960, date du lancement de TIROS 1 (*Television and Infra-Red Observation Satellit*) par les américains, les satellites météorologiques constituent une source d'information essentielle pour suivre le temps et le climat. Les données de télédétection optique, après un traitement rigoureux, peuvent permettre de déterminer les températures de surface pour un lieu donné, à un instant donné. Les îlots de chaleur de surface sont généralement étudiés à partir de ces méthodes d'analyse. L'enregistrement de l'énergie libérée peut être transcrit par deux types de satellites, à savoir les géostationnaire et ceux à orbite quasi polaire. Les premiers se situent à altitude très élevée (environ à 36 000 kilomètres) et toujours au-dessus de la même région de la surface de la Terre puisque sa vitesse de rotation est égale à celle de la Terre. Les seconds suivent une trajectoire orbitale et héliosynchrone, située à une altitude moins élevée (environ à 850 kilomètres) et donc comportant une résolution spatiale plus grande. Il en existe un grand nombre autour de la Terre. Les plus connus et utilisés en télédétection sont cités dans le tableau ci-dessous (tableau 2), reliés à leurs caractéristiques générales et thermiques d'après plusieurs auteurs (European Space Agency, 1993 ; NASA, 2000 ; EUMETSAT, 2001 ; Aminou et *al.*, 2009 ; NASA, 2009 ; Envisat, 2013 ; NOAA, 2014 ; Tranquilli et *al.*, 2016 ; USGS, 2016).

Types de satellites	Groupe satellitaire	Nom du satellite	Année de mise en circulation	Capteur thermique	Bande thermique	Longueur de l'onde ( $\mu\text{m}$ )	Résolution spatiale	Auteur ayant eu recours à ce satellite dans des travaux de recherches
A orbite quasi polaire	LANDSAT	Landsat 1	1972	MSS, RBV	Pas de bande IR thermique	/	Générale : 79 m	/
		Landsat 2	1975	MSS, RBV	Pas de bande IR thermique	/	Générale : 79 m	/
		Landsat 3	1978	MSS, RBV	Bande 5	10,4 - 12,6	Générale : 79 m	/
		Landsat 4	1982	TM, MSS	Bande 6	10,4-12,5	Générale : 30 m Infrarouge thermique 120 m	Walawender et al., 2012
		Landsat 5	1984	TM, MSS	Bande 6	10,4-12,5	Générale : 30 m Infrarouge thermique 120 m	Kim, 1992 ; Aniello et al., 1995 ; Nichol, 1996 ; Abatte, 1997 ; Gallo et Owen, 1998 ; Dahech, 2012 ; Walawender et al., 2012 ; Buyadi et al., 2014 ; Diallo-Dudek, 2015 ; Dubreuil et al., 2016
		Landsat 6	1993 - Pas de mise en orbite	/	/	/	/	/
		Landsat 7-on	1999	ETM+	Bande 6	10,3-12,4	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique 100 m	Quénol et al., 2007 ; Dahech, 2012 ; Walawender et al., 2012 ; Abtaleb et al., 2014 ; Diallo-Dudek, 2015.

Types de satellites	Groupe satellitaire	Nom du satellite	Année de mise en circulation	Capteur thermique	Bande thermique	Longueur de l'onde (µm)	Résolution spatiale	Auteur ayant eu recours à ce satellite dans des travaux de recherches
A orbite quasi polaire	LANDSAT	Landsat 7-off	2003	ETM+	Bande 6	10,3-12,4	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 100 m	/
		Landsat 8	2013	OLI-2 TIRS-2	Bande 10	10,6-11,2	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 60 m	Walawender <i>et al.</i> , 2012 ; Amorim et Dubreuil, 2016 ; Renard <i>et al.</i> , 2016 ; Zhang <i>et al.</i> , 2017
	EOS	EOS AM-1 (Terra)	1999	MODIS	Bandes 31	10,8 -11,3	1000 m	Fabrizi <i>et al.</i> , 2011 ; Keramitsoglou <i>et al.</i> , 2011 ; Hadjimitsis <i>et al.</i> , 2013 ; Azevedo <i>et al.</i> , 2016 ; Zhang <i>et al.</i> , 2017
			1999	ASTER	Bandes 13	10,3 – 10,9	90 m	Konno <i>et al.</i> , 2015 ; Loconte <i>et al.</i> , 2012
	NOAA	NOAA 15 à NOAA 19	1998 (à 2009)	AVHRR/3	Bande 4	10,3 - 11,3	1000 m	Gallo et Owen, 1998 ; Dahech <i>et al.</i> , 2005 ; Mestayer <i>et al.</i> , 2005 ; Roth <i>et al.</i> , 2007 Dahech, 2012 ;
		Metop A et Metop B	2006	AVHRR/4	Bande 4	10,3 - 11,3	1000 m	/
	Quickbird	Quickbird 1	2000	/	/	/	/	/
		Quickbird 2	2001	Quickbird satellite sensor	Bande 4	0,8 - 0,9	2,44 m	Foissard <i>et al.</i> , 2013 ; Zhang <i>et al.</i> , 2017
	ERS	ERS-1	1991	SAR	Bande 3	/	30 m	Abatte, 1997
		ERS-2	1995	SAR	/	/	30 m	

Types de satellites	Groupe satellitaire	Nom du satellite	Année de mise en circulation	Capteur thermique	Bande thermique	Longueur de l'onde (μm)	Résolution spatiale	Auteur ayant eu recours à ce satellite dans des travaux de recherches
A orbite quasi polaire	SPOT	SPOT 1 <sup>ère</sup> génération	1986	HVR-1	Bande 3	0,8–0,9	20 m	Moran <i>et al.</i> , 1995 ; Dousset, 1991
		SPOT 2 <sup>ème</sup> génération	1998	HVR-1	Bande 4	1,6–1,8	20 m	Dousset et Gourmelon, 2003
		SPOT 3 <sup>ème</sup> génération	2002	HVR-1	Bande 4	1,6–1,8	20 m	/
		SPOT 6-7	2012	HVR-2	Bande 5	0,8 – 0,9	6 m	/
	Envisat	Envisat	2003	ATSR	/	10,8	1000 m	Lahme et Bruse, 2003 ; Garcia et Pardo, 2016 ; Fabrizi <i>et al.</i> , 2010
Géostationnaire	Meteosat	Meteosat première génération	1977	MVIRI	/	10.5 - 12.5	5000 m	/
		Meteosat seconde génération	2004-2025	SEVIRI	Bande 9	9,8 - 11,8	3000 m	/
		Meteosat troisième génération	2021-2039	FCI - TIRS	Bande 14	10,5	2000 m	/
	NOAA	GEOS 12 à GEOS 15	2001	GEOS-NOP	Bande 8	11,03	1000 m à 2000 m	/
		GEOS-R	2016	GEOS-ABI	Bande 14	11,2	2000 m	/

Tableau 2 : Caractéristiques des différents satellites météorologiques à orbite quasi polaire et géostationnaire

## 1.2.2 A l'aide de mesures de la température de l'air

Créée en 1950 pour succéder à l'Organisation météorologique internationale, en place depuis 1873, l'OMM (Organisation Mondiale Météorologique) a pour un de ces objectifs d'améliorer la mesure et la surveillance continue du climat de par son Système mondial d'observations. Les réseaux de stations d'observation en surface (GSN) permettent de surveiller et de recueillir des données concernant les éléments climatiques. Dans le cadre de ce chapitre, nous nous intéresserons à la veille de la température de l'air. Celle-ci peut, de ce fait, se caractériser par le biais de plusieurs mesures, fixes, mobiles et participatives, présentant toutes des normes, des pratiques et des procédures différentes, présentées dans les manuels de l'OMM (2011) mais aussi dans ceux de Météo-France (2011-a).

- *Les mesures fixes de températures :*

Une station climatologique ordinaire se situe sur un terrain présentant les conditions requises pour, entre autre, l'observation de la température maximale et minimale quotidienne. Les premières stations météorologiques ont été implantées en ville, dans les jardins ou observatoires (comme l'observatoire située dans la tour Nord de Fourvière à Lyon). Au cours du milieu du XXème siècle, ces stations ont été délocalisées de la ville vers les aéroports situés en périphérie, cernés quelques années plus tard à leur tour par la marée urbaine. Lyon n'a pas dérogé à ce déplacement de station puisque de l'observatoire de Fourvière, elles ont été implantées sur l'aérodrome de Bron puis au sein de l'aéroport de Saint-Exupéry.

Aujourd'hui, les stations météorologiques professionnelles de surface du réseau Radome de Météo-France sont au nombre de 554 en France métropolitaine (environ une tous les 30 km) et 67 en Outre-mer. Ainsi, chaque instrument pour chaque station doit être choisi en fonction du lieu où il sera installé et de sa compatibilité avec les appareils avec lesquels il doit fonctionner. D'après l'OMM (2011), « *une station d'observation climatologique devrait se situer en un lieu favorisant l'exposition appropriée des instruments et offrant la plus large vue possible sur le ciel et le paysage environnant quand il faut y effectuer des observations visuelles. Les stations climatologiques ordinaires et principales devraient se trouver sur un terrain plat, couvert d'herbe rase, bien éloigné d'arbres, d'immeubles, de murs ou de pentes raides et qui ne se situe pas au fond d'une cuvette. Pour installer les instruments extérieurs de mesure de la température et de l'humidité, il suffit d'un enclos d'une superficie de neuf mètres sur six. L'idéal est de disposer dans cet enclos d'un carré de deux mètres de côté, conservé nu, pour les observations de l'état et de la température du sol* ». Météo-France rajoute que Les abris s'installent au minimum à une distance de deux fois la hauteur des obstacles dans un secteur le plus ensoleillé possible, même en hiver. Un abri trop proche d'un mur est totalement à proscrire puisqu'il va couper le vent sur 180°, mais aussi rayonner vers le capteur. L'abri doit être positionné 1,5 mètres au-dessus d'un sol herbeux. Il est très important que l'abri soit exposé aux divers vents pour favoriser au maximum le renouvellement de l'air dans l'abri, même par vent faible.

- *Les mesures mobiles de température et d'humidité relative :*

La mesure mobile de variables climatiques s'est développée en parallèle des approches de mesures fixes (Gartland, 2010). Dans le cadre de mesures mobiles de températures et de l'humidité relative de l'air, les instruments d'observations doivent suivre les mêmes normes que celles citées ci-dessus pour des mesures fixes *in situ* (à l'exception des conditions relatives au lieu d'implantation) :

- Le thermomètre doit être placé dans un abri blanc ventilé (de marque DAVIS par exemple, figure 12)
- Positionné tout au long des mesures à 1,5 mètre du sol



Figure 12: Abri blanc ventilé de marque Davis

Ces campagnes de mesures mobiles permettent une mesure directe, précise et instantanée des grandeurs physiques grâce au parcours d'un trajet urbain à pied ou en utilisant un moyen de transport (vélo ou voiture).]. Le principe est d'établir puis d'effectuer un itinéraire à l'intérieur et aux abords d'une agglomération.

- *Les mesures mobiles participatives de températures et d'humidité relative:*

Les mesures mobiles participatives fournissent un moyen simple, efficace et peu coûteux de recueillir des données de température et d'humidité relative à grande échelle dans une ville et ses campagnes environnantes et sont appréciées pour l'évaluation et la quantification des ICU de la canopée urbaine. Les itinéraires de mesures peuvent être linéaires ou tortueux, en étoiles ou quadrillés, et sont conçus pour obtenir un échantillon dense de ces paramètres météorologiques dans un laps de temps relativement court. L'utilisation de mode doux de transport est privilégiée, notamment pour éviter de perturber les mesures par un dégagement de chaleur lié aux moteurs à combustion ou électrique. Les capteurs de température sont généralement rattachés aux Smartphones, reliés entre eux par le biais d'applications géolocalisées, simples d'utilisation.

En dépit d'une résolution spatiale élevée, ces campagnes de mesures mobiles (participatives ou non) sont limitées à des périodes d'échantillonnage rarement supérieures à plusieurs heures. Par

la suite les données récoltées sont corrigées en fonction du temps et en tenant compte du changement d'ambiance climatique locale durant la période d'observation. Cette variation est généralement déterminée à partir d'observatoires urbains et /ou ruraux, stationnaires dans la zone d'étude, ou à partir d'un ou plusieurs points croisés le long de la route transversale. Des techniques de régression sont ensuite utilisées pour ajuster les températures et l'humidité relative brutes à un temps de base commun, comme nous le verrons par la suite.

### 1.2.3 Le recours à la science participative : entre une ouverture au public et une production de données scientifiques

Les défis environnementaux auxquels nos sociétés font face suscitent grands nombres de questionnements scientifiques mais aussi au sein de l'ensemble des citoyens, qui conduisent à porter une attention particulière aux interactions entre science et société. L'engagement des citoyens dans des projets scientifiques ne date pas d'aujourd'hui puisqu'une première initiative est née en 1900 : l'action de la *National Audubon Society's annual bird count*. Il s'agissait de rapporter en trophée de chasse le plus grand nombre d'oiseaux et de mammifères, une alternative à la chasse de Noël en Amérique du Nord (Bonney et al., 2009 et Silvertown, 2009). L'expression « science participative » n'est apparue que plus tard, lors du symposium international tenu en Colombie en 1977 (Anadòn et Savoie-Zajc, 2007).

Les sciences participatives représentent une démocratisation de la science et une ouverture du public aux problématiques environnementales. Les citoyens montrent un intérêt grandissant pour ces questions scientifiques et environnementales et recherchent « *cette « capacité active » pour interpréter leur environnement, le capter et le mesurer, et, in fine, agir sur lui* » (Allard et Blondeau, 2013), se regroupant souvent autour d'associations. Les citoyens vont s'investir davantage dans un processus de participation qui traite d'un sujet qui les concerne directement (Wamsler et al., 2014). En outre, ces évolutions ont amené le droit français à inscrire dans la loi du 22 juillet 2013, relative à l'enseignement supérieur de la recherche, le fait de « *favoriser les interactions entre sciences et sociétés* ». Ainsi, ces interactions priorisées peuvent naître sous forme d'une diffusion de la culture scientifique et technique uniquement, ou, impliquer les citoyens directement dans le processus de recherche ou d'innovation. De par ces formes nombreuses et variées que peuvent prendre les sciences participatives, il semble nécessaire d'en donner une terminologie la plus précise possible. François Houiller et Jean-Baptiste Merilhou-Goudard (2016) définissent les sciences participatives comme « *les formes de production de connaissances scientifiques auxquelles des acteurs non-scientifiques-professionnels, qu'il s'agisse d'individus ou de groupes, participent de façon active et délibérée* ». La participation est alors désignée comme « *la compétence des citoyens ou des groupes à être concernés de manière directe par un problème et mobilisés par leur volonté de mieux connaître des phénomènes qui les concernent, ou d'agir sur leurs conditions propres ou sur leurs environnements proches ou lointain* » (Houiller et Merilhou-Goudard, 2016).

Faut-il alors parler de « science participative » (Houiller et Merilhou-Goudard, 2016) ? De « *recherche collaborative* » ou « *recherche-action* » (Bourassa et al., 2007) ? De « *recherche participative* » (Lewin 1946 ; Freire, 1970 ; Freire, 1974 ; Arnstein, 1969 ; Chambers 1994) ? Le terme employé varie en fonction de la « *manière d'humaniser la science pour la mettre au service de la pratique* » (Dewey, 1934). La mobilisation des citoyens est ainsi identifiée comme un élément clé

dans la définition du concept de participation (Baum et al., 1997 ; Fiorino 1996 ; Rudolf, 2003). A quel niveau implique-t-on les citoyens dans la démarche de recherche scientifique ? Haklay M. (2015) se propose de distinguer quatre échelons de cette participation dans les sciences citoyennes (tableau 3).

Niveau de participation	Termes associés	Rôle des citoyens
Niveau 1	<i>Crowdsourcing</i>	Les citoyens sont considérés uniquement comme des capteurs de données scientifiques ( <i>sensors</i> ).
Niveau 2	Intelligence distribuée	Les citoyens contribuent aussi à l'interprétation des données.
Niveau 3	Science participative	La sphère scientifique et les citoyens définissent ensemble le problème. Ces derniers participent également à la collecte de données
Niveau 4	Collaboration complète	La recherche est collaborative sur toutes les phases du projet (de la définition du problème à l'analyse, en passant par la collecte des données).

Tableau 3: Les différents niveaux d'implication des citoyens dans la recherche participative (Haklay M., 2015)

Nonobstant cette borne de participation citoyenne, reste le choix de bien d'autres auteurs dans la typologie employée entre « *science participative* », « *science citoyenne* », (Bœuf et al., 2011) « *science communautaire* » ou encore « *bénévolat scientifique* » (Giroux, 2011). Plusieurs critères peuvent être pris en compte comme l'échelle du projet scientifique (locale ou globale), le type de protocole (données opportunistes ou fréquence de relevés imposée), les formes d'engagement (bénévolat, rémunération, durée précise ou non etc.), le rôle des différents volontaires (problématisation, établissement du protocole, collecte, analyse, interprétation, etc.), les objectifs (apprentissage, évolution des pratiques, éclairage des politiques publiques locales, résolution de la problématique, contribution à une aventure scientifique) etc. Ce que l'on appelle « sciences participatives » correspond donc à un ensemble d'activités diversifiées encore désigné par un vocabulaire et des définitions non encore stabilisés. C'est pourquoi il est nécessaire, à partir du corpus de publications scientifiques établit faisant références explicitement aux sciences participatives, de procéder à une étude scientométrique (Houiller et Merilhou-Goudard, 2016) afin d'analyser et de caractériser, pour ce projet de recherche, la science participative en jeu (tableau 4). Pour cette minutieuse synthèse, le terme de « *science communautaire* » sera laissé de côté, puisqu'il désigne un projet « *initié et mené dans la communauté par le citoyen* » (Giroux, 2011). Or, dans ce cas précis, le projet est initié et mené par la communauté scientifique, en faisant appel aux citoyens.

Auteurs	Concept et définition		Territoire d'étude
Giroux, 2011	<b>Bénévolat scientifique</b>	Bénévole supervisé par une équipe de recherche, pouvant être en voyage	Etats-Unis
	<b>Science citoyenne</b>	Le citoyen collecte les données scientifiques de base	
	<b>Science participative</b>	Le citoyen collabore à toutes les étapes du projet, actions et réactions	

Auteurs	Concept et définition		Territoire d'étude
Bourassa et al, 2007	<b>Recherche-action</b>	Met en relation les préoccupations d'acteurs, soucieux de trouver une solution, à une situation problématique avec les préoccupations des chercheurs, désireux de développer une compréhension de la situation : toutes les personnes engagées dans cette démarche possèdent un véritable statut d'acteurs autonomes, coresponsables du processus entrepris et de la production de savoir qui en découle	Canada
	<b>Recherche collaborative</b>	Une réflexion en gestes sur l'action qui se négocie avec d'autres : une relation réciproque où chacun a besoin de l'autre parce que l'autre possède son expertise	
	<b>Recherche-action collaborative</b>	Réflexion critique engagée dans un processus de recherche et de changement social	
Houiller et Merilhou-Goudard, 2016	<b>Science citoyenne</b>	Contribution des citoyens-amateurs à la collecte et à l'analyse de données (scientifiques, amateurs)	France
	<b>Community based research</b>	Collaboration entre chercheurs et groupes concernés pour diagnostiquer et résoudre des problèmes qui les affectent (communautés, minorités, familles, chercheurs)	
	<b>Recherche participative</b>	Collaboration entre chercheurs et groupes de citoyens ou professionnels pour résoudre des problèmes (professionnels, utilisateurs, associations, coopératives, chercheurs, médiateurs)	
Bonney et al, 2009	<b>Sciences citoyennes</b>	Contribution des citoyens-amateurs à la collecte et à l'analyse de données concernant la biodiversité, l'astrophysique, l'environnement... moteur est la curiosité et elle est aujourd'hui amplifiée avec les possibilités des TIC et du <i>crowdsourcing</i>	Etats-Unis

Auteurs	Concept et définition		Territoire d'étude
Haklay, 2015	<b>Crowdsourcing</b>	Les citoyens sont considérés uniquement comme des capteurs de données scientifiques ( <i>sensors</i> ).	Grande Bretagne et Europe
	<b>Intelligence distribuée</b>	Les citoyens contribuent aussi à l'interprétation des données.	
	<b>Science participative</b>	La sphère scientifique et les citoyens définissent ensemble le problème. Ces derniers participent également à la collecte de données	
	<b>Collaboration complète</b>	La recherche est collaborative sur toutes les phases du projet (de la définition du problème à l'analyse, en passant par la collecte des données).	
Lewin 1946	<b>Community based research</b>	Travail des chercheurs en collaboration avec des groupes concernés pour en diagnostiquer et résoudre des problèmes qui les affectent	Etats-Unis
	<b>Recherches participatives</b>	Collaboration des chercheurs à la résolution de problèmes auxquels sont confrontés des groupes de citoyens ou de professionnels	
Chambers, 1994	<b>Recherches participatives</b>	Collaboration des chercheurs à la résolution de problèmes auxquels sont confrontés des groupes de citoyens ou de professionnels	Grande Bretagne
Bœuf et al., 2011	<b>Science participative</b>	Choix initial du sujet fixé par un organisme scientifique. Ce dernier propose un protocole de production de données et leur interprétation. Suivi à long terme pour obtenir des tendances	France
	<b>Science citoyenne</b>	Initiative individuelle ou collective avec des motivations diverses et variées. Il est ou non fait appel à une démarche scientifique pour le traitement des données. Sensibilisation et prise de conscience de certains problèmes par le grand public et les pouvoirs publics	
	<b>Science collaborative</b>	La réciprocité de l'information du scientifique vers le producteur de données et de ce producteur de données vers le scientifique doit être permanente (dialogue et participation sur le long terme). Il s'agit d'un véritable partenariat en expériences de sciences participatives	

Auteurs	Concept et définition		Territoire d'étude
Freire, 1970 et Freire, 1974	<b>Action culturelle de la liberté</b> ( <i>Education as the Practice of Freedom</i> )	Engagement social pour contester, d'une part, le monde par une action transformationnelle, et d'autre part, sur un travail pour mieux lier savoirs et actions.	Etats-Unis
Arnstein, 1969	<b>"Participation "</b>	<p>1) Informer et Considération : lorsqu'ils sont proposés par les titulaires de pouvoir comme étant l'étendue totale de la participation, les citoyens peuvent effectivement entendre et être entendus.</p> <p>2) Les citoyens ont le droit, de façon continue, de pouvoir s'engager dans la prise de décision et négocier</p>	Etats-Unis
	<b>"Non-participation"</b>	Manipulation et thérapie : se substituer à une participation réelle. Leur véritable objectif n'est pas de permettre aux gens de participer à la planification ou à la réalisation de programmes, mais de permettre aux acteurs de pouvoir d'éduquer ou de guérir les participants	
King et al., 1994	<b>Recherche d'action traditionnelle</b>	Les chercheurs universitaires mènent un projet qui s'attaque simultanément à un problème local et à une théorie de la science sociale.	Etats-Unis
	<b>Une recherche d'action centrée sur les praticiens</b>	Les praticiens s'impliquent dans le projet de recherche pour leurs propres besoins, générant peut-être une forme de théorie utile pour les autres praticiens.	

Auteurs	Concept et définition		Territoire d'étude
Guillemette et Savoie-Zajc, 2012	<b>Recherche-action/acteur compétent</b>	L'acteur s'engage volontairement à réfléchir sur sa pratique afin de l'améliorer. Les chercheurs de même que les praticiens s'associent par leurs compétences complémentaires	Québec
	<b>Recherche-action/action</b>	Souligne la place qu'occupe l'action dans la recherche, son articulation au quotidien et sa mise en mots. Ainsi, la personne occupe non seulement un espace en tant qu'acteur compétent, mais elle est aussi activement engagée à s'améliorer	
	<b>Recherche-action/changement</b>	Porte sur la nature même du changement visé	
Cohn, 2008 et Silvertown, 2009	<b>Science citoyenne</b>	Des bénévoles, appelés « citoyens scientifiques » participent en tant qu'assistants de terrain dans des études scientifiques. Ces volontaires n'analysent pas les données ou n'écrivent pas des articles scientifiques, mais ils sont essentiels pour recueillir l'information sur laquelle reposent les études. Les scientifiques citoyens représentent « <i>un partenariat entre les bénévoles et les scientifiques pour répondre aux questions du monde réel</i> ».	Grande Bretagne et Etats-Unis

Tableau 4 : Etude scientométrique d'articles scientifiques sur les sciences participatives

De ce fait, ce projet de recherche « *caractérisation des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains à l'aide de mesures mobiles et participatives* » fait intervenir la population locale volontaire dans la collecte des données scientifiques (de températures et d'humidité) et contribuent également à la caractérisation et à la spatialisation du phénomène d'ICU sur le territoire lyonnais tout en menant une action de sensibilisation de la population locale. Le terme associé le plus approprié ici est, par conséquent, celui de science participative.

Comme présentés précédemment, ces projets de mesures participatives sont actuellement en plein essor, facilités par les avancées technologiques importantes ; sur les smartphones, la démocratisation de GPS intégré et le développement des *hacklab*, des *fablab* et d'espaces de *co-working* ; et présentent la particularité d'opter pour une approche plus quantitative de la récolte de bases de données scientifiques par des non-scientifiques bénévoles. Cette récolte de données reste une pratique fiable si, toutefois, un protocole précis est préalablement conçu (Goodchild, 2012). Silvertown (2009) présente certaines lignes directrices pour les bonnes pratiques en matière de sciences participatives :

- Les données recueillies par le public doivent être validées d'une manière ou d'une autre;
- Les méthodes de collecte des données sont nécessairement bien conçues et standardisées;
- Autant d'hypothèses que possible doivent être explicites;
- Enfin, les bénévoles reçoivent des commentaires sur leur contribution en récompense de participation.

Dans ce projet de recherche, la participation citoyenne est donc présentée comme un puissant atout puisque les nombreuses données récoltées par les citoyens volontaires, adhérant activement et de manière éclairée, vont permettre d'améliorer les connaissances sur la variabilité spatio-temporelle de l'ICU.

Cependant, l'utilisation des outils de mesures en science environnementale à des fins participatives n'est pas une pratique courante en France. Plusieurs projets de recherche sur les polluants ont fait intervenir des pratiques de mesures citoyennes ; MESSAGE en Grande-Bretagne, CommonSense (Willett et *al.*, 2010) et CitiSense (Bales, 2014) en Californie et Citi-Sense-MOB en Norvège (Castell et *al.*, 2014) ; ou encore sur le confort thermique des habitants ; Thermovote à Toronto pour une détection efficace par la participation citoyenne des conditions HVAC (Erikson et Cerpa, 2012) ; mais aucun réellement en France, si ce n'est une étude sur des capteurs low-cost de pollution pour, à terme, des mesures participatives (Duché et Madelin, 2015). En outre, la participation des citoyens pour la mesure des ICU reste une recherche encore inexploitée : aucune campagne de ce type ne semble avoir été menée, en France comme à l'étranger, à l'exception de celles réalisées au cours de stage. La contribution des citoyens pour la mesure des ICU en confrontation avec des températures de surface issues du passage synchrone de *Landsat* « reste une recherche encore inexploitée » (Renard et *al.*, 2017).

*In fine*, en plus de sensibiliser la population à des questions environnementales, les sciences participatives permettent de constituer de vastes bases de données qui seraient impossible à obtenir par le seul biais de la communauté scientifique (Dickinson et *al.*, 2012). Les collaborations entre scientifiques et bénévoles peuvent élargir la portée de la recherche et améliorer la capacité de collecte de données scientifiques. Les membres intéressés du public peuvent apporter des informations précieuses lorsqu'ils apprennent à connaître leur environnement proche. Les bénévoles présentent aussi l'avantage de pouvoir être mobilisés pour des campagnes dans une dimension réactive (lors une vague de chaleur) mais aussi en prévision d'aménagements à venir sur le territoire lyonnais. En outre, ils constituent de précieux relais dans la transmission d'informations, la prévention des risques et l'adoption de pratiques durables en vue du changement climatique.

## 1.3 Caractérisation de l'ICU par la prise en compte des différents types de situation atmosphériques et par modélisation

### 1.3.1 Les facteurs d'observation du ciel influençant l'intensité des ICU

Plusieurs études ont démontré l'influence remarquable de ces conditions météorologiques sur l'amplitude de l'ICU, et ce depuis même la moitié du 19<sup>ème</sup> siècle (Sundborg 1950; Chandler 1965;

Oke 1973; Conrads 1975 ; Oke, 1981 ; Arnfield, 2003 ; Stewart, 2011 ; Brandsma et Wolters, 2012). Ces conditions météorologiques font référence à la vitesse du vent, sa direction, au nombre et type de nuages ainsi qu'aux précipitations. Dans ces travaux, l'importance de la vitesse du vent et de la nébulosité en tant que variables explicatives est particulièrement bien définie et participent grandement à la variation de l'intensité de l'ICU.

Chaque ville possède des caractéristiques propres du fait de conditions climatiques régionales propres et de la diversité des types de temps. Ainsi chaque agglomération possède sa propre identité thermique. Cette dernière est même amenée à varier dans le temps et dans l'espace, dans le cadre du changement climatique. Cela peut conduire à s'interroger sur les relations complexes et variées entre « cette anomalie thermique et la diversité des types de temps qui se succèdent » (Cantat, 2004), notamment aux latitudes moyennes océaniques du fait de conditions cycloniques turbulentes. C'est pourquoi les modélisations numériques doivent pouvoir prendre en compte ces modifications thermiques variables au cours du temps et à l'échelle d'une agglomération.

### 1.3.2 Les principes de la modélisation numérique

Les systèmes de simulation atmosphérique sont des modèles numériques capables de retranscrire les mouvements atmosphériques, allant de la grande échelle méso-alpha à la micro-échelle à partir :

- d'un ensemble physique complet,
- d'un gestionnaire de fichiers flexible,
- d'un ensemble d'installations pour préparer des états initiaux, idéalisés ou interpolés à partir des analyses ou des prévisions météorologiques,
- d'une fonction de post-traitement et graphique flexible pour visualiser les résultats et un ensemble de procédures interactives pour contrôler ces fonctions (Leconte, 2015).

Certaines des caractéristiques sont différentes d'un modèle à un autre. Ainsi les principaux modèles sont les suivants :

- Le système de simulation atmosphérique Meso-NH, développé conjointement par le Laboratoire d'Aérorologie (UMR 5560 UPS / CNRS) et par CNRM (UMR 3589 CNRS / Météo-France), est basé sur un système d'équations non-hydrostatiques et anélastique (Lafore et *al.*, 1997) à aire limitée dont la physique permet de simuler des phénomènes de l'échelle synoptique (de l'ordre de 1000km) à la micro-échelle.
- Le modèle de surface SURFEX (Surface Externalisée) est une plate-forme de modélisation de surface développée par Météo-France en coopération avec la communauté scientifique. Ce modèle se compose de divers modèles physiques pour la surface terrestre naturelle, les zones urbanisées, les lacs et les océans. Il permet de simuler les processus de surface de la chimie et des aérosols. Il peut être couplé à un modèle atmosphérique (comme vu ci-dessus).
- Le modèle TEB (Town Energy Balance) de Météo France (Masson, 2000 ; Kaloustian et Diab, 2015) a été développé pour calculer les échanges d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère. Il prend en compte non seulement les spécificités du milieu bâti mais aussi les interactions et rétroactions de celui-ci sur l'atmosphère.

- Le modèle climatique tridimensionnel non hydrostatique ENVI-met (Bruse and Fleer 1998 ; Lahme et Bruse, 2003) qui permet d'observer les interactions entre la zone urbaine, la végétation et la température de l'air.

Pour plus de précision dans la simulation d'une ambiance climatique en milieu urbain, plusieurs modèles peuvent être rassemblés, comme c'est le cas dans les travaux de Diallo-Dudek (2015) qui rassemble pour une même étude les modèles Meso-NH, TEB et SURFEX.

## **P**artie 2 : Des méthodes complémentaires de traitement des températures de surface et d'air pour la caractérisation des ICU

Cette partie sera consacrée aux méthodes employées pour caractériser l'ICU lyonnais à partir de dispositifs d'investigation employés communément en climatologie locale regroupant des données issues d'images satellitaires thermiques (Landsat), des observations de terrain scientifiques et citoyennes (mesures en continu ou locales des températures et humidité) et des moyens de traitement de ces données (SIG et apport des outils statistiques).

### **2.1. Mesure des températures de surface par télédétection et mesures locales**

Le recours à la mesure satellitaire pour le calcul des températures de surface, à l'aide des satellites *Landsat* au passage synchrone (tableau 5) au-dessus de la métropole (Renard et *al.*, 2016), permet de mieux caractériser le microclimat lyonnais dans son ensemble et l'impact de son « *environnement topoclimatique sur le climat local* » (Foissard et *al.*, 2013).

Mois	Jour
Avril	Mardi 4
	Mardi 11
	Jeudi 20
	Jeudi 27
Mai	Samedi 6
	Samedi 13
	Lundi 22
	Lundi 29
Juin	Mercredi 7
	Mercredi 14
	Vendredi 23
	Vendredi 30

Tableau 5: Dates de passage du satellite Landsat 8 au-dessus de la Métropole de Lyon d'avril à juin 2017

Les données satellitaires Landsat 8 sont fournies par *USGS EROS Center*. Le jeu de données en format en 16-bits, est acquis par l'Imageur opérationnel terrestre (OLI) et le Capteur infrarouge thermique (TIRS). Les bandes infrarouges thermiques (TIRS - bande 10 et bande 11) sont livrées à la résolution de 30 mètres x 30 mètres. Trois méthodes s'offrent à nous pour l'obtention des températures de surface (Hung et *al.*, 2005), celle du canal infrarouge unique « *single channel* », la « *split window* » et une méthode jour-nuit MODIS LST, nouvelle en la matière. Ici, le choix s'est porté sur la méthode « *single channel* », qui nécessite d'avoir les valeurs de l'émissivité de la surface, un modèle de transfert radiatif précis et un profil atmosphérique. En outre, selon les commentaires des équipes du bureau des sciences du projet Landsat de l'*U.S. Geological Survey (USGS)* au centre *Earth Resources Observation and Science (EROS)* et du *National Aeronautics and Space Administration*

(NASA) au centre de la *NASA's Goddard Space Flight Center (GSFC)* ; travaillant sur la compréhension et le matériel de référence associé pour l'Observatoire L8 et ses produits de données scientifiques ; les anomalies présentes sur la bande 11 ne permettent pas d'utiliser la méthode « *split window* » (Zanter, 2016) pour récupérer les températures de surface. Par conséquent et dans cette étude, seule la bande 10, ayant une longueur d'onde plus courte, est utilisée pour examiner la variation des températures de surface (LST) grâce à l'algorithme « *single channel* ». La précision des produits Landsat 8 LST a été évaluée par Wang et al. (2015).

Pour ce fait, plusieurs étapes de calculs sont nécessaires avant d'obtenir les températures de surface pour un jour donné. Tout d'abord, les *Digital Numbers (DN)* originaux de la bande 10 ont été convertis en radiance du haut de l'atmosphère (équation 1). Par cette conversion, on réduit les interférences causées par la vapeur d'eau et les aérosols (Hu et Jia, 2009; Weng, 2009).

$$L_s = \text{Radiance Multiplier} \times \text{Bande thermique Landsat} + \text{Radiance Add} \quad (1)$$

Où la radiance du haut de l'atmosphère ( $L_s$ ) s'exprime en Watts/(m<sup>2</sup>\*srad\*µm).

Il faut ensuite procéder au calcul de la température de brillance (BT) en degré Kelvin (°K) :

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_s + 1}\right)} \quad (2)$$

Où  $K_1$  et  $K_2$  sont des constantes relatives à la température de brillance.

La troisième étape avant de pouvoir calculer les LST par l'algorithme « *single channel* » consiste à évaluer l'émissivité de la surface du sol (*Land Surface Emissivity*) en se fondant sur la méthode des seuils NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index Thresholds*). Pour ce faire, il faut déterminer le NDVI (équation 3), mais aussi l'émissivité des pixels mixtes (équation 4), proportion de végétation dans chaque pixel (équation 5) et la rugosité de surface (équation 6).

$$NDVI = \frac{\text{bande IR} - \text{bande Rouge}}{\text{bande Rouge} + \text{bande IR}} \quad (3)$$

Où IR est valeurs de pixel de la bande infrarouge proche ;

R la valeur de pixel de la bande rouge.

$$\varepsilon = \varepsilon_{v\lambda} \times P_v + \varepsilon_{s\lambda} \times (1 - P_v) + C_\lambda \quad (4)$$

Où  $\varepsilon_{v\lambda}$  est l'émissivité pixels de végétation complète, fixé à 0,99 ;

$\varepsilon_{s\lambda}$  est l'émissivité pixels de terre nue, fixé à 0,96 ;

$P_v$  est la proportion de végétation dans chaque pixel ;

$C_\lambda$  est la rugosité de surface.

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_v - NDVI_S} \right)^2 \quad (5)$$

Où  $NDVI_S$  sont toutes les valeurs du NDVI inférieures à 0,2 ;

$NDVI_v$  sont toutes les valeurs du NDVI supérieures à 0,5.

$$C_\lambda = (1 - \varepsilon_{s\lambda}) \times \varepsilon_{v\lambda} \times F' \times (1 - P_v) \quad (6)$$

Où  $F'$  est un facteur géométrique fixé à 0,55.

Enfin, pour pouvoir calculer la température de surface par l'algorithme du canal simple (équation 7a, 7b et 7c), plusieurs fonctions atmosphériques spécifiques sont nécessaires pour corriger l'influence de l'atmosphère sur les LST. Ces fonctions atmosphériques sont calculées à partir des paramètres atmosphériques à savoir la transmissivité atmosphérique ( $\tau$ ), la radiance atmosphérique ascendant ( $L^\uparrow$ ) et la radiance atmosphérique descendante ( $L^\downarrow$ ) en utilisant les équations 8a, 8b et 8c. Les paramètres atmosphériques spécifiques, pour un territoire donné sur un jour donné, peuvent être calculés au moyen d'un modèle de transfert radiatif atmosphérique (Barsi et al., 2003 ; Barsi et al., 2005). L'Algorithme du canal simple utilise également les constantes de rayonnement de Planck ; avec  $C_1 = 1,19104 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{lm}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$  et  $C_2 = 1.43877 \cdot 10^4 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$  et la longueur d'onde effective ( $\lambda$ ) de la bande LANDSAT TM / ETM + 10, soit 10800 nanomètres (USGS, 2016).

$$LST = \gamma \left( \frac{1}{\varepsilon} (\Psi_1 L_s + \Psi_2) + \Psi_3 \right) + \delta \quad (7a)$$

$$\gamma = \left\{ \frac{c_2 L_s}{T_s^2} \left[ \frac{\lambda^4 L_s}{c_1} + \frac{1}{\lambda} \right] \right\}^{-1} \quad (7b)$$

$$\delta = -\gamma \cdot L_s + T_s \quad (7c)$$

$$\Psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad (8a)$$

$$\Psi_2 = -L^\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau} \quad (8b)$$

$$\Psi_3 = L^\downarrow \quad (8c)$$

Si l'on prend en compte toutes les données satellitaires de Landsat s'offrant à nous, nous pouvons recueillir des informations sur la Métropole de Lyon depuis les années 2000 (tableau 6).

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
2000								L7 on (1)	L7 on (1)	L7 on (1)		
2001			L7 on (1)			L7 on (1)	L7 on (1)	L5 (1)	L7 on (1)	L7 on (2)		
2002				L7 on (1)		L7 on (1)	L5 (1)		L7 on (1)	L7 on (2)		
2003					L7 on (1)		L5 (2)	L5 (3)	L5 (1)			
2004					L5 (1)	L5 (2)						
2005						L5 (1)						
2006						L5 (1)						
2007												
2008												
2009												
2010												
2011				L5 (1)								
2012												
2013				L8 (1)			L8 (2)	L8 (3)	L8 (1)			
2014				L8 (1)	L8 (2)		L8 (1)		L8 (1)			
2015				L8 (1)			L8 (2)	L8 (4)				
2016		L8 (1)						L8 (2)	L8 (1)			
2017				L8 (1)	L8 (1)							

**Tableau 6: Répartition des données Landsat de 2000 à 2017 sur la Métropole de Lyon (le chiffre entre parenthèse indique le nombre de passage de Landsat par mois)**

Comme il peut être constaté, les données disponibles ne sont pas réparties de façon homogène sur toute la plage d'observation. L'étendue serait plus complète si les données issues du satellite Landsat 7 *scanline-off* pouvaient être traitées (Annexe 1). Cependant, la donnée est défectueuse et doit profondément être traitée avant analyse (figure 13), ce qui fera partie de mon doctorat.

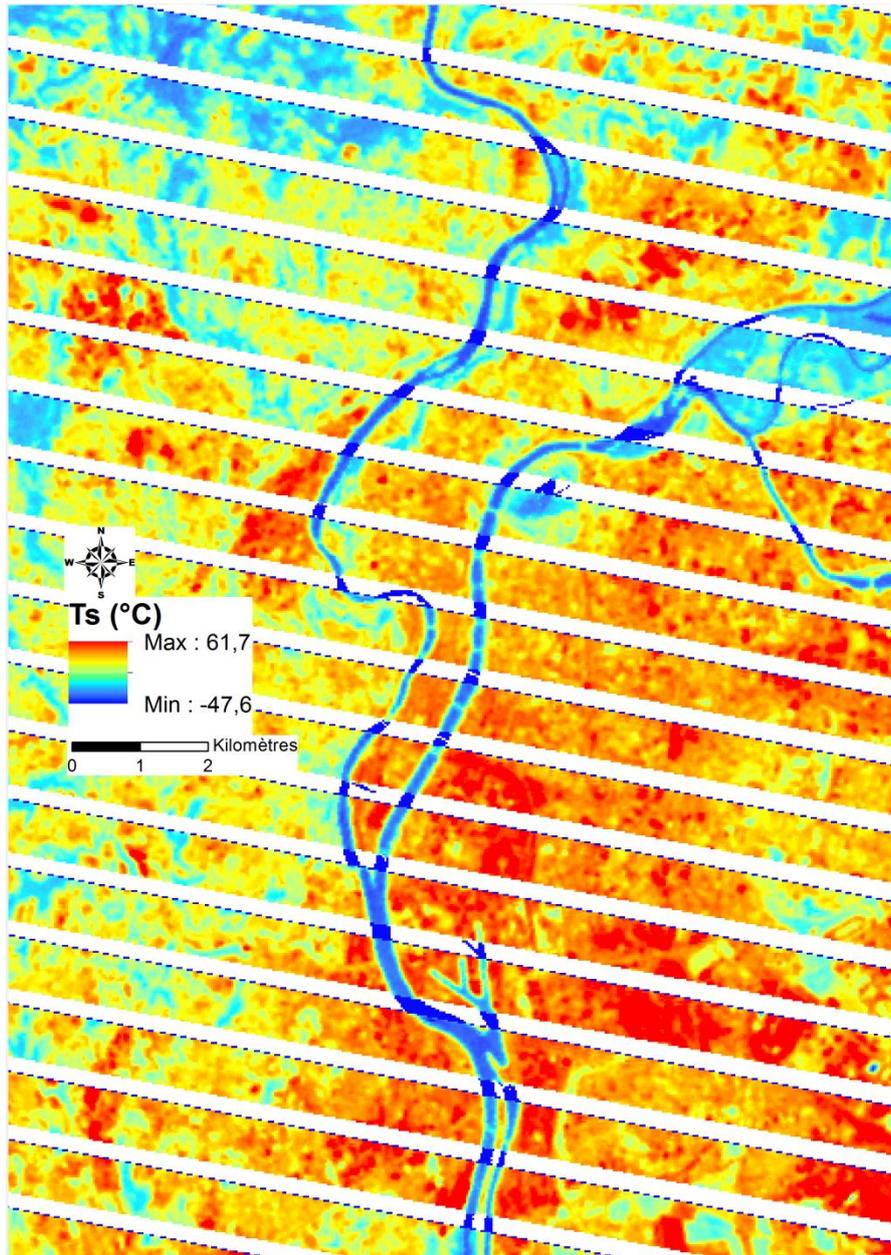


Figure 13: Visualisation des données de températures de surface (°C) le 08 juin 2006 à 12h 19 issue du satellite Landsat 7-off - Source USGS

En regard de cette base de données satellitaire disponible, les températures de surface varient sur une dimension spatiale très restreinte. La figure 14 montre clairement qu'en l'espace de quelques centimètres et entre températures à l'ombre et température au soleil et entre les différents revêtements du sol, on peut avoir plusieurs degrés d'écart :

- 29°C sur du bitume à l'ombre, 37°C au soleil
- Au soleil, 57 °C sur les carrosseries des voitures, 40°C sur les pierres de taille de bordure de trottoir, 37 °C sur du bitume et 23°C sur des espaces végétalisés.



Figure 14: Différentes températures de surface (°C) suivant le revêtement ou l'exposition au soleil

Il est donc nécessaire d'avoir recours à des températures de surface plus fines que celles issues de la mesure satellitaire. Pour cela, la température au sol peut être recueillie par le biais de mesures locales grâce à des thermo-hygromètres portatifs HVAC+ (figure 15) d'une précision de l'ordre de +/- 0,5°C en ce qui concerne la prise de mesures de température de l'air, de +/- 1°C pour celle de la température de surface et enfin de +/- 3% pour l'humidité. Le thermomètre infrarouge HVAC+ est un outil idéal pour relever rapidement la température superficielle d'une surface.



Figure 15: Thermo-hygromètre et thermomètre infrarouge de précision HVAC+

## 2.2 Mesure de la température de l'air par mesures mobiles

Comme citées précédemment, les mesures mobiles viennent affiner et préciser les mesures satellitaire Landsat, disponible seulement à une résolution de 30 m x 30 m sur le territoire lyonnais. Tout d'abord, des mesures mobiles de températures ont été effectuées durant la période estivale 2016 (juillet et août) ainsi que durant la période printanière 2017 (avril-juin) Ces mesures ont été effectuées le long d'un transect d'environ 20 kilomètres à travers la ville de Lyon. Ce parcours traverse onze sites d'intérêt préalablement définis en raison de leurs morphologies urbaines (forte minéralisation, forte végétalisation, proximité d'un cours d'eau ou d'un espace vert, secteurs industriels, centre ancien, etc. ; figure 16). Cette étude a pour but de relier l'intensité des ICU aux caractéristiques du milieu urbain (Brandsma et Wolters, 2012).

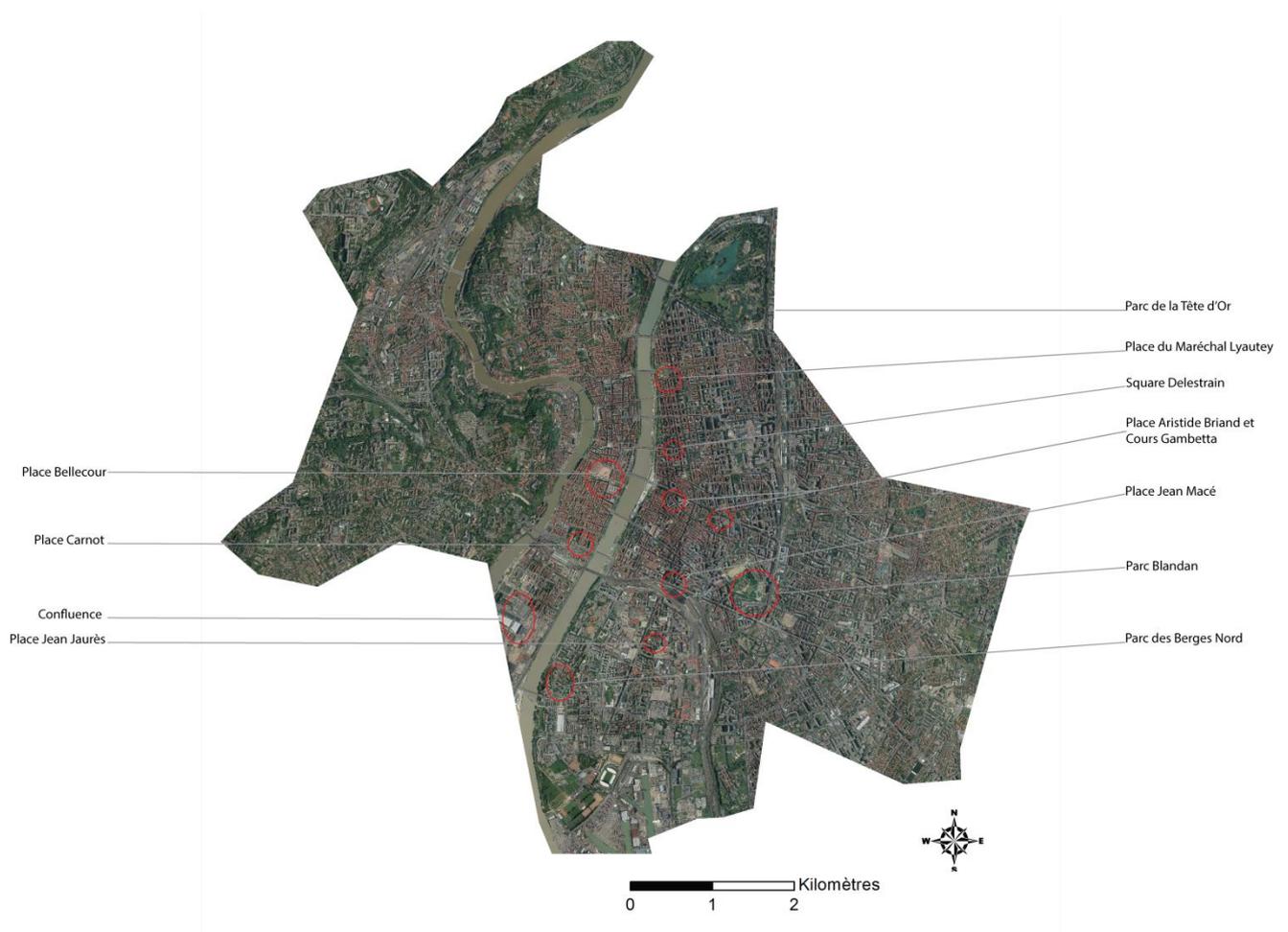


Figure 16: Lieux de passage sélectionnés à partir l'ortho-photographie 8 cm – source Data Grand Lyon

Ces transects sont à la fois effectués en période diurne et en période nocturne. Les mesures s'effectuent à l'aide d'un enregistreur de température (EL-USB-1-RGC-JM, résolution +/- 0,1°C, précision +/- 1°C, intervalle minimum d'enregistrement 1 seconde – figure 17) et d'un enregistreur de température et d'humidité relative (LOG 32-NJM, résolution température +/- 0,1°C, résolution

humidité +/- 0,1%, précision température +/- 1°C, précision humidité +/-3% de 40 à 60% et +/- 3,5% de 20 à 40%, précision point de rosé de +/- 2°C, intervalle minimum d'enregistrement 2 secondes – figure 18), protégés tous deux de la radiation solaire et des intempéries par un abri météo (figure 19). Ce dispositif est ensuite fixé dans le panier du Vélo'V (figure 20). Les points de mesures sont géolocalisés à l'aide d'un GPS de précision Garmin 64S (récepteur GPS/GLONASS haute sensibilité avec antenne Quad Helix).



Figure 17: Enregistreur de température EL-USB-1-RGC-JM



Figure 18: Enregistreur de température et d'humidité LOG 32-NJM



Figure 19: Abri antiradiation



Figure 20: Dispositif de mesures embarqué à l'intérieur d'un panier à Vélo'V

Par la suite, les données obtenues vont être traitées suivant trois étapes :

- La détermination de l'équation d'une droite polynomiale suivant l'augmentation des températures durant la journée à partir des données recueillies par la station de l'ENS (Ecole Normale Supérieure) de Lyon située à proximité de la station de métro de Debourg. Cette

station météorologique a été préférée à la station de Météo-France de Bron et de Saint-Exupéry car elle est au centre de la ville de Lyon. Cette localisation correspond davantage à nos mesures car elle se situe en milieu urbain et elle est plus proche géographiquement des mesures que nous avons effectuées.

- Le réajustement par rapport à une heure de référence : les températures obtenues sont corrigées à l'heure de la journée où la température est la plus chaude pour les campagnes diurnes. Pour les mesures nocturnes, l'heure retenue est H+2 suivant le coucher du soleil.
- La correction des données par rapport à la station de référence de l'ENS : sur la période d'observation, la température est amenée à varier. Il est donc nécessaire d'effectuer un réajustement par rapport à l'heure de référence choisie à partir des mesures relevées par la station météorologique de l'ENS selon l'équation 9 :

$$T_{i \text{ corrigée}_{HC}} = T_{i_{ENS HC}} - [T_{ENS Hm} - T_{i Hm}] \quad (9)$$

Cette même correction est opérée en ce qui concerne les données d'humidité relative et celles récoltées par les bénévoles lors des campagnes participatives de mesure de température.

### 2.3 Mesure de la température de l'air par participation citoyenne

Deux campagnes de mesures participatives de températures sur Lyon ont été menées dans le cadre de ce mémoire, le 13 avril et le 29 mai 2017. D'une manière optimale, ces événements de sciences participatives doivent être en corrélation avec le passage du satellite Landsat au-dessus de Lyon, ce qui fut le cas pour celle du 29 mai. Cependant, ce recoupement n'est pas toujours évident à mettre en place à cause des disponibilités de chacun. Le recrutement des volontaires a été permis grâce aux collaborations avec différentes associations de développement durable actives sur le secteur d'étude :

- L3DD (Lyon 3 Développement Durable) : une association étudiante rattachée à l'Université Jean Moulin Lyon 3
- Objectif 21 : également une association étudiante, faisant partie de l'INSA de Lyon.
- Anciela : une association indépendante qui accompagne les engagements et les initiatives des citoyens en faveur d'une société plus écologique et solidaire. .

Il est primordial d'avoir un *modus operandi* scientifique parfaitement prédéfini afin de mener à bien ce genre de campagne de mesure participative et faire en sorte que les données produites soient exploitables par la suite. Tout d'abord et après avoir pris conscience et connaissance de la problématique à l'aide d'une présentation effectuée par M. Renard et moi-même, les participants sont priés de réaliser une carte mentale thermique sur la ville de Lyon à partir d'un fond de carte ne présentant que le tracé viaire, le Rhône et la Saône (figure 21). Les cartes mentales permettent d'organiser intuitivement les informations ciblées mais aussi de les partager facilement.



Figure 21: Carte mentale destiné aux participants des campagnes participatives de mesures de température

Par la suite, il leur est demandé de choisir des points de passages préalablement sélectionnés par nos soins de par leur intérêt dans l'ambiance thermique dégagée mais également au vu de leur intérêt culturel ou leur référence emblématique sur la ville de Lyon, ce qui facilite l'appropriation du cheminement par les bénévoles (figure 22).



Figure 22: Lieux emblématiques et sites d'intérêt sur Lyon à choisir par les participants-bénévoles

Une fois sur le terrain, les participants ont pour consignes de récolter des données de températures de l'air et d'humidité, grâce au dispositif SMARTHY, d'une précision de l'ordre de +/- 1°C pour la température et de +/- 5% pour l'humidité relative (figure 23), ainsi que des mesures de température du sol par le dispositif HVAC+ utilisé précédemment lors des mesures itinérantes à vélo. Il leur est demandé de prendre ces mesures à tous les croisements et milieux d'îlots et, si possible, à l'ombre. Pour les mesures de températures de surface, il est en outre demandé de la relever sur milieu de chaussées.

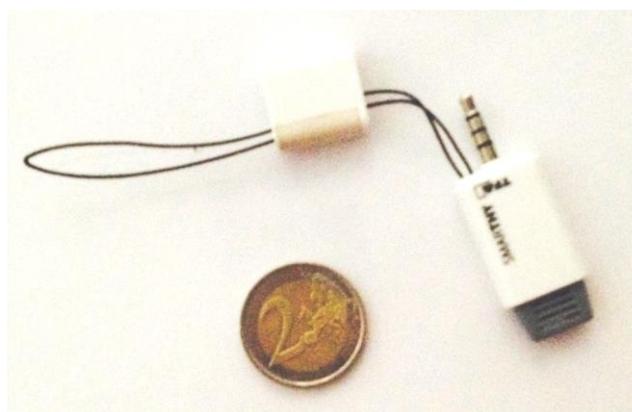


Figure 23: Dispositif SMARTHY de prise de mesures de température et d'humidité relative

En outre, le samedi 10 juin dernier, un workshop (focus groupe) de sensibilisation et recrutement de volontaire a été menée sur le village éphémère All Terre Nativ' (programmation en annexe 2-a et annexe 2-b). Ce village créé par un collectif d'étudiants de MADE iN Sainte Marie Lyon proposait des ateliers interactifs et attractifs autour de modes de vie alternatifs et d'une mobilisation de la société face aux défis du changement climatique. Cette journée a été, dans le cadre de ce stage, le moyen de faire connaître ces nouveaux événements de recherche participative sur Lyon autour de la réalisation collective d'une carte mentale thermique de leur environnement proche (Annexe 3) et d'une découverte des outils de mesures utilisés lors de ces journées.

Cette récolte dense de données, aussi bien à partir des transects à vélo que par les campagnes participatives, doit être vérifiée mais également interprétée à l'aide d'outils intégrés dans un système d'information géographique et statistiques.

## 2.4 L'interprétation des données à l'aide d'interpolation spatiale et de traitements statistiques

### 2.4.1 Méthodes d'interpolation spatiale de la température et de l'humidité relative

L'interpolation spatiale est un processus permettant d'estimer la valeur d'une variable en un site à partir des valeurs de la même variable mesurée en des points voisins (Renard, 2010 ; Bosser, 2013, entres autres). Il n'existe pas de méthode unique d'interpolation qui peut être appliquée à toutes les situations. Il est nécessaire de comparer les résultats afin de trouver la méthode la plus appropriée au site à la configuration du réseau de mesure.

Ce besoin, s'applique à de nombreux domaines où la connaissance de la distribution spatiale de phénomènes est importante comme l'altimétrie, la gravimétrie, la géologie, la minéralogie, la météorologie ou encore bien d'autres. Dans notre cas, c'est-à-dire dans l'explication des variations de températures sur le territoire lyonnais, le recours à l'interpolation spatiale permet de « *reconstituer les champs thermiques (minima et maxima)* » (Fury et Joly, 1995) sur des espaces finement carroyés.

Les méthodes d'interpolation spatiale sont divisées en deux grandes catégories : la première dite déterministe et la seconde dite stochastique (Arnaud et Emery, 2000). Ces deux grandes familles de techniques d'interpolation sont elles-mêmes divisées en sous catégories de par leur méthode de traitement. Ainsi, ici, nous allons utiliser plusieurs méthodes appartenant dans un premier temps aux techniques stochastiques :

- Le krigeage ordinaire ;

puis plusieurs techniques barycentriques pour la méthode d'interpolation déterministe, à savoir :

- L'inverse de la distance (IDW).
- L'interpolation polynomiale globale
- L'interpolation polynomiale locale
- Les splines, avec la sous-catégorie des *Radial Basis Function* (RBF).

Que ce soit dans l'utilisation de la méthode du krigeage, de l'interpolation polynomiale locale ou globale, de l'IDW ou des splines, l'altitude sur la température à Lyon est négligeable. En théorie on ne perd que 0,65°C tous les 100 mètres (Vigneau, 2015). La ville de Lyon varie environ de 160m à 305m d'altitude (au plus haut sur la colline de Fourvière).

Au vu du nombre important de techniques d'interpolation spatiale disponibles, il semble nécessaire d'effectuer une analyse de sensibilité pour pouvoir sélectionner celle explicitant au mieux les variations spatiales thermiques. Celle-ci est effectuée sur la moyenne des températures annuelles de 2013 sur le territoire de la Métropole de Lyon. Cette année a été choisie depuis le nombre de passages de Landsat analysables (7).

#### ***2.4.1.1 Interpolation spatiale à l'aide de krigeage ordinaire***

Le krigeage est une procédure géostatistique qui génère une surface estimée, à partir d'un ensemble dispersé de points avec des valeurs à estimer (Olivier, 1990). Cette méthode d'interpolation est basée sur des modèles statistiques comprenant l'autocorrélation et non sur une interpolation dite déterministe comme vu précédemment. La technique de krigeage présuppose que la distance, ou la direction liant les points d'échantillonnage, reflète une corrélation spatiale pouvant expliquer les variations de la surface. Il déduit, par pondération des relevés existants, les valeurs probables d'emplacements non métrés. Par conséquent, le krigeage procède en deux étapes :

- Il crée les variogrammes et les fonctions de covariance pour évaluer les valeurs de dépendance statistique (appelée autocorrélation spatiale), dépendant du modèle d'autocorrélation.
- Il estime les valeurs inconnues.

#### ***2.4.1.2 Tracé à l'aide d'un IDW (Inverse Distance Weighting)***

L'interpolation par l'inverse de la distance (IDW) détermine les valeurs de cellule via la combinaison pondérée de manière linéaire d'un ensemble de points d'échantillonnage. Elle est fonction de l'inverse de la distance. Cette méthode d'interpolation suppose que l'influence de la variable tracée décroît avec la distance par rapport à l'emplacement échantillonné. L'IDW donne de meilleurs résultats lorsque l'échantillonnage des points en entrée n'est pas clairsemé ou irrégulier, les résultats peuvent ne pas suffisamment représenter la surface souhaitée (Watson et Philip, 1985).

#### ***2.4.1.3 Tracé à l'aide d'une interpolation polynomiale globale***

Cette interpolation, encore appelé régression classique, est une méthode stochastique qui suppose que la variable étudiée soit aléatoire et régionalisée. Par le biais de l'application d'une équation polynomiale de second ou troisième degré, les données à estimer sont ajustées à une surface. Cette dernière est ajustée aux valeurs de températures de surface par, généralement, la

technique des moindres carrés. Cette technique d'interpolation est efficace quand les champs varient lentement.

Cette méthode lisse fortement les variations et disparités locales et représente plutôt une variabilité globale des températures de surface sur le territoire de la Métropole de Lyon. Cette méthode est aussi appelée « *surface de tendance (trend surface)* » (Arnaud et Emery, 2000).

#### **2.4.1.4 Tracé à l'aide d'une interpolation polynomiale locale**

Cette méthode suit la même ligne directrice qu'en régression classique. En revanche, elle « *permet de diminuer l'impact sur l'interpolation en un point  $s_0$  des observations éloignées de ce point* » (Baillargeon, 2002). Elle est encore appelée « *régression kernel* » ou « *régression pondérée géographiquement* » (Arnaud et Emery, 2000). En d'autres termes, plus une valeur de températures de surface a été mesurée loin du point à estimer, moins celle-ci aura d'influence (jusqu'à une certaine distance où elle n'aura plus d'impact du tout).

#### **2.4.1.5 Tracé à l'aide d'une méthode particulière des splines**

Les fonctions de base radiale (*Radial Basis Function* - RBF) représentent un cas particulier de splines. Arnaud et Emery (2000) définissent les splines comme « *une famille de fonctions régulières minimisant en général l'énergie de flexion sous des contraintes d'ajustement à des données ponctuelles sont une série de techniques d'interpolation exacte qui impliquent le passage de la surface par chaque valeur d'échantillon mesuré* ». Il existe cinq fonctions de base différentes :

- Spline de plaque fine
- Spline avec tension
- Spline entièrement régularisée
- Fonction multiquadratique
- Fonction multiquadratique inverse

Chaque fonction de base présente une forme différente et produit une surface d'interpolation différente. En tant qu'interpolateurs exacts, les méthodes RBF diffèrent des interpolateurs polynomiaux globaux et locaux qui sont tous deux inexacts et n'exigent pas que la surface passe par les points mesurés. Les méthodes RBF peuvent prévoir des valeurs supérieures et inférieures aux valeurs mesurées maximum et minimum. Elles permettent donc de produire des surfaces lisses à partir d'un grand nombre de points de données. Les fonctions produisent des résultats satisfaisants pour des surfaces aux gradients sans discontinuité marquée.

Les méthodes RBF sont formées à chaque emplacement de données. Une fonction RBF évolue en fonction de la distance par rapport à un emplacement. La valeur de chaque fonction de base radiale à l'emplacement de prévision dépend simplement de la distance par rapport à chaque

emplacement de données. La mesure de prévision résulte de la moyenne pondérée. Ensuite, la surface passe par les valeurs de données, garantissant ainsi l'exactitude des prévisions.

Pour toutes les méthodes RBF, à l'exception de la fonction multiquadratique inverse, plus la valeur du paramètre est élevée, plus la carte est lisse. Pour la fonction multiquadratique inverse, le contraire se produit. Cette technique simple d'interpolation présente l'avantage de « *combiner une dépendance linéaire sur les poids variables avec des relations explicitement non linéaires* » (Broomhead et Lowe, 1988).

La validation croisée issue de cette méthode est présentée en figure 24 et sa carte d'interpolation spatiale en figure 25. Par le grand nombre de points de mesures disponibles (un point tous les 30 mètres), les résultats des méthodes d'interpolation spatiale ne sont que peu amenés à varier et les mesures prédites sont bien corrélées à celles mesurées (avec un coefficient de détermination de 0,99). Dans le cadre de ce mémoire, l'interpolation spatiale est utilisée non pas pour interpoler les mesures de température de surface mais pour représenter et caractériser les isothermes sur ce territoire d'étude.

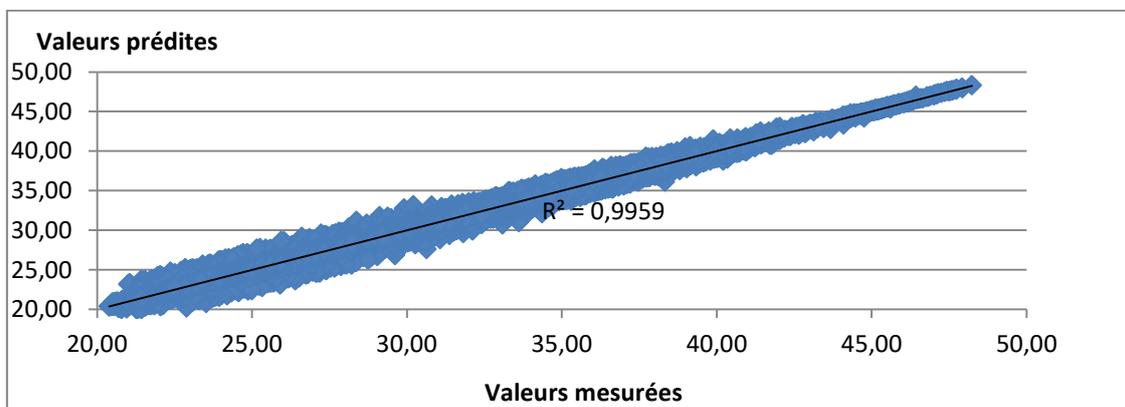


Figure 24: Nuage de point issue de la validation croisée depuis l'outil RBF à partir des données de la moyenne des températures annuelles 2013 sur le territoire de la Métropole de Lyon

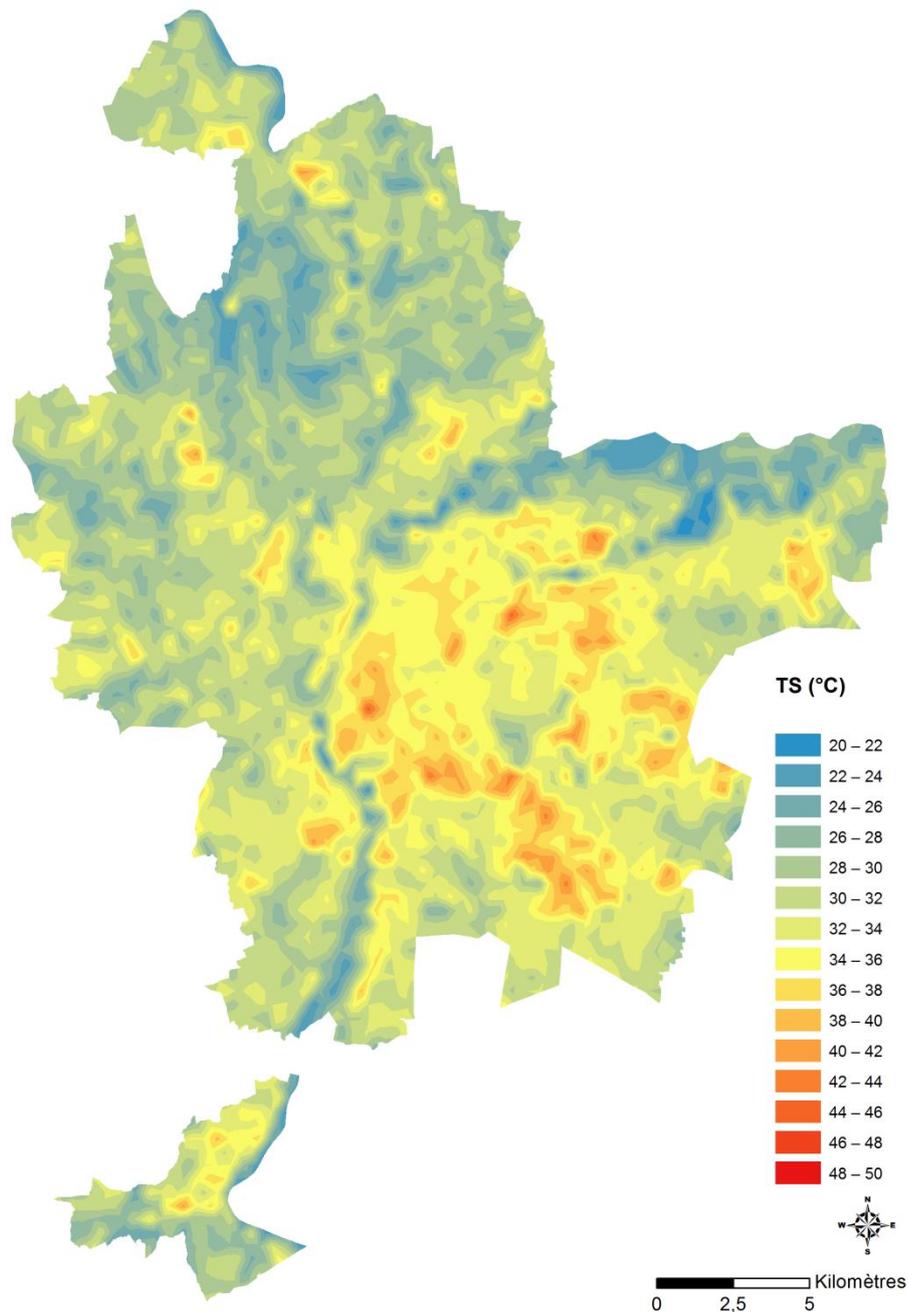


Figure 25: Interpolation spatiale de la moyenne des températures annuelles 2013 sur le territoire de la Métropole de Lyon par la méthode RBF

*In fine*, cette analyse de sensibilité sur ces méthodes d'interpolation de nature différente nous permet de sélectionner la *Radial Basis Function*. Par cette méthode particulière des splines, nous n'avons ni besoin d'avoir des données normalement distribuées ni que celles-ci proviennent d'un processus stochastique stationnaire. Cette méthode se rapproche de l'esprit de celle de la technique de dessin industriel *spline* par règles souples (Arnaud et Emery, 2000). De plus, elle met plus en avant les extrêmes de températures, notamment en Presqu'île et en rive gauche du Rhône (des extrêmes thermique plus chaud au niveau des quartiers de Gerland, de Jean Macé, de la Part-Dieu et dans le 6ème arrondissement ainsi que des extrêmes thermique plus frais vers les berges du

Rhône et les parcs de Parilly et de la Tête D'Or), très utiles dans l'observation d'îlot de chaleur urbain et dans leur compréhension.

#### **2.4.2. La régression linéaire entre les différentes méthodes d'appropriation des températures de surface et celles de l'air.**

L'analyse de données environnementales s'appuie souvent sur une démarche empirique. Cependant, on recherche toujours à se rapprocher le plus exactement de la réalité. Sur une série de données temporelles, il est nécessaire de savoir détecter une possible rupture ou dérive temporelle. L'analyse de données repose donc sur l'analyse de mesures puisqu'il s'agit d'un moyen technique au service de toutes les sciences de l'observation.

Les modèles linéaires permettent d'expliquer les relations entre deux variables sélectionnées. Nous disposons des données de températures de surface issues du satellite Landsat et celles provenant du HVAC. Les données de températures de l'air émanent des dispositifs SMARTHY ainsi que des deux types d'enregistreur de température à notre disposition.

Pour étudier la relation entre ces deux types de variables quantitatives, on peut tracer un nuage de points pour *in fine*, calculer le coefficient de détermination linéaire ( $R^2$ ) entre ces deux variables, c'est-à-dire l'adéquation du modèle issu d'une régression linéaire simple, variant de 0 à 1. Le nuage de points peut être résumé par une droite que l'on appellera la droite de régression linéaire simple. C'est le cas le plus simple de modèle linéaire, qui permet d'expliquer une variable quantitative en fonction d'une autre variable quantitative.

# **P**artie 3 : Des résultats prometteurs liées à l'utilisation de méthodes complémentaires

Les agglomérations souffrent de plus en plus du phénomène d'îlot de chaleur urbain, c'est un fait. La plupart des études antérieures, réalisées ces dernières années sur Lyon, ont porté sur de la modélisation des conditions atmosphériques (Diallo-Dudeck, 2015) ou seulement sur une démarche exploratoire de recherche participative sur le climat (projets EPOC et Ma ville, mon climat et moi). Cette partie est consacrée à présenter les résultats d'une démarche comparative entre plusieurs méthodes de caractérisation des ICU. L'objectif est de définir des méthodes de descente d'échelle adaptées à l'étude des impacts des ICU.

## **3.1. Des dynamiques thermiques journalières, diurnes et nocturnes misent en évidence à l'aide de techniques supplétives**

Cette partie permet de mettre en évidence les différences de température et les amplitudes thermiques observables au sein du territoire d'étude. La caractérisation de ces gradients de température est rendu possible grâce à l'utilisation de techniques de mesure complémentaires : la télédétection, les mesures mobiles en continues et les mesures ponctuelles lors de campagnes de mesure participatives

### **3.1.1. La mise en évidence de variations de température de surface remarquables**

#### ***3.1.1.1 L'analyse des données satellitaires Landsat***

Les mesures satellitaires de températures de surface nous aident quant à l'observation de pôle de chaleur ou de fraîcheur sur le territoire de la ville de Lyon. Cette visualisation est un premier moyen de délimitation des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains, comme nous l'indique le passage de Landsat 8 le 30 août 2016 à 12h29. La figure 26 présente la surface de la toute la dalle d'acquisition du satellite. Les températures négatives correspondent aux nuages présents à ce moment même. En revanche on peut remarquer que cette nébulosité n'empêche pas l'acquisition des données sur le territoire de la Métropole de Lyon..

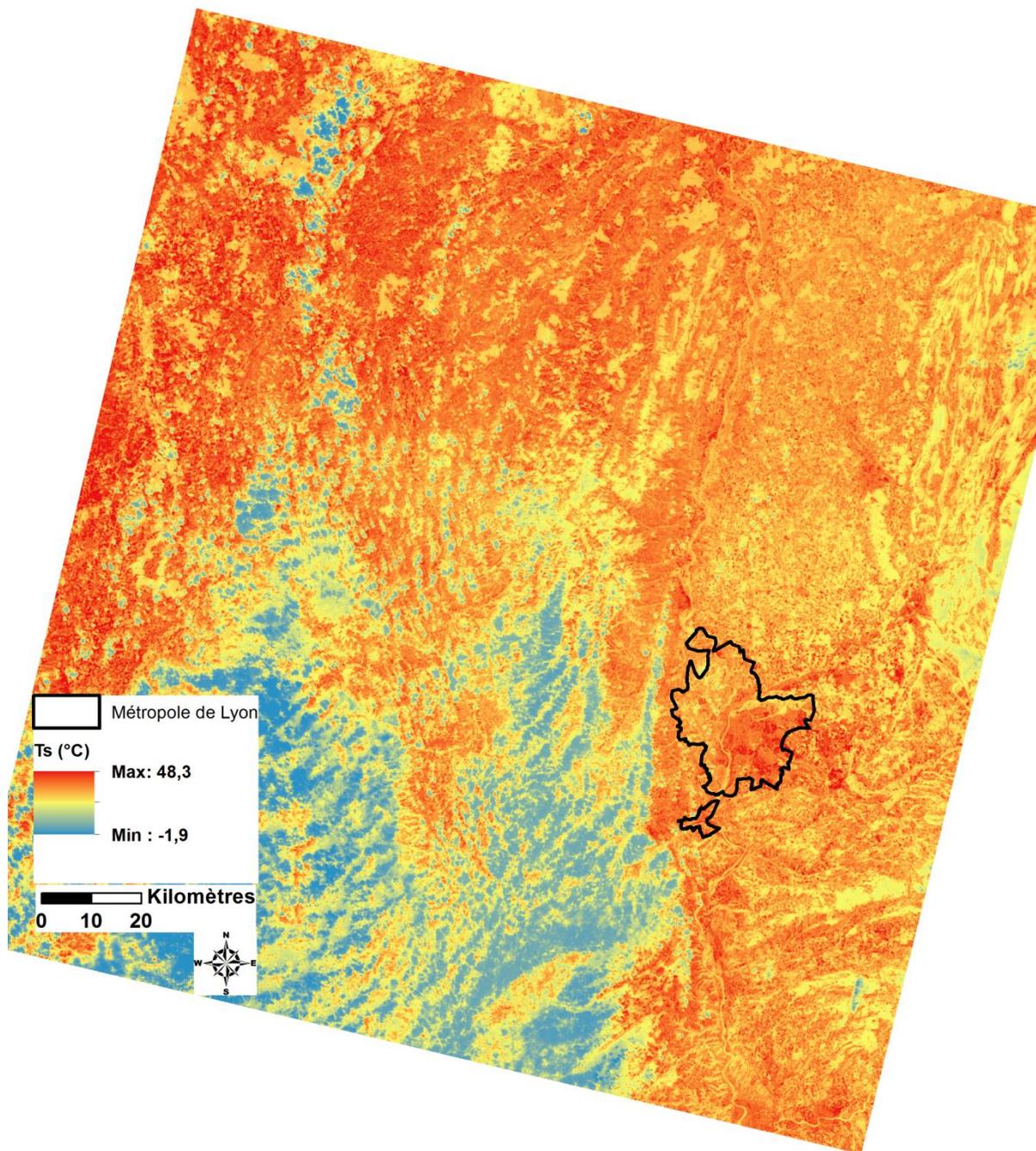


Figure 26: Températures de surface (°C) le 30 août 2016 à 12h29 – source USGS

La moyenne des températures de surfaces de la Métropole de Lyon sur l'année 2016 (7 épisodes traités – figure 27) permet de mettre en évidence des espaces chauds ; le quartier de la Part Dieu (38,9°C), les activités industrielles du sud-est du 7<sup>ème</sup> arrondissement (jusqu'à 42,9°C) et celles de l'est de la Métropole de Lyon (jusqu'à 45,9°C), les principales zones commerciales du territoire telles que celle située à Saint-Priest (jusqu'à 46,8°C) ou encore dans le 9<sup>ème</sup> arrondissement (jusqu'à 47,1°C) ; et des espaces plus frais ; les parcs urbains comme le parc de la Tête d'Or (au plus frais 28,2°C à proximité du lac), les cours d'eau comme le Rhône (environ 24,8°C à la confluence du Rhône et de la Saône) et l'ouest lyonnais où à proximité de Limonest la température est descend jusqu'à 24,7°C.

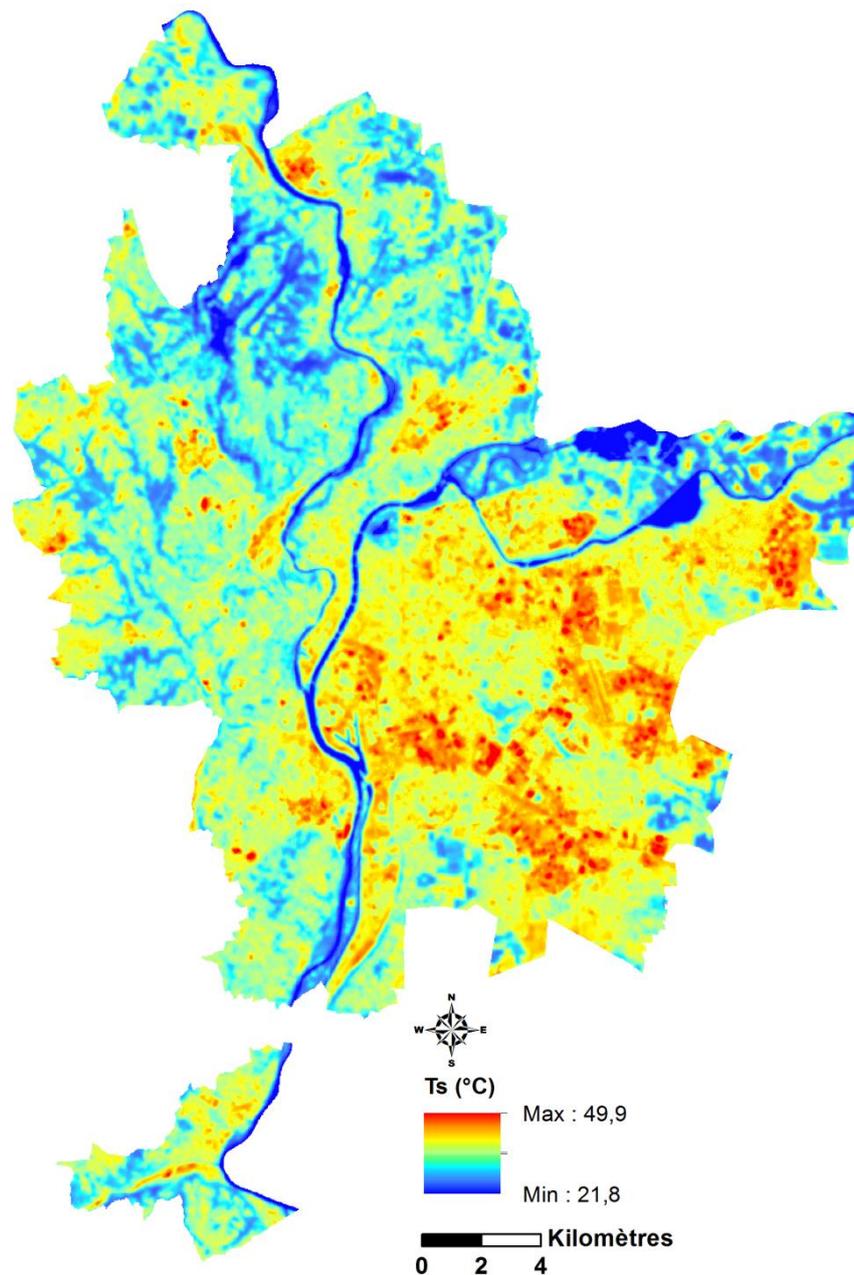


Figure 27: Moyenne annuelle 2015 des températures de surface (°C) – source USGS

La moyenne estivale des températures de surface de cette même année (6 épisodes traités – figure 28) nous permet d’observer les mêmes tendances que celles sur la moyenne annuelle. La différence réside dans le fait que les températures moyennes estivales minimales ou maximales sont plus élevées. Les cours d'eau et les rivières sont naturellement les plus frais (24,4 °C à proximité du parc de Miribel-Jonage), ainsi que les espaces boisés situés au nord-ouest de la ville (28,3°C au nord-ouest de Poleymieux-au-Mont-d’Or). Le centre-ville avec les zones résidentielles présente des températures de surface plus élevées (40,8°C en Presqu’île entre Perrache et Bellecour), tout comme les parties de l'agglomération dédiées aux activités industrielles (47,7°C au niveau de la fonderie de Vénissieux ou encore 47,4°C rue Feuillat, à proximité des établissements de formation aux métier du bâtiment) surtout à l'est (50,5°C à proximité de l’aérodrome de Bron) et au sud-est (52°C sur celles situées à Moins). Le couloir de la chimie, situé sur la rive gauche du fleuve au sud de la Métropole de

Lyon, est également l'une des parties les plus chaudes, avec une température de surface atteignant 52,7°C sur les industries de Feyzin. En outre, on remarque que les réseaux de routes et de rails présentent fréquemment des températures plus chaudes que l'environnement résidentiel (environ + 12°C). Les champs non cultivés sont plus chauds que la zone boisée et les prairies, parfois jusqu'à 10°C de plus comme entre ceux situés à Corbas et il peut être remarqué que le terrain de golf du *Golf Blue Green Grand Lyon Chassieu* est de 15°C plus chaud que la zone boisée située à proximité.

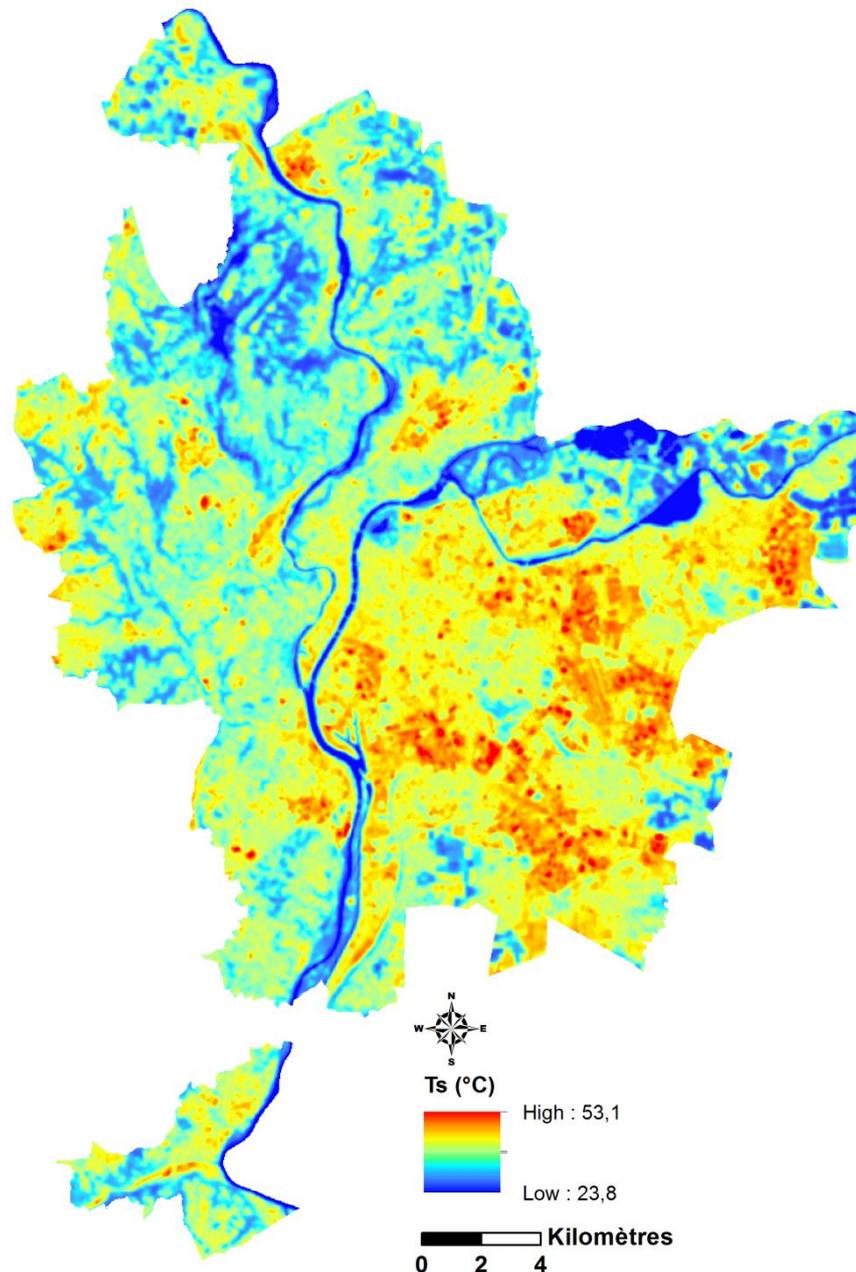


Figure 28: Moyenne estivale 2015 des températures de surface (°C)– source USGS

Lorsqu'on ne se consacre qu'au territoire de la ville de Lyon (figure 29), ces températures moyennes estivales de surface de l'année 2015 mettent en évidence dans un premier temps l'effet rafraîchissant des deux principaux cours d'eau, le Rhône et la Saône, et de leurs bancs de végétation

par rapport aux zones résidentielles (jusqu'à -10°C). On peut clairement voir les effets refroidissants des petits espaces urbains boisés à la place Carnot (36,9 °C), à la place Maréchal Lyautet (34,1°C) ou place Jean Macé (37,2°C), parc de la Tête d'Or (28,3°C), du parc des Hauteurs (30,1°C) et des jardins de la Rosaire (jusqu'à 29,5°C). Dans un deuxième temps on constate l'effet réchauffant de la gare de Jean Macé, des diverses activités industrielles plus au sud (par exemple 44,7°C au niveau de la zone industrielle et commerciale de Vénissieux).

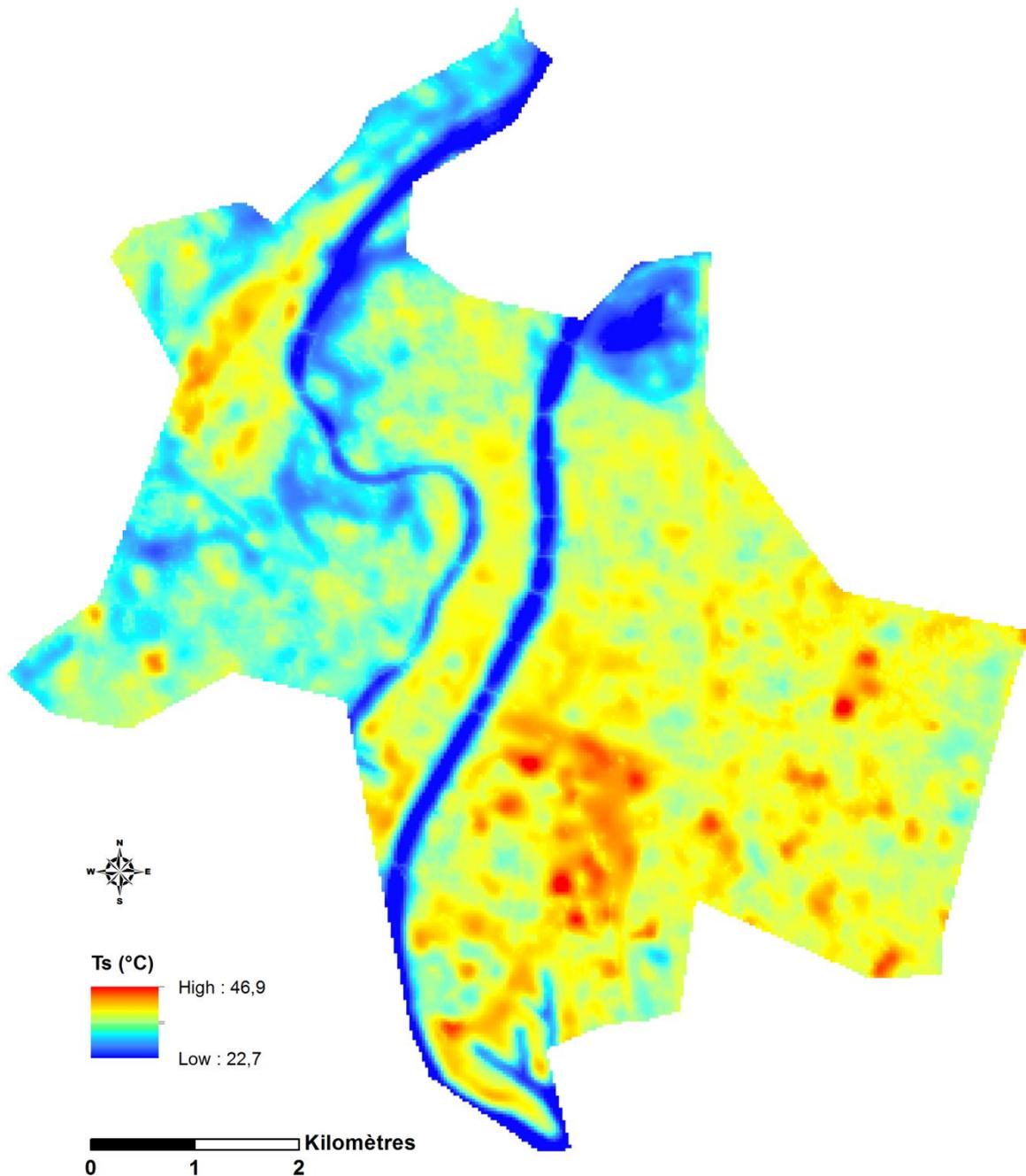


Figure 29: Moyenne estivale 2015 des températures de surface sur la ville de Lyon (°C)  
– source USGS

Les observations de télédétection apparaissent comme incontournables en tant que source de données d'entrée dans l'identification des îlots de chaleur urbains. Cependant elles restent insuffisantes quant à une utilisation unique. En effet, la résolution de Landsat 8 (30 m x 30 m) ne permet de saisir par exemple les corridors de fraîcheur des rues du quartier historique du 5<sup>ème</sup> arrondissement de Lyon. Dans ces lieux-là, seuls des mesures fines locales permettent de saisir ces températures.

### 3.1.1.2 La relation entre valeur du NDVI et températures de surface

L'indice de végétation normalisé (NDVI), compris entre -1 et 1, est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation. Chen et *al.* (2006) donne différentes valeurs de NDVI suivant le type de couverture du sol (tableau 7). Plus largement, les valeurs négatives correspondent aux surfaces autres que les couverts végétaux et les valeurs les plus élevées correspondent aux couverts les plus denses. Pour les sols nus et l'eau, l'indice NDVI est proche de 0.

	NDVI
Zone bâtie	<0,2
Zone nue	<0,2
Végétation	>0,2
Eau	<0
Zone cultivée	>0,2

Tableau 7: Gammes de valeurs du NDVI pour différents types d'utilisation ou couverture du sol

Dans de nombreux travaux scientifiques (Chen et *al.*, 2006 ; Buyadi et *al.*, 2014 ; Foissard et *al.*, 2013 *etc.*), plus cet indice est élevé, plus la température de surface diminue. Pour caractériser cette tendance sur le territoire de la Métropole de Lyon, nous avons choisi un épisode en été, le 4 juillet 2015. Ce jour-là passait le satellite Landsat 8 au-dessus de la zone d'étude. Ainsi, de par les figures 30 et 31 représentant respectivement le NDVI et variant de -0,10 à 0,61, et les températures de surface s'étendant de 10,1°C à 53,6°C, nous pouvons observer cette relation de dépendance entre ces deux sources de données. Notamment, nous remarquons un NDVI très fort à l'ouest lyonnais (jusqu'à 0,61 aux Monts d'Or) et une température de surface très fraîche pour le même espace (descendant jusqu'à près de 10°C seulement).

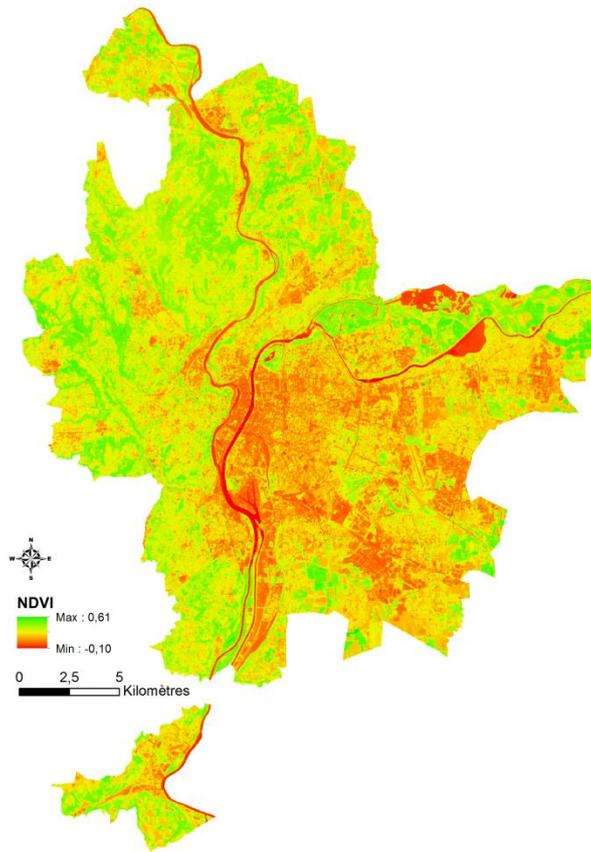


Figure 30 : NDVI de la Métropole de Lyon le 04 juillet 2015 - source USGS

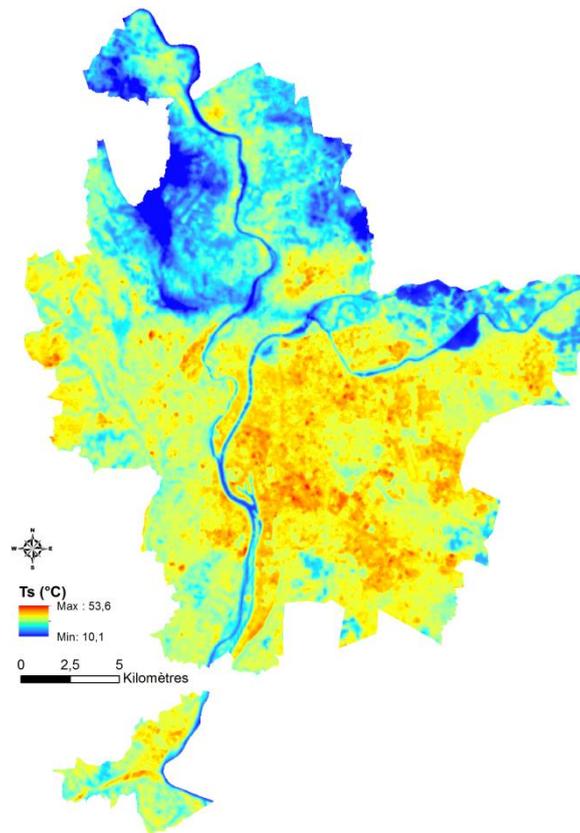
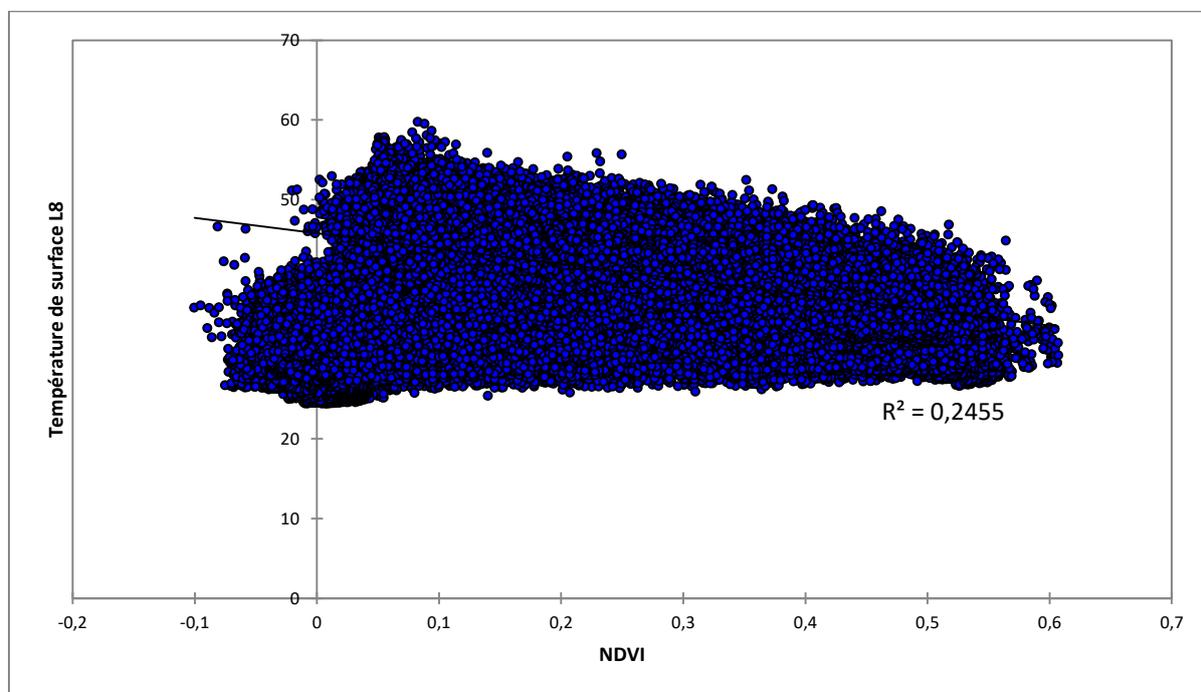


Figure 31: Températures de surface le 04 juillet 2015 à 12h22 - source USGS

Il est nécessaire cependant de vérifier ces observations par le biais de régressions statistiques simples. Ainsi, la figure 32 présente le nuage de points correspondant. Grâce à la régression linéaire effectuée, nous obtenons pour ce jour-ci un coefficient de détermination de 0,25 et un coefficient de Pearson de -0,5.



**Figure 32: Représentation de l'indice de végétation normalisé (NDVI) en fonction des températures de surface le 04 juillet 2015 sur le territoire de la Métropole de Lyon**

Le coefficient de détermination reste faible, peut-être à cause de la fraîcheur des cours d'eau comportant un NDVI peu élevée. En revanche, le coefficient de Pearson met en évidence une relation décroissante (-0,49). Ainsi, on peut dire que plus le couvert végétal est présent, plus les températures de surface sont faibles.

Au vu de ces résultats, cette comparaison devra être effectuée sur plusieurs dates uniques mais également sur des moyennes annuelles et saisonnières. Caractériser le type de couverture en relation avec des températures de surface des plus chaudes est une des perspectives de travail qui peuvent prolonger ce mémoire.

### ***3.1.1.3 Une évolution temporelle et spatiale des isothermes***

Au sein de cette sous-partie, il est question d'analyser l'évolution d'isothermes sur le territoire de la Métropole de Lyon à partir des températures de surface relevées par le satellite Landsat 8.

D'une manière générale, on observe sur toute la Métropole, pour les moyennes estivales, une concentration de l'isotherme 24°C autour des deux cours d'eau principaux, des parcs de la Tête

d'Or et de Miribel-Jonage, mais également sur les hauteurs de l'ouest lyonnais (figure 33). En revanche, au sein du cœur urbain de Lyon, on constate une quasi-absence de cette isotherme fraîche.

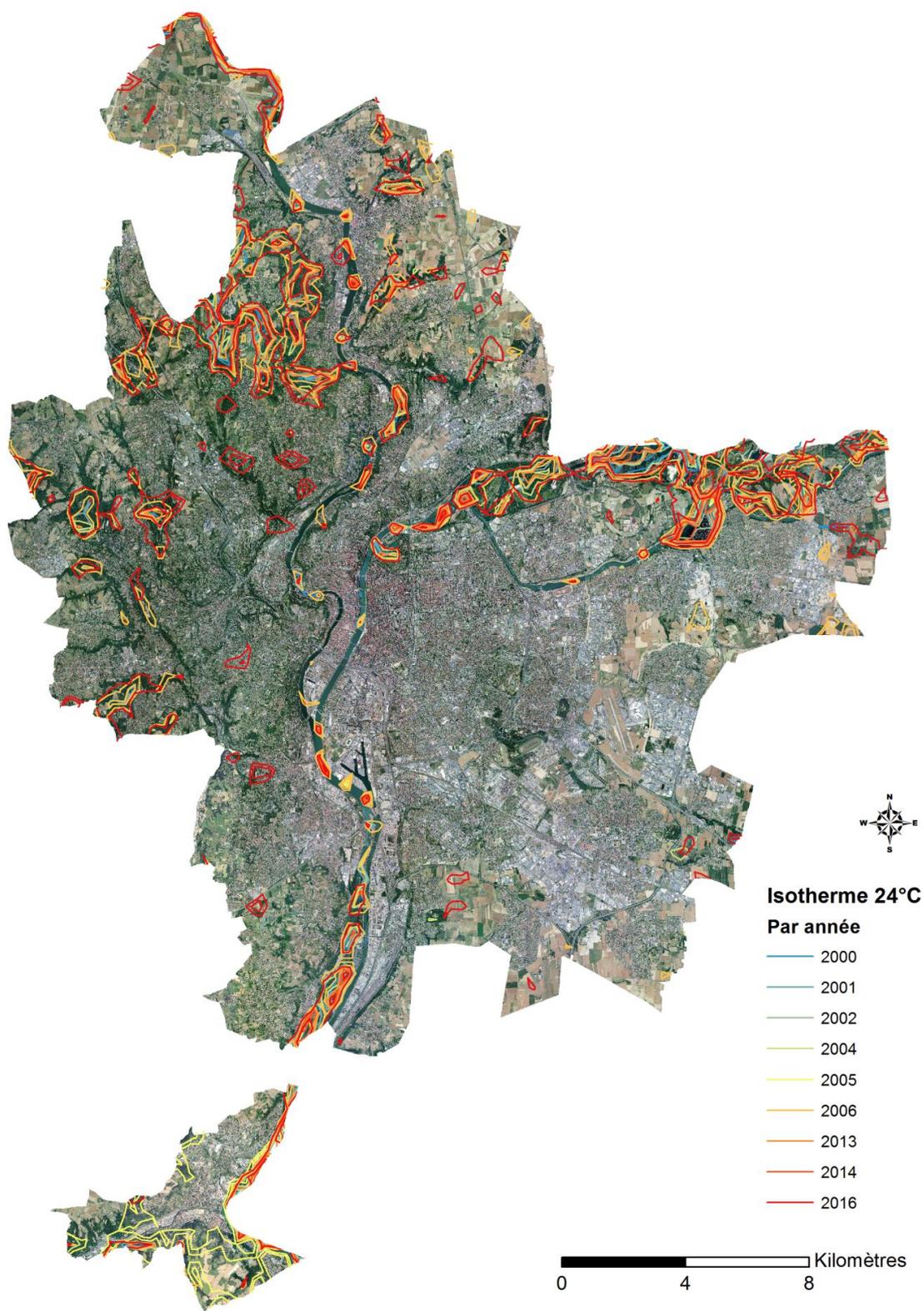


Figure 33: Evolution spatiale de l'isotherme minimale 24°C sur le territoire de la Métropole de Lyon depuis 2000 - Source Data Grand Lyon

Par ailleurs, on observe un élargissement de cet isotherme en 2016 autour des espaces déjà frais dans les années précédentes et une apparition de cet isotherme en 2016 autour d'espace végétalisés tels qu'à Saint-Cyr-au-Mont-d'Or et Collonges-au-Mont-d'Or. Le centre de l'agglomération est nettement plus chaud que le reste du territoire (figure 34). On remarque l'apparition de l'isotherme 44°C dans le cœur urbain à partir de l'année 2005 et un étalement de cette isotherme à partir de l'année 2013.

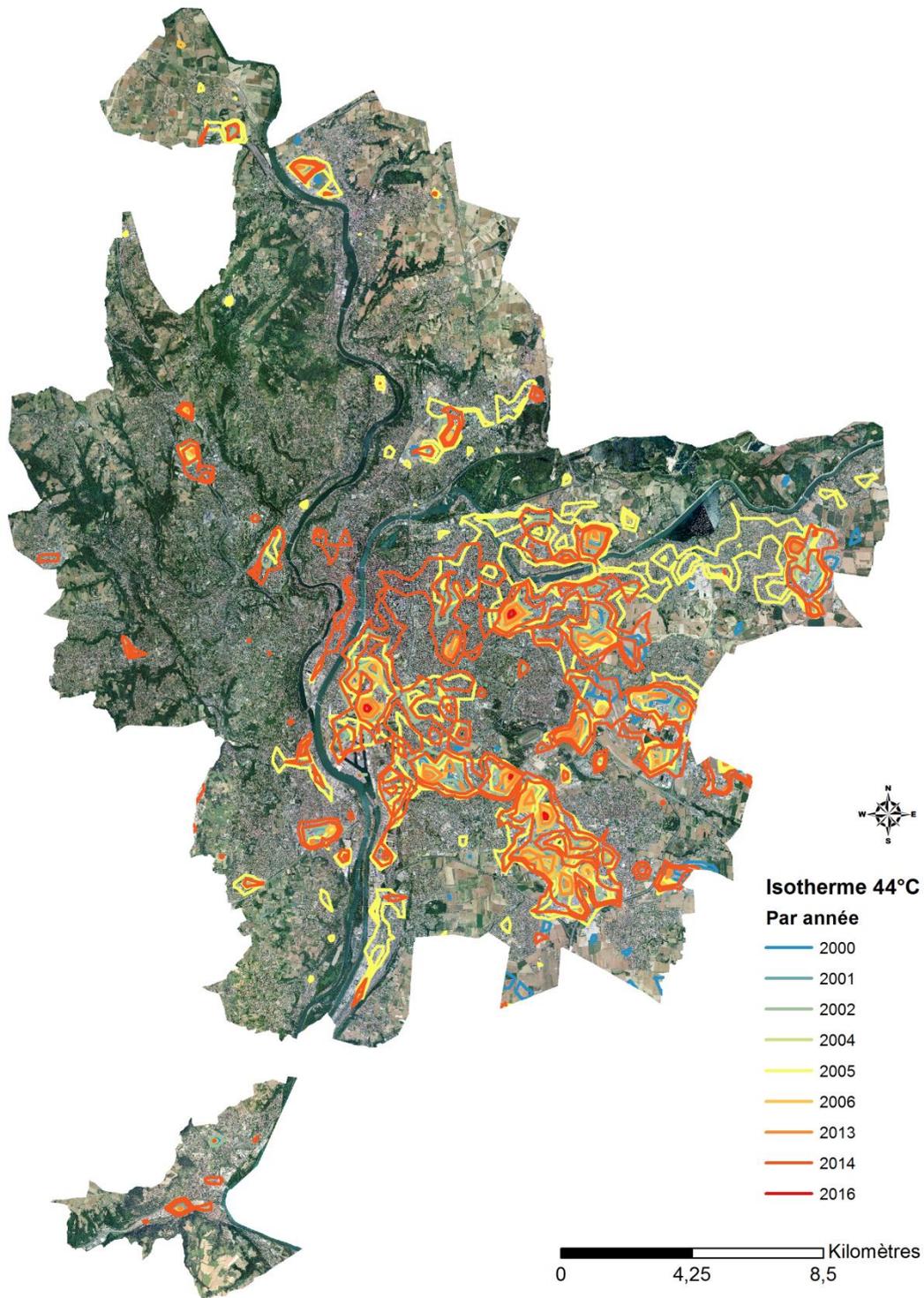


Figure 34: Evolution spatial de l'isotherme 44°C sur le territoire de la Métropole de Lyon depuis 2000 - Source Data Grand Lyon

A l'échelle de la moyenne estivale de 2003 sur la Métropole de Lyon (figure 35) on observe un fort gradient croissant à partir des îlots de fraîcheur urbains répartis sur le territoire, comme au niveau :

- Des surfaces boisées
  - De la forêt de Dardilly : on constate une élévation de température de l'ordre de 0,5°C / 100 mètres ;
  - D'Ecully, Marcy l'Etoile : 1,75°C / 100 mètres ;
  - Du Parc de la Tête d'Or : 0,5°C / 100 mètres ;
- Des surfaces en eau et plus particulièrement le Rhône :
  - A hauteur de la rue Servient et du cours Lafayette : 1,19°C / 100 mètres ;
  - A hauteur de Gerland Ouest et du Grand Large : 1,33 °C / 100 mètres ;

Un fort gradient décroissant à partir des îlots de chaleur urbains se dégage aussi sur :

- Les centres urbains résidentiels denses de Lyon ;
- Les zones industrielles de l'est lyonnais : 1,21 °C / 100 mètres ;
- Les zones commerciales de l'est lyonnais entre Porte des Alpes et Parilly : 0,6 °C / 100 mètres ;
- Les surfaces agricoles cultivables
  - à Meyzieu : 2,0 °C / 100 mètres, notamment à cause de la proximité du Rhône ;
  - à Mions : 0,71 °C / 100 mètres, également à cause de la proximité du fleuve.

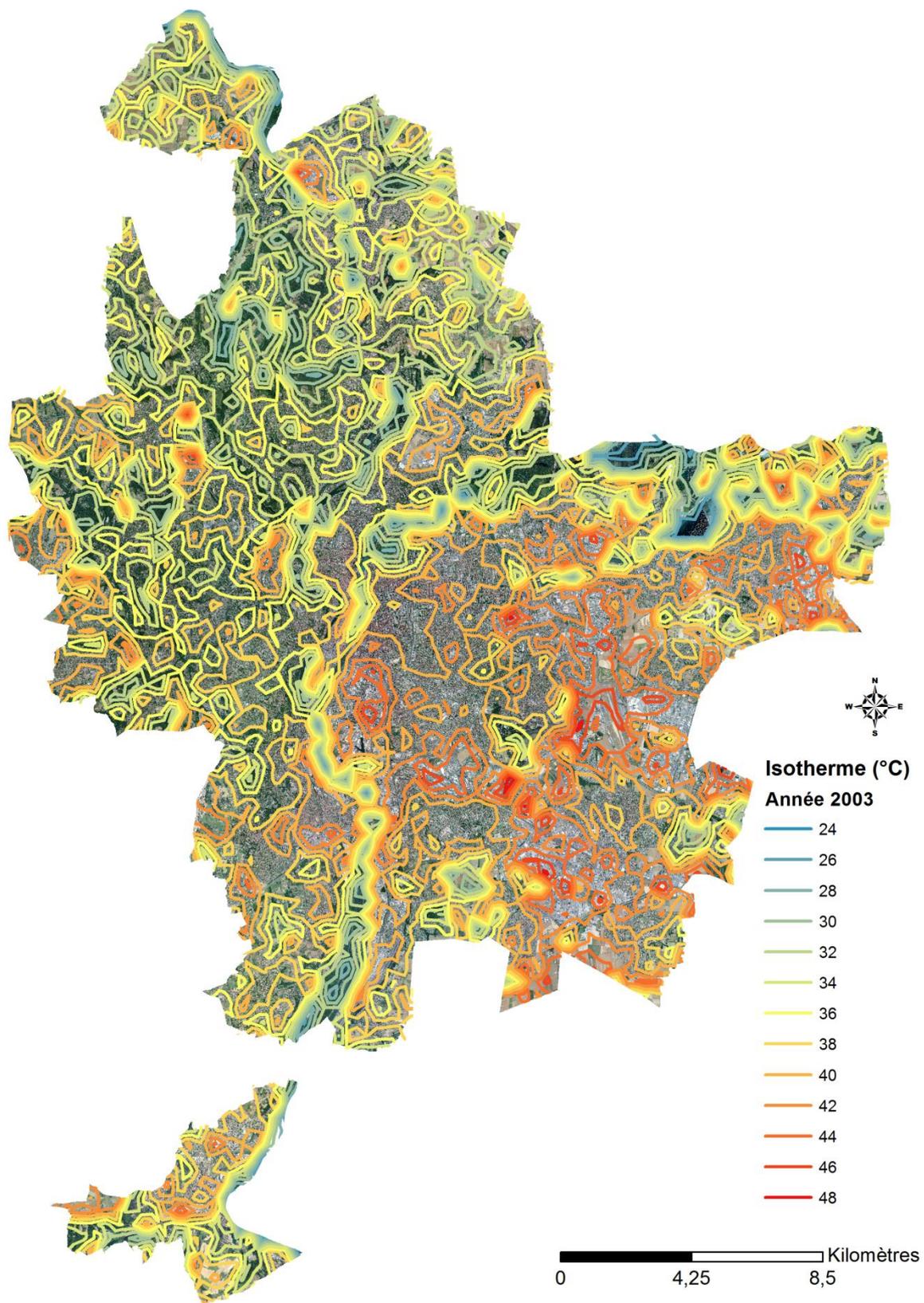


Figure 35: Evolution spatial des isothermes de l'année 2003 sur le territoire de la Métropole de Lyon - Source Data Grand Lyon

Pour une analyse plus poussée, il est nécessaire de se consacrer à l'analyse de points particuliers. Des gradients croissants remarquables sont observables aux niveaux des parcs de la

Métropole de Lyon. Nous allons donc nous intéresser à trois espaces verts en particuliers. Deux procédures différentes ont été opérées dans l'analyse de l'évolution des isothermes de ces sites choisis. La première concerne la zone arborée entre Chassieu et Saint-Priest (figure 36) et le parc de Parilly (figure 37). Pour chacune de ces deux localités, l'évolution des isothermes entre 2000 et 2016 a été étudiée par le truchement de la variation de la superficie de certaines isothermes.



Figure 36 : Etendue spatiale de 22 285m<sup>2</sup> de l'isotherme 32°C pour l'année 2000 au-dessus de la zone arborée de Chassieu/Saint-Priest – source Data Grand Lyon

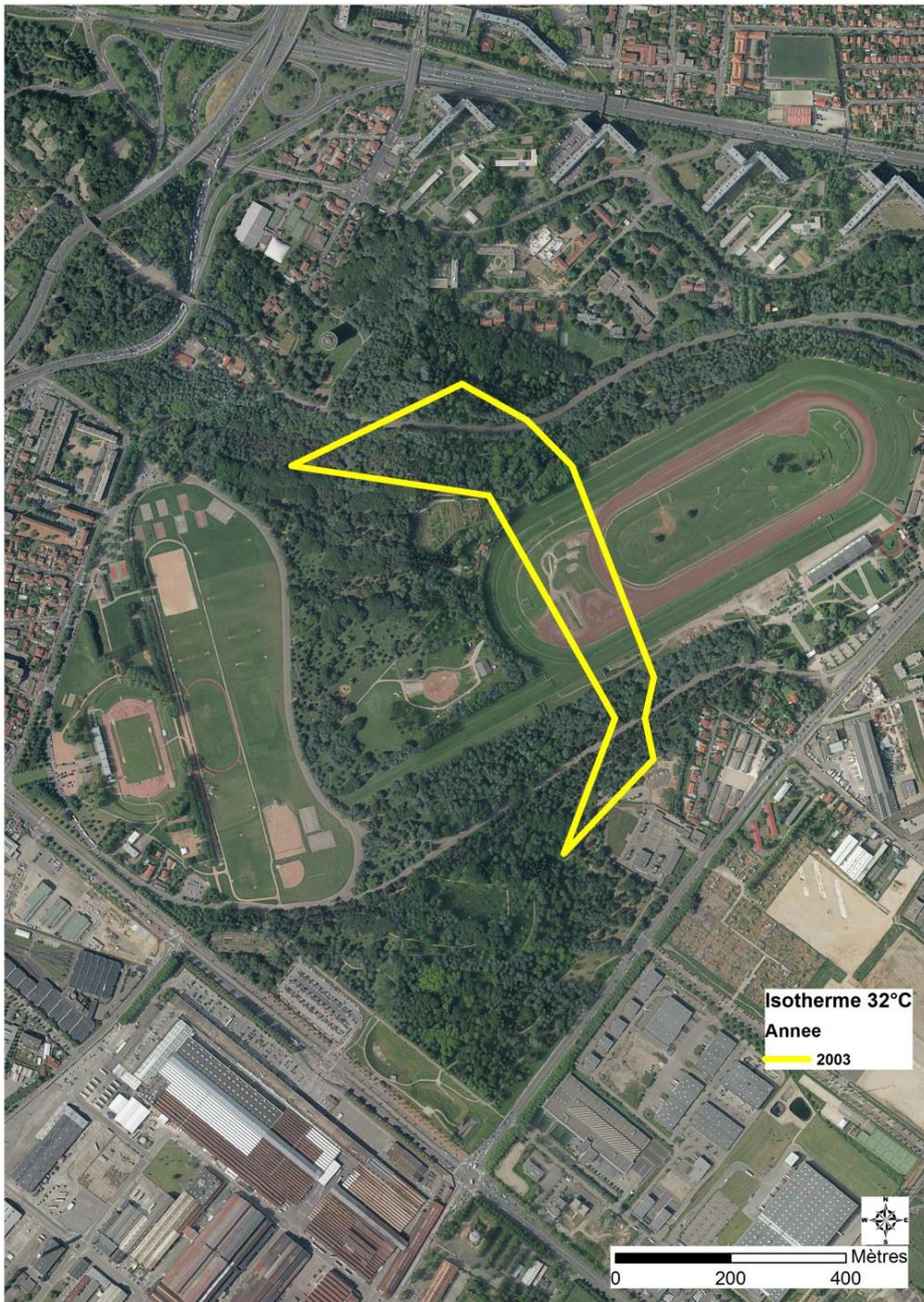


Figure 37: Etendue spatiale de 113 518 m<sup>2</sup> de l'isotherme 32°C pour l'année 2003 au-dessus du parc de Parilly – source Data Grand Lyon

La figure 38 montre l'évolution de l'emprise spatiale de l'isotherme 32°C et l'isotherme 36°C entre 2000 et 2016 pour la zone arborée située entre Chassieu et Saint-Priest.

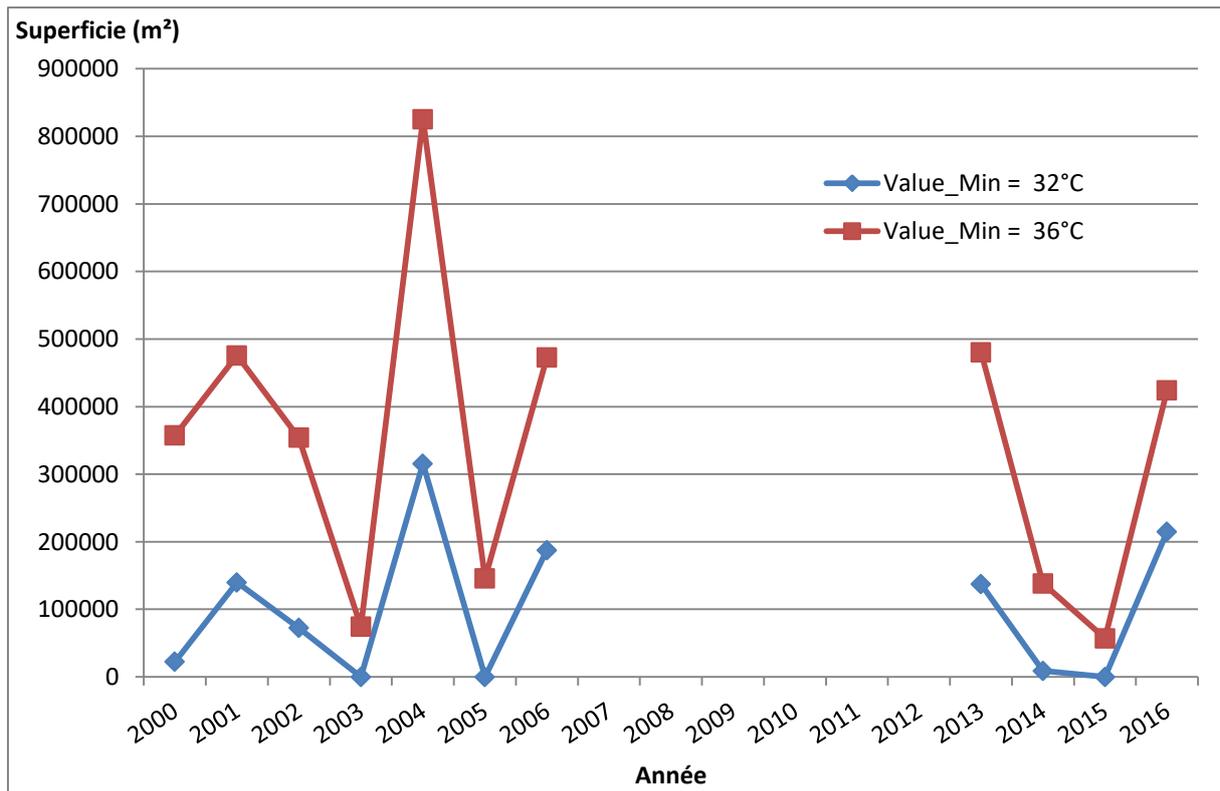


Figure 38: Evolution de l'air (m<sup>2</sup>) l'isotherme 32°C et de l'isotherme 36°C de la zone arborée proche de l'aérodrome de Bron depuis 2000

Cette évolution spatiale de ces deux isothermes caractérise l'étendue des îlots de fraîcheur urbains. Ainsi, on peut constater une décroissance de l'air de l'IFU dans les années 2003, 2005, 2014 et 2015, années particulièrement chaudes sur la métropole française. En revanche, en ce qui concerne l'année dernière, durant laquelle Météo-France n'a pas enregistré de jours de canicule, l'isotherme 32°C s'est étendue de plus de 200 000 m<sup>2</sup> et l'isotherme 36°C de plus de 360 000 m<sup>2</sup>. Ce phénomène est également observable au niveau du parc de Parilly (figure 39). Entre 2003 et 2004, l'isotherme 32°C gagne plus de 340 000 m<sup>2</sup> et celle de 36°C plus de 220 000 m<sup>2</sup>. Entre 2015 et 2016 cette variation croissante est toujours autant marqué pour l'isotherme 32°C et 36°C avec un gain de plus de 350 000m<sup>2</sup> et de plus de 125 000 m<sup>2</sup> respectivement.



Figure 39: Evolution de l'air (m²) de l'isotherme 32°C et de l'isotherme 36°C du parc de Parilly depuis 2000

La deuxième méthode employée dans l'analyse de l'extension spatiale d'un îlot de fraîcheur urbain concerne l'exemple du parc de la Tête d'Or. Il n'est plus question ici d'une extension de la superficie des isothermes mais d'une distance entre l'île du Souvenir (au centre du lac) et l'intersection de l'isotherme étudié avec la droite formée par le boulevard du 11 Novembre 1918 (Villeurbanne – figure 40).



Figure 40: : Distance (1331 m) entre l'île du Souvenir et l'intersection de l'isotherme 36°C avec la droite formée par le boulevard du 11 Novembre 1918 pour l'année 2004 autour du parc de la Tête d'Or – source Data Grand Lyon

La variation de l'isotherme 30 °C et 34°C sur le parc de la Tête d'Or suit la même tendance que pour les deux espaces végétalisés précédents (figure 41). Ainsi entre 2003 et 2004, l'isotherme 30°C s'étend de plus de 750 mètres et celui caractérisant 34°C de plus de 1100 mètres. Cette tendance

croissante est encore plus marquée entre 2015 et 2016. Respectivement pour les deux isothermes citées précédemment, l'étendue est de plus de 920 mètres et supérieur à 1800 mètres.

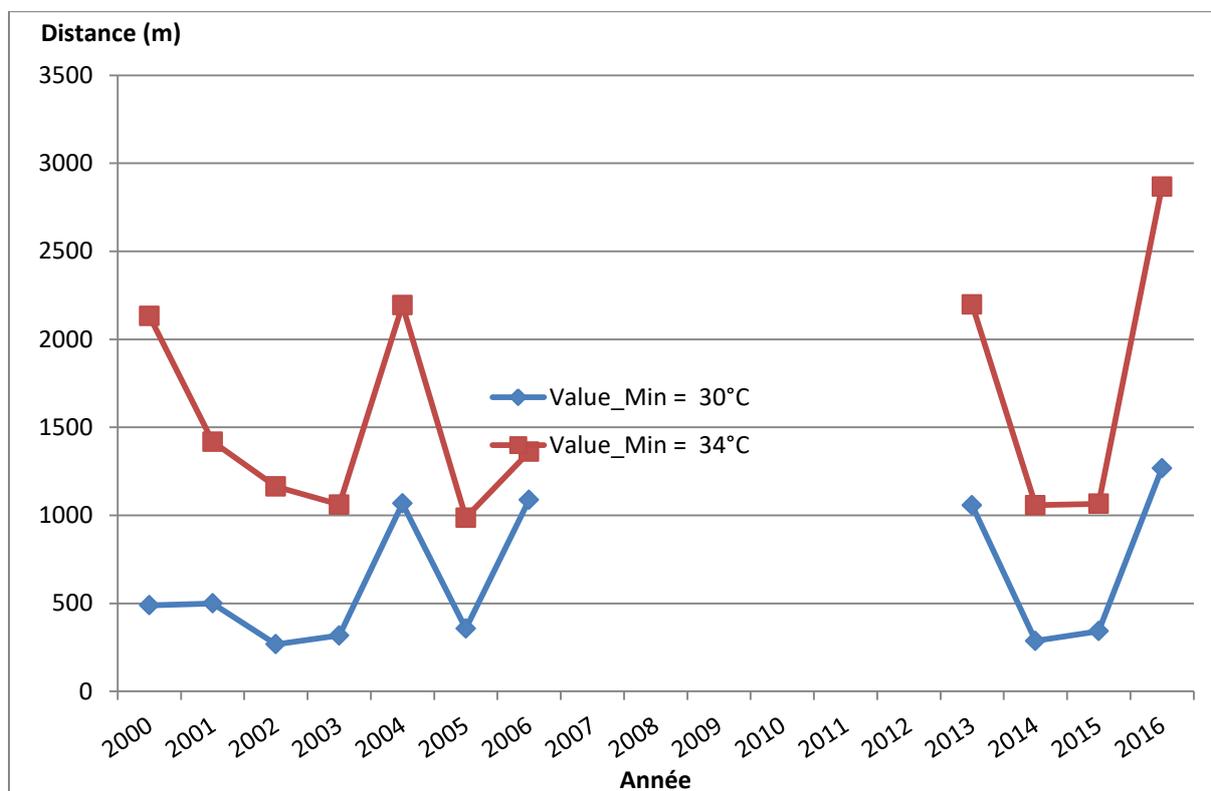


Figure 41: Evolution de la portée (m) de l'isotherme 30°C et de l'isotherme 34°C du parc de la Tête d'Or depuis 2000

Lors des jours de passage de Landsat 8, l'acquisition des données de températures de surface satellitaire a été combinée à une acquisition manuelle, permettant une résolution spatiale plus fine.

### 3.1.1.4 L'acquisition des températures de surface par le biais du dispositif HVAC+

Cette prise de mesure s'est effectuée principalement sur les lieux d'intérêt climatique sélectionnés, comme indiqué sur la figure 42. Il s'agit d'une campagne de mesures effectuée le 11 avril dernier.



Figure 42: Températures du sol (°C) acquises grâce au dispositif HVAC le 11 avril 2017 entre 10h30 et 12h30 – source Data Grand Lyon

Le gradient de température de la campagne est très fort puisqu'il s'échelonne de 13°C à 30°C. Les températures de surface les plus basses sont localisées à proximité des points d'eau (le lac du parc de la Tête d'Or à 13°C ou le long des berges du Rhône entre 15°C et 17°C) ou à l'intérieur des traboules et des rues encaissées du centre historique lyonnais (entre 14°C et 19°C), sur des surfaces pavées. Les revêtements les plus chauds sont ceux localisés près de nœuds de transit sur des surfaces asphaltées (centres commerciaux de Confluences et Part-Dieu jusqu'à 30°C, gares de Jean Macé et

Perrache jusqu'à 29°C). La prochaine partie va s'intéresser à ce constat concernant la température de l'air en confrontant ces résultats.

### **3.1.2. Les campagnes de mesure en vélo révèlent de fortes variations de température de l'air**

Jusqu'à présent, 34 campagnes de mesures diurnes et 8 nocturnes ont été effectuées. Le transect en Vélo'V, long de 20 kilomètres environ, s'effectue en moyenne en 2 heures et 30 minutes pour une vitesse moyenne de 8 km/h.

La figure 43 présente les variations spatiales de la température de l'air enregistrée le 11 avril 2017 entre 10h30 et 12h30 et corrigée par l'évolution des températures enregistrées par la station de l'ENS Lyon ce même jour. L'intensité de l'ICU ce jour-là est particulièrement bien marquée sur le site du parc de la Tête d'Or avec une variation de 3°C entre son cœur frais, aux abords du lac, et ses extérieurs chauds, avenue de Thiers. L'influence rafraichissante de la végétation est mise également en évidence au niveau du parc Blandan, entre une température de l'air de 19,4°C à proximité d'une végétation dense alors que l'on augmente de près de 0,5°C lorsqu'on se situe sur des revêtements bitumeux sans verdure aux alentours. Les traboules situées dans le 5<sup>ème</sup> arrondissement de Lyon (centre historique) ont un effet rafraichissant sur ce canyon urbain (une variation des températures de l'air entre 18,8°C et 19,2°C). Ces quartiers sont pourtant dépourvus de végétation mais la proximité de bâtiments anciens en pierre de taille et l'encaissement permettent de contenir la fraîcheur. L'impact chaud du centre commercial Confluence est marqué par une augmentation de 0,5°C par rapport à ses environs proches. Le même phénomène est retrouvé dans le cours Charlemagne et dans la rue Casimir Périer. En revanche, plus on se rapproche des quais des Berges du Rhône, plus la température de l'air devient fraîche. Cet effet se poursuit sur un axe perpendiculaire aux berges, rue André Bollier.



Figure 43: Campagne de mesures de températures de l'air (°C) effectuée le 11 avril 2017 (heure de départ : 10h30) – Source Data Grand Lyon

En soirée (figure 44), la restitution de la chaleur est davantage prononcée dans le 6<sup>ème</sup> et le 3<sup>ème</sup> arrondissement. Ce phénomène peut s'expliquer par une densité importante de population et un habitat en conséquence, plus forte que dans des quartiers tels que Confluence ou La Doua-Gaston Berger. Le parc Blandan, constitué d'un vaste espace en gore, restitue en période nocturne une forte chaleur.

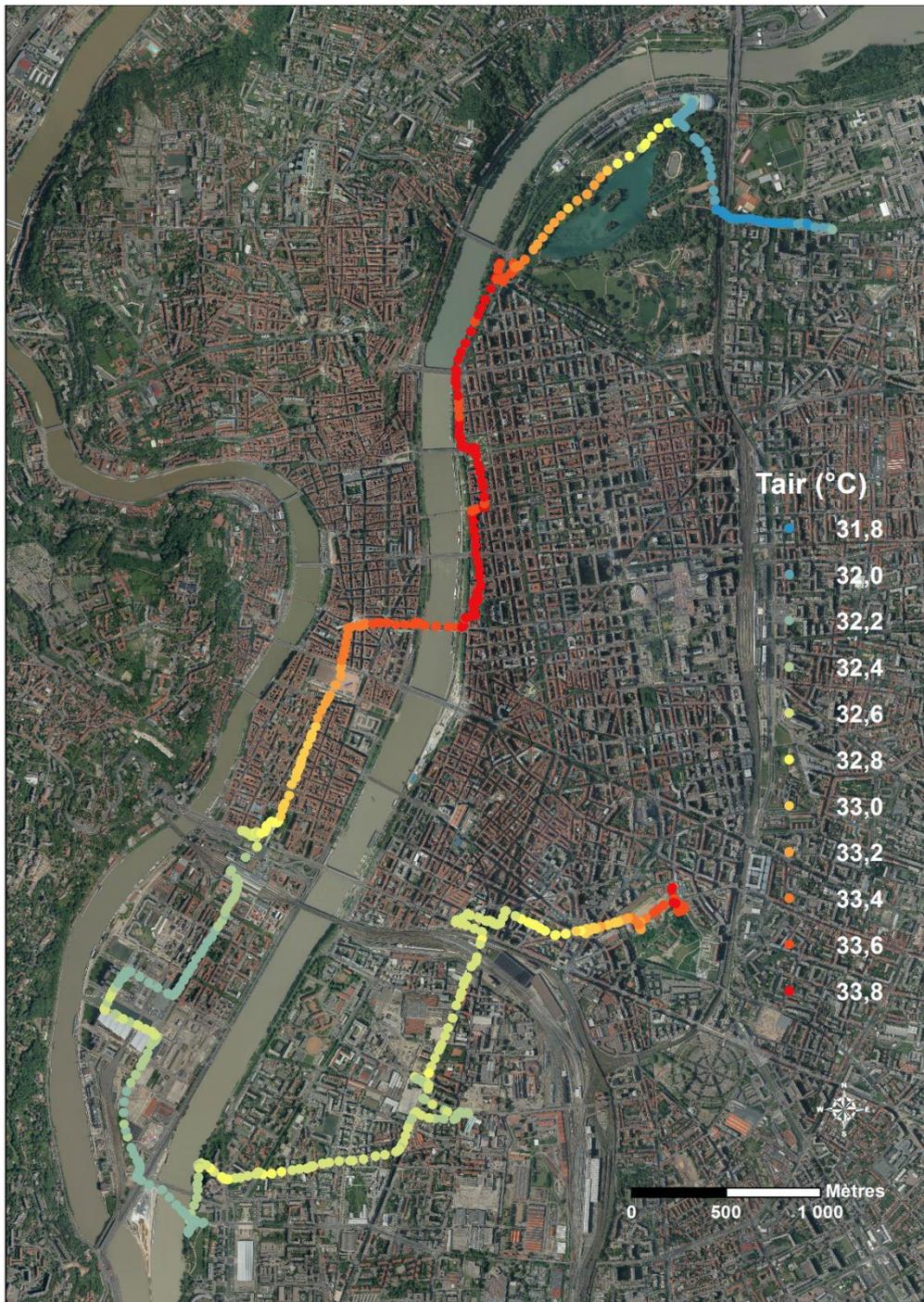


Figure 44: Campagne de mesures de température de l'air (°C) effectuée le 30 août 2016 (heure de départ : 20h30) – Source Data Grand Lyon

Force est de constater que ces variations de températures restent à méso-échelle et qu'il est nécessaire de mesurer l'îlot de chaleur urbain lyonnais à une échelle encore plus fine. C'est pourquoi les mesures participatives de températures vont nous permettre de quadriller finement le territoire d'étude.

## 3.2. Les campagnes participatives confirment les précédents résultats

Le premier fait à relever est le succès et l'engouement rencontré dans les événements participatifs de mesures de températures. A un tel point que nous avons été contraints d'organiser la deuxième campagne par inscription du fait d'un nombre conséquent de volontaires.

Pour rappel, au début de chaque événement, les participants sont réunis pour une première connaissance et sensibilisation au changement climatique et au phénomène d'ICU, une prise en main du matériel, les consignes de sécurité et de respect du matériel et pour l'établissement, d'une manière concertée, du protocole de mesure de la journée. Il peut être constaté l'entrain des bénévoles et leur empressement à la réalisation des mesures (figure 45).



Figure 45: Photo de groupe prise le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participatives de températures

### 3.2.1 La campagne de mesure de températures du 13 avril 2017

Lors de cette campagne, 170 points de mesures ponctuelles ont été récoltés (figure 46). Puisque chaque point a été géolocalisé, il a été possible de les rendre visibles au sein d'un Système d'Information Géographique. Les températures ont été corrigées à l'heure où la température mesurée à l'ombre par la station de l'ENS était la plus élevée, c'est-à-dire à 17h20 (22,6°C).



Figure 46: Points de mesures enregistrés le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participatives de températures – Source Data Grand Lyon

A chaque point de mesures, il est relevé :

- la température de l'air en degrés Celsius (figure 47) ;
- la température du sol en degrés Celsius (figure 48) ;

- l'humidité relative en pourcentage (figure 49).

Pour chaque variable climatique, une interpolation spatiale a été produite (figure 47 à 49).

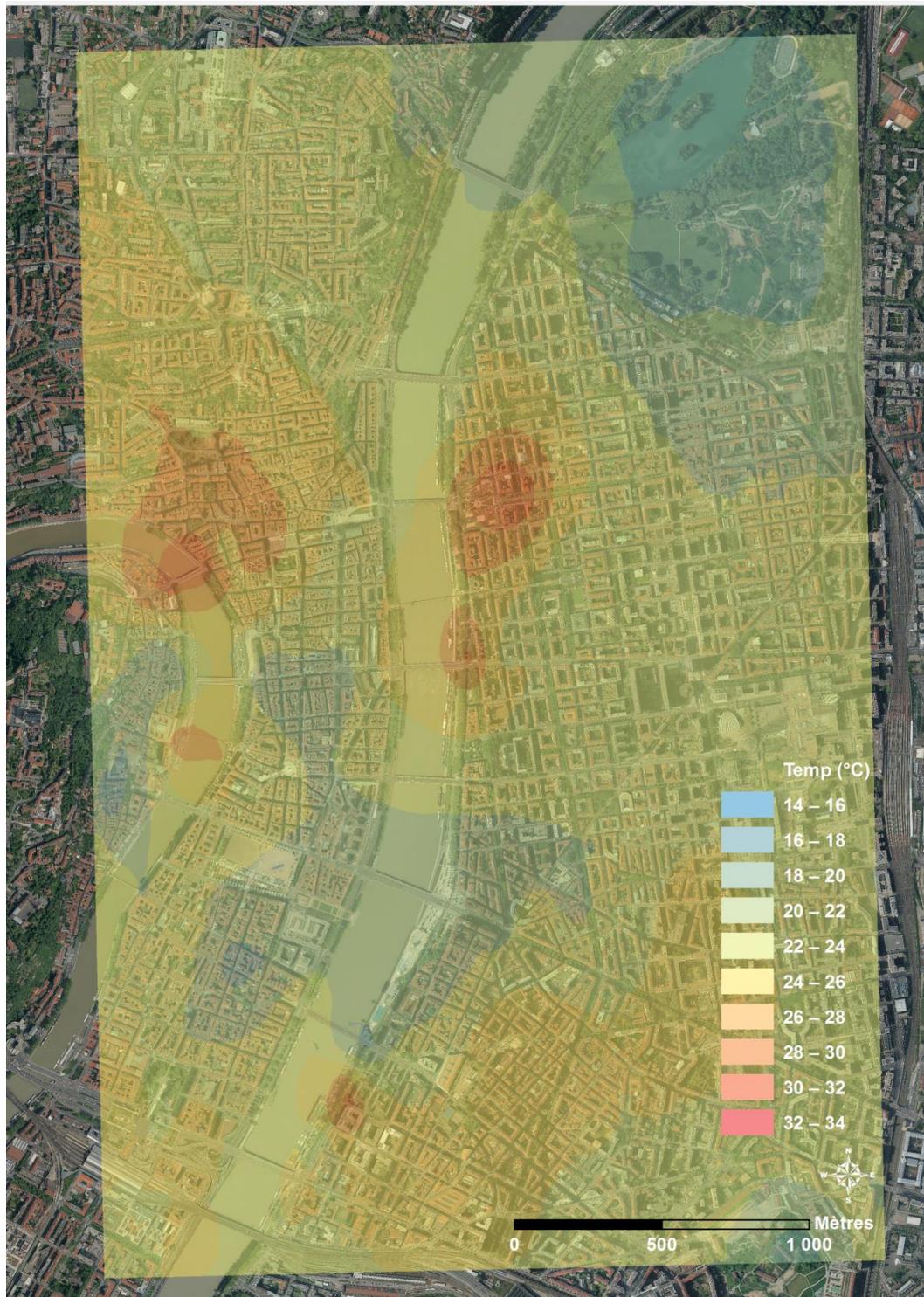


Figure 47: Interpolation spatiale par *RBF* des températures de surface enregistrées le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participatives de température – Source Data Grand Lyon

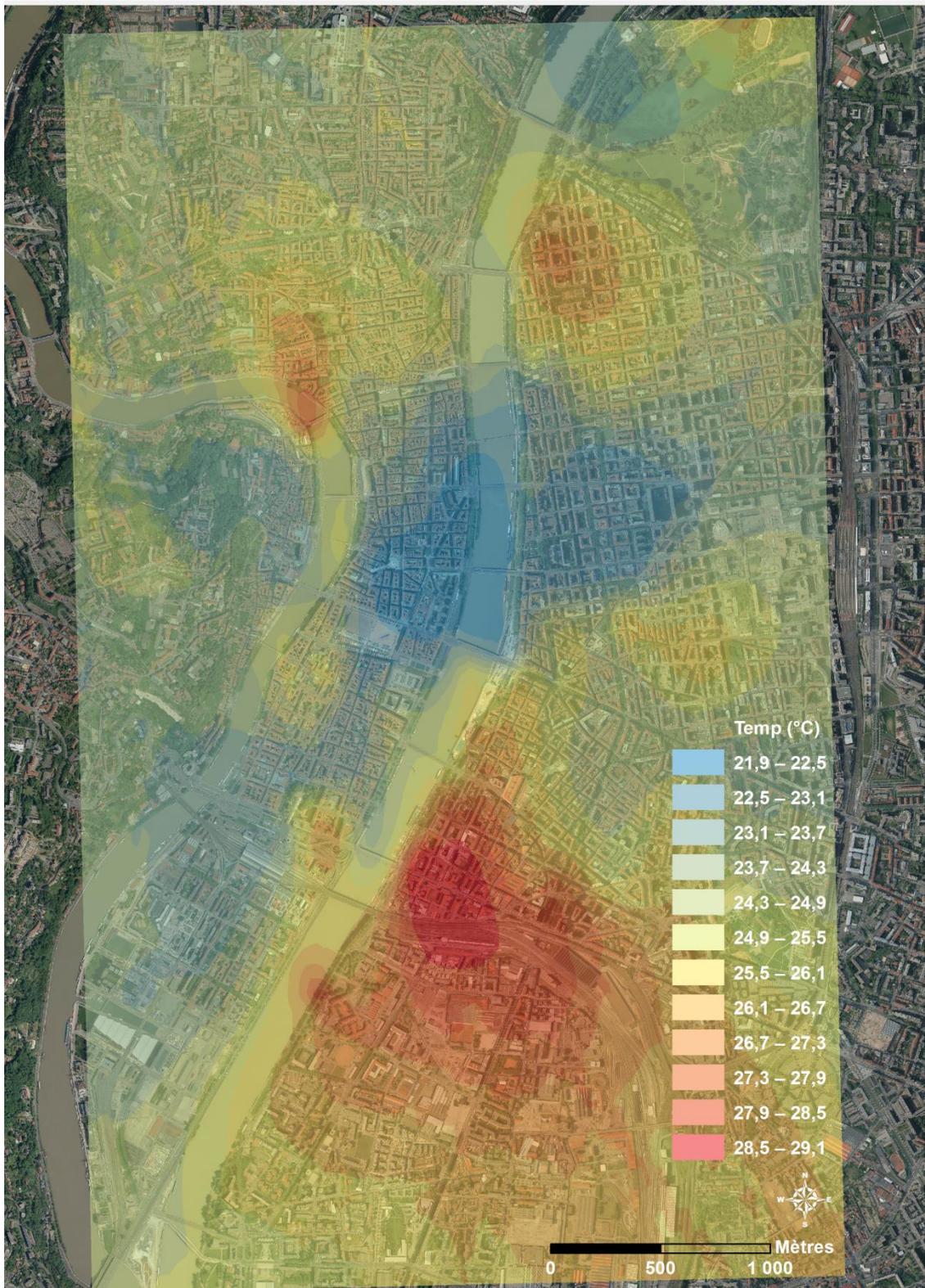


Figure 48: Interpolation spatiale par *RBF* des températures de l'air enregistrées le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participative – Source Data Grand Lyon

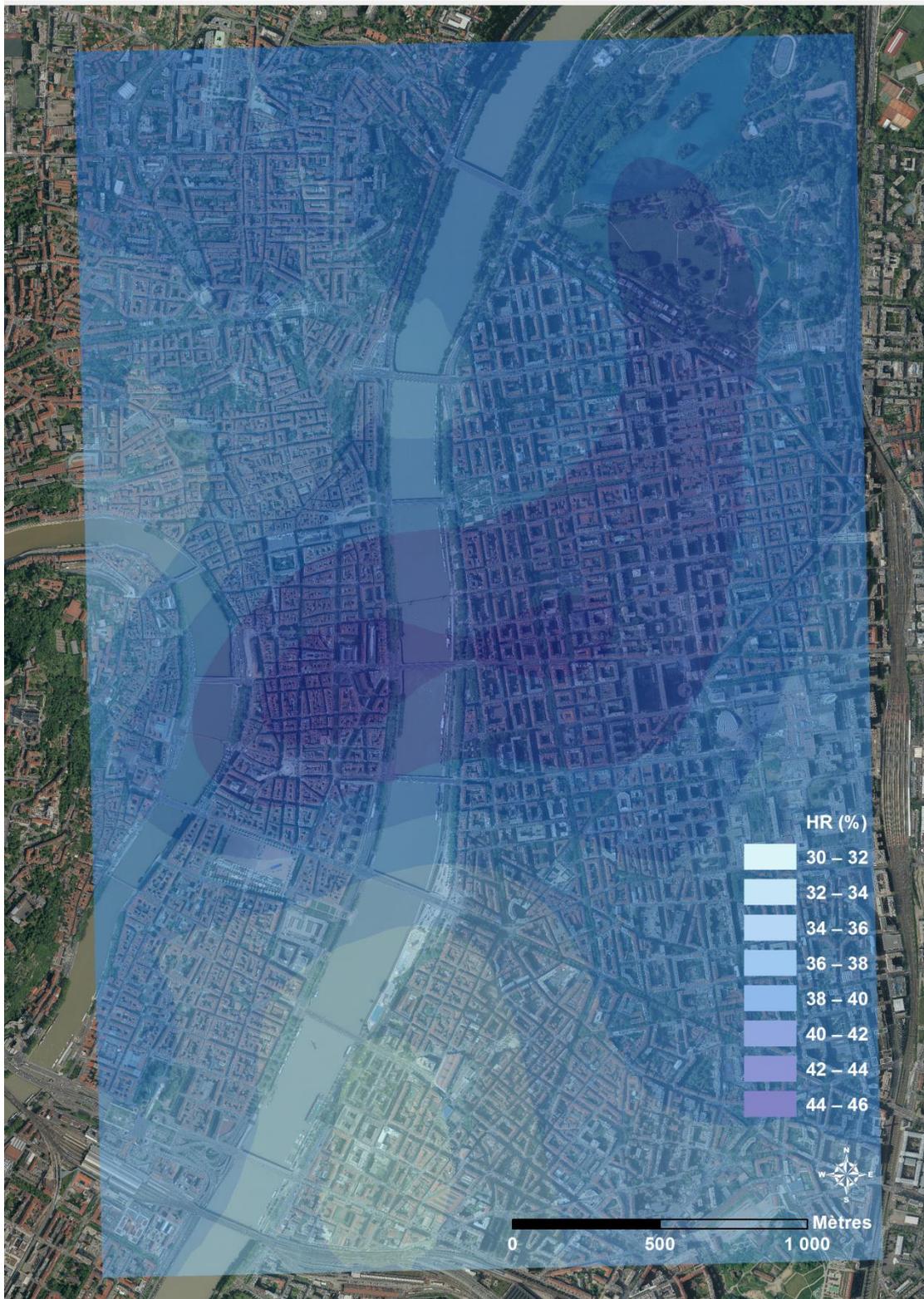


Figure 49: Interpolation spatiale par *RBF* de l'humidité relative le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participative - Source Data Grand Lyon

Ces interpolations nous permettent de constater des pôles de chaleur autour :

- Du quartier de Jean Macé : jusqu'à 32 °C pour la température de surface et 29,1 °C pour celle de l'air ;
- De la place des Terreaux et de la rive gauche de la Saône : jusqu'à 34 °C pour la température de surface et 28,5°C pour celle de l'air ;
- De la place Maréchal Lyautey et du 6<sup>ème</sup> arrondissement : jusqu'à 34 °C pour la température de surface, 27,9°C pour la température de l'air;

mais également des pôles de fraîcheurs :

- Au sein des rues étroites de la presqu'île et du Vieux Lyon : jusqu'à 14 °C pour la température de surface et 22,5°C pour la température de l'air ;
- Autour des Berges du Rhône au niveau de la piscine du Rhône et du quai Victor Augagneur : entre 14°C et 18°C pour les températures de surface et entre 23,1°C et 21,9°C pour la température de l'air.

Ces résultats sont observables tant au niveau des températures de surface que des températures de l'air. Par ailleurs, l'humidité relative suit les variations de températures, à savoir qu'il fait plus humide là où il fait le plus frais, et inversement.

### 3.2.2 La campagne de mesure de températures du 29 mai 2017

Cette campagne qui ne s'est déroulée que durant 1h30, contrairement aux 2 heures de la première, comporte 87 points de mesures (figure 50). Ils sont concentrés également de part et d'autre des deux cours d'eau et dans le cœur urbain de la presqu'île. Cette deuxième opération participative a commencé à 19h30 ce qui nous a permis de mesurer la restitution de la chaleur par la ville en début de soirée. Les températures ont été corrigées à l'heure où la température mesurée à l'ombre par la station de l'ENS était la plus élevée, à savoir à 16h40 (31,6°C). Les résultats des interpolations sont visibles en figures 51 (température de l'air), et 52 (température de surface).



Figure 50: Points de mesures enregistrées le 29 mai 2017 lors de la deuxième campagne de mesures participatives de températures – Source Data Grand Lyon

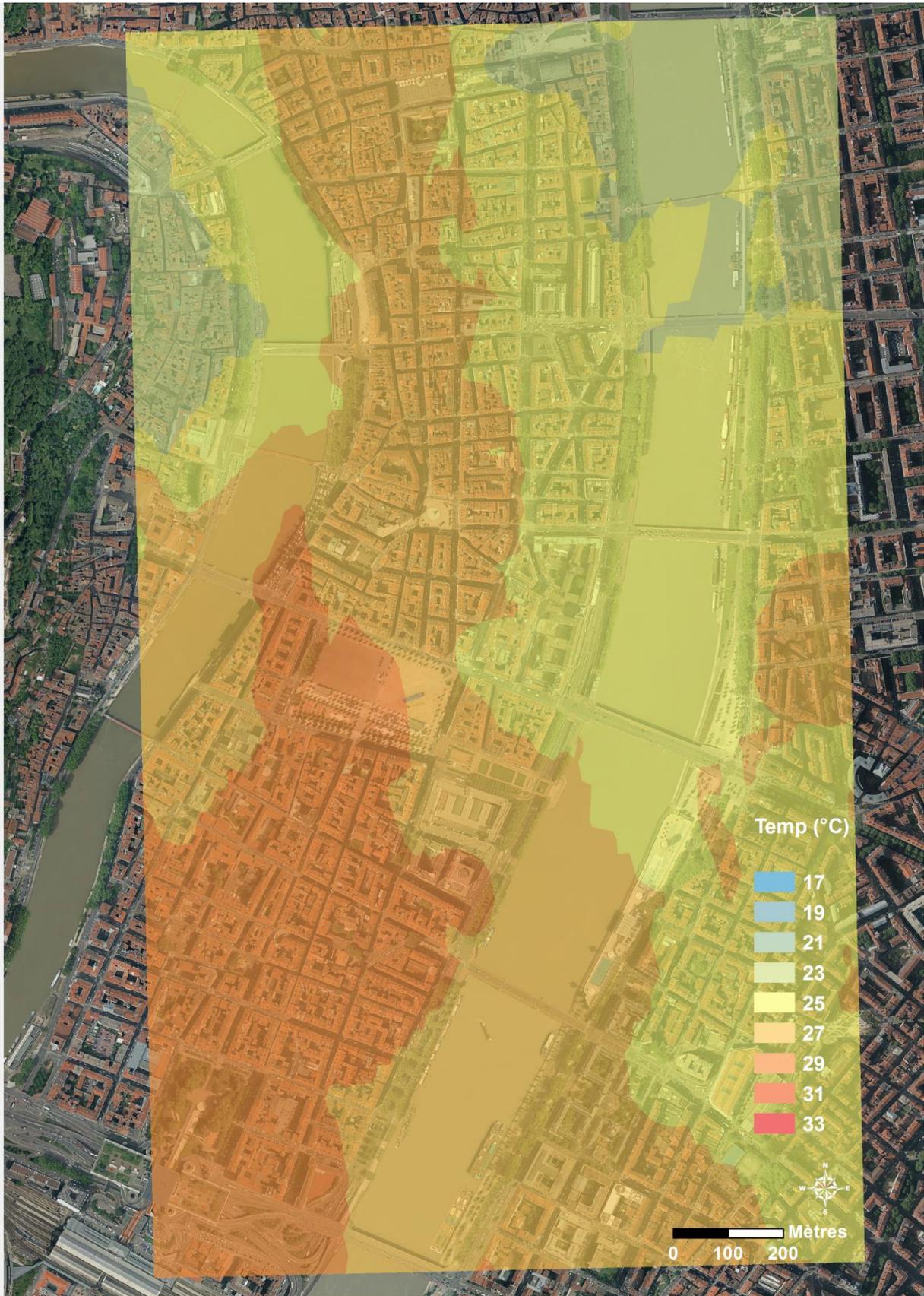


Figure 51: Interpolation spatiale par *RBF* des températures de surface enregistrées le 29 mai 2017 lors de la deuxième campagne de mesures participative— Source Data Grand Lyon

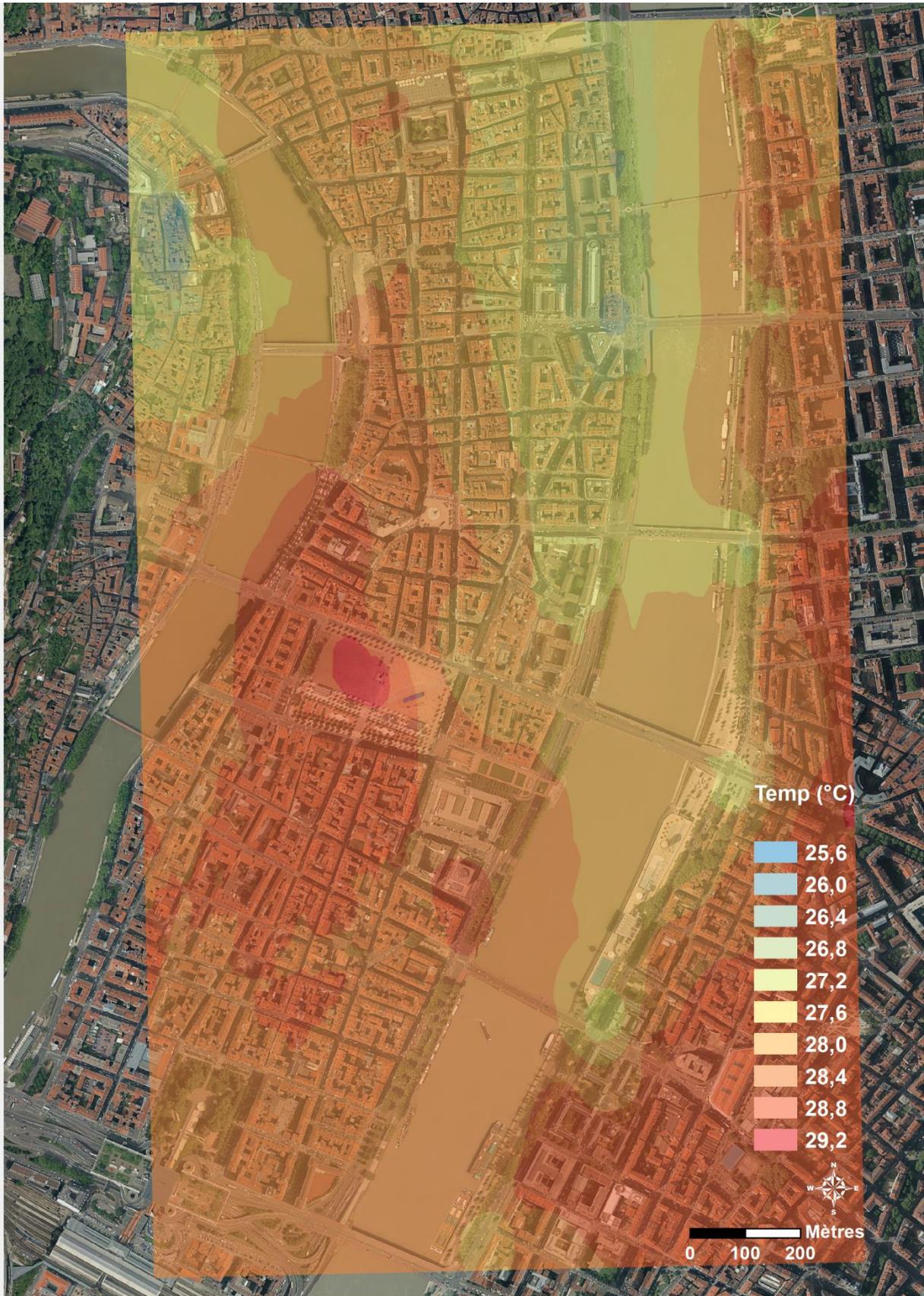


Figure 52: Interpolation spatiale par *RBF* des températures de l'air enregistrées le 29 mai 2017 lors de la deuxième campagne de mesures participative – Source Data Grand Lyon

A une température de surface élevée (33°C), la place Bellecour cumule une température de l'air des plus culminantes, 29.2 °C.

La place Bellecour associe une température de surface élevée (33°C) avec une température de l'air parmi les plus chaudes (29,2°C). Ce lieu est donc un endroit de restitution majeur de chaleur en soirée. D'une manière générale, la Presqu'île ainsi que l'urbain dense proche des quais Augagneur et Claude Bernard sont des espaces libérant une énergie importante, avec respectivement des températures de surface jusqu'à 33°C et 31 °C et des températures de l'air atteignant 29,2°C.

### 3.3. Confrontation des températures de surface et du sol à l'aide des différents moyens d'acquisition : des résultats encourageants à conforter

L'objet de cette dernière partie est de confronter les mesures de température de surface et de l'air obtenus avec les différents instruments de mesure. Bien que l'imagerie satellitaire et le thermomètre à visée laser HVAC+ délivrent tous deux une mesure de la température de surface, il convient dès à présent de remarquer que les modes d'acquisition et que la granularité sont très différents l'un de l'autre. A ce titre, il ne sera guère surprenant si les coefficients de corrélation sont très faibles. Dans le même ordre d'idée, la température de surface et la température de l'air sont deux paramètres différents dont il est nécessaire de tenir compte lors de l'exploitation des résultats.

Chacune des relations suivantes entre températures de surface et températures de l'air n'est pas très explicite. Ces résultats peuvent s'expliquer par la localisation de la zone d'étude, une zone étendue de terre superficielle (Konno et *al.*, 2015). Les relations correspondantes sont récapitulées dans le tableau 8 et sont approfondies par la suite au sein de cette sous-partie.

Corrélation entre...	LST L8 / LST HVAC+	LST L8 / Tair EL	LST L8 / Tair SMARTHY	HVAC+ / Tair EL	HVAC+ / Tair SMARTHY
23/08/2016	/	0,4014	/	/	/
30/08/16 midi	/	0,0664	/	/	/
30/08/16 soir	/	0,3802	/	/	/
08/09/2016	/	0,0351	/	/	/
11/04/2017	0,0035	0,0035	/	0,2119	/
20/04/2017	0	0,0041	/	0,0298	/
20/04/2017	0	0,0476	/	0,1756	/
29/05/2017	0,0063	0,1017	0,0073	0	0,1887

Tableau 8 : Valeur du coefficient de détermination pour différentes campagnes de mesures de température

### 3.3.1 Relation entre températures de surface de Landsat 8 et HVAC +

Les coefficients de détermination ( $r^2$ ) de température de surface obtenus en confrontant Landsat 8 et le HVAC+ sont extrêmement faibles, comme pressentis précédemment. En effet, comme nous avons pu le constater dans la deuxième partie sur la figure 26, en l'espace d'une courte distance, on peut avoir des écarts de températures de surface de plus de 10°C. Ces fortes variations sont impossibles à saisir actuellement pour la mesure satellitaire. Nous obtenons par exemple des  $r^2$  de 0,0035 pour la sortie du 11/04/2017 et de 0,0063 pour celle du 29/05/2017.

### 3.3.2 Relation entre températures de surface de Landsat 8 et températures de l'air

La relation entre les températures de surface de Landsat 8 et la température de l'air mesurée par le dispositif d'enregistrement en continu des températures (EL-USB-1-RGC-JM) est naturellement plus forte que la précédente. Pour exemple représentatif, nous obtenons un  $r^2$  de 0,4 pour la campagne du 23 août 2016. Ces campagnes de mesure sont maintenant à multiplier dans le cadre de mon doctorat afin de confirmer ces premiers résultats. On notera en outre que ces derniers sont en adéquation avec la plupart des études antérieures, telles que Konno et *al.* (2015) ou Diallo-Dudeck (2015).

### 3.3.3 Relation entre températures de surface relevées par le HVAC+ et températures de l'air

Lors de la campagne de mesures à vélo du 11 avril 2017, 74 points de mesure de température de surface ont été enregistrés et confrontés aux données fournies par l'enregistreur en continu EL-USB-1-RGC-JM. Les points de mesures au sol ont été pris lors des passages sur les 11 sites d'intérêts dans la ville de Lyon sélectionnés. L'intervalle de mesure est en moyenne de 60 mètres. Le coefficient de détermination entre les températures de l'air mesurées par le dispositif EL-USB-1-RGC-JM et celles de surface par le HVAC + est de 0,2.

Il est certain qu'il existe une plus grande relation entre les mesures de températures de surface du HVAC+ et celle de l'air qu'entre ces dernières et les températures de surface issues du satellite Landsat 8. En effet, la résolution des mesures HVAC+ est plus fine qu'une information délivrée au pixel de 30 mètres par 30 mètres. Cependant, la très grande hétérogénéité des températures de surface déjà évoquée précédemment ne permettra sans doute pas d'atteindre des  $r^2$  beaucoup plus élevés dans la suite de mon travail de recherche.

Suite à ces premiers résultats plutôt encourageants, il est maintenant nécessaire d'envisager d'étendre spatialement et quantitativement la prise de mesures pour conforter ces tendances.

En outre, des mesures ambulantes les jours de passage du satellite Landsat 8 dans des conditions climatiques optimales (temps clair et peu venteux) doivent être renouvelées et étendues.



# C

## onclusion : des résultats complémentaires prometteurs à approfondir dans le cadre de mon doctorat

La caractérisation des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains, dans le cadre de l'évolution climatique locale et globale, est une nécessité pour la métropole lyonnaise. Elle répond à une forte demande de la part des gestionnaires et des élus locaux. Force est de reconnaître que l'agglomération accuse un certain retard par rapport aux autres villes françaises ou extra-européennes au sujet de cet aléa climatique, notamment avec l'absence d'un réseau de mesure dense au sol. Ce mémoire avait comme objectif de réaliser un premier état des lieux des techniques et outils de mesure mobilisables afin d'appréhender au mieux cet aléa et ses gradients thermiques. Nous avons ainsi recouru dans un premier temps à l'imagerie satellitaire. Faiblement utilisée sur notre territoire d'étude, cette dernière a permis de fournir la température de surface à l'aide d'une résolution relativement élevée, eu égard à la technologie employée. L'ensemble des données mobilisables depuis 2000 ont été traitées et ont révélé des disparités thermiques flagrantes entre les différents modes d'occupation du sol. En accord avec les études antérieures sur des mégapoles de tailles équivalentes ou supérieures, les îlots de chaleur se concentrent au-dessus des zones résidentielles denses (centre de l'agglomération) et des secteurs industriels ou commerciaux (est et sud de la métropole). Inversement, les pôles de fraîcheur se localisent sur et à proximité des cours d'eau et des espaces verts. Bien que l'imagerie satellitaire soit d'une extrême utilité en permettant par exemple de suivre sur le long terme l'impact des opérations de réaménagement urbain depuis le début des années 2000 jusqu'à aujourd'hui, sa granularité ne permet pas de saisir les variations thermiques les plus fines. Cela passe nécessairement par des méthodes d'acquisition de la donnée sur le terrain. Pour cela, des mesures en continue en vélo ont été expérimentées suivant des transects établis en fonction de lieux d'intérêt et de leurs morphologies urbaines. Les premiers résultats ont permis de confirmer les résultats issus de la télédétection au niveau de la localisation des pôles de chaleur et de fraîcheur de Lyon. Cependant, ces transects à vélo s'avèrent trop rectilignes et ne maillent pas toute l'agglomération. Une solution potentielle se trouve très probablement dans la science participative et a été expérimenté dans le cadre de ce mémoire. Ainsi, deux campagnes de mesure ont été organisées durant mon stage pour faire preuve du concept. Ces campagnes de mesure qui ont rassemblé une vingtaine de participants à chaque fois ont permis de recueillir plus d'une centaine de point de mesure en quelques heures. Ces points de mesure de la température de l'air, de la température de surface et de l'humidité se révèlent extrêmement utiles dans la caractérisation fine de la thermie lyonnaise.

Ces pistes, engagées dans le cadre de mon master 2 *Géosystèmes Environnementaux*, doivent maintenant être poursuivies et affirmées dans le cadre de mon doctorat. Ainsi, il est prévu de compléter le travail de télédétection par la correction et le traitement des données Landsat 7 scanlines off. Les mesures à vélo doivent également être poursuivies mais une des clés de la compréhension des gradients thermiques lyonnais passent par la densification des mesures et donc par les mesures participatives, pédestres ou éventuellement cyclées. De cette manière, les ICU et IFU pourront être finement appréhendés et des cartographies dressées. Dans un second temps, les

déterminants morphologiques urbains des gradients thermiques pourront être explorés à l'aide de régressions linéaires multiples. Les premiers résultats sur Lyon ainsi que la bibliographie sur le sujet nous ont montré l'importance de descripteurs urbains tels que la proximité à un cours d'eau ou à un espace vert, le coefficient d'imperméabilisation, l'âge moyen et la nature du bâti ou encore la fraction de ciel visible (le *sky view factor*). Dans la lignée d'expérimentations sur d'autres mégapoles mondiales, les configurations synoptiques et les types de temps devront en outre être prises en compte. Ce n'est seulement qu'en fusionnant l'ensemble de ces techniques que les ICU et les IFU pourront être caractérisés et des pistes de gestion proposés aux aménageurs. Il est évident que l'amélioration de la connaissance de cet aléa climatique fournira à l'analyse de ce risque des éléments d'appréciation essentiels. La dimension aléatoire de certains phénomènes climatiques renforçant encore celle du risque lié aux fortes chaleurs, elle est une raison de plus pour tenter de limiter au maximum la part d'incertitude dans les définitions météorologiques des phénomènes, leur prévision et leur prévention. Elle n'est cependant pas une fin en soi. Afin d'éviter les défauts à l'opérationnalité provoqués par des modes d'approches trop fonctionnalistes, la caractérisation des champs thermiques sera couplée avec une réflexion sur les seuils et les indicateurs de vulnérabilité. Cette réflexion sur les vulnérabilités physiologiques et socio-économiques a déjà été engagée durant mes travaux de stage de licence 3 et de master 1 et sera poursuivie en doctorat. Dans cet esprit, cette caractérisation du risque dans son ensemble fera l'objet d'un questionnement épistémologique sur l'efficacité des modes de spatialisation, de mise en carte du risque et de prévention en matière de gestion des fortes chaleurs.

Abatte G., 1997, « *Heat island study in the area of Rome by integrated use ERS-SAR and Landsat TM* », articles dans *The 3rd ERS Symposium*, 14-21 March, 1997, Florence, Italie. <<http://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/abbate/>>.

Abtualeb K., Adeline N., Ahmed F., Ahmed M.H. et Elkafrawy S.B., 2014, « Investigation of urban heat island using Landsat data », dans *Proceedings of the 10th International Conference of African Association of Remote Sensing of the Environment*, 27-31 octobre 2014, Johannesburg, <[http://www.academia.edu/11407129/Investigation\\_of\\_Urban\\_Heat\\_Island\\_using\\_Landsat\\_data](http://www.academia.edu/11407129/Investigation_of_Urban_Heat_Island_using_Landsat_data)>

Allard L. et Blondeau O, 2013, « Pour un Internet des Objets citoyen : vers une intelligence collective environnementale », <http://www.citoyenscapteurs.net/> consulté le 05/04/17

Aminou D.M., Lamarre D., Stark H., Blythe P., Fowler G., Gigli S., Stuhlmann R. et Rota S., 2009, « *Meteosat Third Generation (MTG) Status of Space Segment definition* », *Proceedings of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Bath, RU, Sept. 21-25, 2009, EUM : 55 p.

Amorim M.C.C.T. et Dubreuil V., 2016, « Intérêt des images visibles et infrarouge du satellite Landsat-8 pour modéliser l'îlot de chaleur urbain à Presidente Prudente (SP) – Brésil », XXIX<sup>e</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lausanne – Besançon 2016 : 6 p.

Anadon M. et Savoie-Zajc L., 2007, « La recherche-action dans certains pays », dans Anadon M. et Savoie-Zajc L. « La recherche participative », Multiples regards. Québec : PUQ. p. 11-30.

Aniello, C., Morgan, K., Busbey, A., et Newland, L., 1995, « *Mapping micro urban heat islands using Landsat TM and a GIS* », *Comparative Geoscience*, Vol.21 : pp.965–969.

Arnaud M. et Emery X., 2000, « Estimation et interpolation spatiale : méthode déterministes et méthodes géostatistiques », Editions Hermès Science : 221 p.

Arnfield A., 2003, « *Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island* », *International Journal of Climatology*, Vol. 23 : pp. 1 à 26.

Arnstein S.R., 1969, « *A ladder of citizen participation*. *Journal of the American Institute of the Planners* », Vol. 65, n°4 : pp. 216-224.

APUR, 2012, « Rapport d'activité » : 78 p.

Azevedo J.A, Chapman L. et Muller C.L., 2016, « *Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK : A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations* », *Remote Sensing*, Vol. 8, Iss. 153 : 18 p.

Baillargeon C., 2002, « *Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations* », Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université

Laval dans le cadre du programme de maîtrise en statistique pour l'obtention du grade de maître des sciences (M.Sc.), Québec.

Bales E., Nikzad N., Ziftci C., Quick N., Griswold W., Patrick K., 2014, « *Personal Pollution Monitoring: Mobile Real-Time Air-Quality in Daily Life* », <http://cseweb.ucsd.edu/~earrowsm/TR.pdf/> consulté le 05/04/17

Barsi J.A., Barker J.L. et Schott J.R., 2003, « *An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument* », dans Proc. IEEE 1GARSS, Toulouse, France : pp. 3014-3016.

Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi F.D. et Hook S.J., 2005, « *Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments* », dans Proc. SPIE, Bellingham, WA. 2, vol. 5882.

Baum F., Sanderson C. et Jolley G., 1997, « *Community participation in action: an analysis of the South Australian health and social welfare councils* », *Health Promotion international*, 1997, vol.12, n°2 : pp. 125-134.

Bœuf G., Allain Y.M., Bouvier M., 2012, « L'apport des sciences participatives dans la connaissance de la biodiversité », rapport remis au Ministère de l'Écologie : 28 p.

Bonney R., Cooper C.B., Dickinson J., Kelling S., Phillips T., Rosenberg K.V., Shirk J., 2009, « *Citizen science: a developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy* », *BioScience*, Vol. 59, n°11 : pp. 977-984.

Bosser P., 2013, « Introduction à l'Interpolation spatiale et aux géostatistiques », Cours de l'École Nationale des Sciences Géographiques, Département Positionnement Terrestre et Spatiale : 50p.

Bourassa M., Bélair L. et Chevalier J., 2007, « Les outils de la recherche participative », dans *Education et francophonie*, volume XXXV :2-Automne 2007 : pp. 3-13.

Brandsma et Wolters, 2012, « *Measurement and Statistical Modeling of the Urban Heat Island of the City of Utrecht (the Netherlands)* », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51 : pp. 1046-1060.

Broomhead D.S. et Lowe D., 1988, « Radial basis functions, multi-variable functional interpolation and adaptive networks », *Royal signals and radar establishment : RSRE, Memorandum N° 4148* : 39 p.

Bruse M., et Fleer H., 1998, « *Simulating Surface- Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model* », *Environmental Software and Modelling* , Vol.13, S. : pp. 373–384.

Buyadi S.N.A., Wan Mohd W.M.N., et Misni A., 2014, « *Quantifying Green Space Cooling Effects on the Urban Microclimate using Remote Sensing and GIS Techniques* », *FIG Congress 2014 : Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance*, Kuala Lumpur, Malaysia 16-21 Juin 2014 : 16 p.

Cantat O., 2004, « L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps »,

- Castell N., Kobernus M., Liu H.-Y., Schneider P., Lahoz W., Berre A.J. et Noll J., 2014, « *Mobile Technologies and Services for Environmental Monitoring: The Citi-Sense-MOB Approach* », *Urban Climate*, September 2014.
- Chambers R., 1994, « *The origins and practice of participatory rural appraisal* », *World Development*, Vol. 22, n° 7 : pp. 953-969.
- Chandler T., 1965, « *The Climate of London* », Hutchinson : 292 p.
- Chen X-L., Zhao H-M., Li P-X. et Yin Z-Y., 2006, « *Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes* », *Remote Sensing of Environment*, Vol. 104 : pp. 133 à 146.
- Cohn J.P., 2008, « *Citizen science: can volunteers do real research?* », *Bioscience* v.58 : pp. 192-197.
- Conrads L., 1975, « *Observations of meteorological urban effects: The heat island of Utrecht* », thèse, Université d'Utrecht : 84 p.
- Dahech D., Beltrando G. et Bigot S, 2005, « *Utilisation des données NOAA-AVHRR dans l'étude de la brise thermique et de l'îlot de chaleur. Exemple de Sfax (se tunisien)* », *Cybergeo: European Journal of Geography* : dDcument 317 : <<http://cybergeo.revues.org/3132>> ISSN 1278-3366.
- Dahech S., 2012, « *Evolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax entre 1987 et 2010. Impact sur la consommation d'énergie en été* », *Climatologie*, numéro spécial *Climats et changement climatique dans les villes* : pp. 11 à 32.
- Dewey H., 1934, « *Art as experience* », Londres : George Allen and Unwin Ltd.
- Diallo-Dudek J., 2015, « *Land Surface Temperature in the urban area of Lyon metropolis: a comparative study of remote sensing data and MesoNH model simulation* », Actes du colloque « *Joint Urban Remote Sensing Event* », Lausanne : 30 mars-1er Avril 2015.
- Dickinson J.L., Shirk J., Bonter D., Bonney R., Crain R.L., Martin J., Phillips T. et Purcell K., 2012, « *The Current State of Citizen Science as a Tool for Ecological Research and Public Engagement* », *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(6) : pp. 291–97.
- Dousset B. et Gourmelon F., 2003, « *Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover* », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 58 Iss.1-2 : pp. 43 à 54.
- Dubreuil V., Barbosa P.H., Foissard X. et Amorim M.C.C.T, 2016, « *Utilização de imagens infravermelhas do satélite landsat para cartografar a ilha de calor urbana em rennes – França* », XII<sup>e</sup> Colloque SBCG : Variabilidade e suscetibilidade climática: implicações ecossistêmicas e sociais, 25-29 octobre 2016, Goiânia (GO)/UFG : 11p.
- Duché S. et Madelin M., 2015, « *Les capteurs low cost de pollution : un nouvel eldorado pour l'évaluation de l'exposition individuelle aux particules ?* », XXVIII<sup>e</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège : 6p.
- ENVISAT, 2013, « *ATSR LST L2 Product User Guide* », Version 1.0 : 23 p.

Erell E., Pearlmutter D. et Williamson T., 2011, « Urban microclimate : designing the spaces between buildings », Earthscan.

Erickson V.L. et Cerpa A.E., 2012, « *Thermovote: participatory sensing for efficient building HVAC conditioning* », dans *Proceedings of the Fourth ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings* (BuildSys '12). ACM, New York, NY, USA : 9-16.

EUMETSAT, 2001, « Meteosat », pp. 60-87., <<http://sci.esa.int/science-e/www/object/doc.cfm?fobjectid=36459>>

European Space Agency, 1993, « *Use of ERS-1 SAR data for land applications* », *Proc. Second ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment*, Hamburg, Allemagne, 11-14 October 1993 : 361 p.

Fabrizi R., Bonafoni S. et Biondi R., 2010, « *Satellite and Ground-Based Sensors for the Urban Heat Island Analysis in the City of Rome* », *Remote sensing*, vol. 2, Iss. 5 : pp. 1400 à 1415.

Fabrizi R., De Santis A. et Gomez A., 2011, « *Satellite and ground-based sensors for the Urban Heat Island analysis in the city of Madrid* », *IEEE* , janvier 2011 : 4 p.

Fiorino D.J., 1996, « *Environmental policy and the participation gap* », dans W. Lafferty et J.Meadowcroft, *Democracy and the environment: problems and prospects*, Ed. Cheltenham, Brookfield, Edward Elgard : pp.194 à 212.

Foissard X., Quénot H. et Dubreuil V., 2013, « Analyse et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'agglomération rennaise », *XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie* : 7 p.

Freire P., 1970, « *Pedagogy of the oppressed* », New York , *The Continuum International Publishing Group* : 181 p.

Freire P., 1974, « *Education for critical consciousness* », New York, *The Continuum International Publishing Group* : 152 p.

Fury R. et Joly D., 1995, « Interpolation spatiale à maille fine des températures journalières », *La météorologie* 8<sup>ème</sup> série, N°11 –septembre 1995 : pp. 36 à 43

Gallo, K. P., et Owen, T. W., 1998, « *Assessment of urban heat islands: A multi sensor perspective for the Dallas Ft Worth, USA region* », *Geocarto International*, Vol. 13 : pp.35 à 41.

Garcia M.C.M. et Pardo J.A.S., 2016, « *El estudio de la isla de calor urbana en el Ambito mediterraneo : una revision bibliografica* », *Biblio 3W : Revisat Bibliografica de Geografia y Ciencias Sociales*, Vol. 21, Iss. 1.179 : 32p.

Gartland, L., 2010, « *Heat Island : Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas* ». Earthscan : 208 p.

Giroux M., 2011, « La participation citoyenne, un outil pour mieux connaître la biodiversité : portrait nord-américain », Présentation aux Troisièmes Rendez-vous de l'Accord Canada- France, Biodôme de Montréal, 22-26 mars 2011.

Guigère M., 2009, « *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains* », Institut Nationale de Santé Publique du Québec : 95 p.

Guillemette S. et Savoie-Zajc L., 2012, « La recherche-action et ses rapports de coconstruction de savoirs et de formation dans une perspective de professionnalisation entre acteurs, praticiens et chercheurs », *Formation et profession* 20(3) : 12 p.

Goodchild M. F., Li L., 2012, « *Assuring the Quality of Volunteered Geographic Information* », dans *Spatial Statistics*, 1 : pp.110–120.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2001, « *Climate Change 2001 : Synthesis Report (Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* », édité par R.T. Watson et le *Core Writing Team*, Cambridge, Royaume-Uni et New-York : Cambridge University Press.

Hadjimitsis D.G., Retails A., Michaelides S., Tymvios F. et Paronis D., Themistocleous K., Agapious A., 2013, « Satellite and Ground Measurements for Studying the Urban Heat Island Effect in Cyprus » dans HADJIMITSIS D.G., (ed). *Remote Sensing of Environment Integrated Approaches*. <<http://www.intechopen.com/books/remote-sensing-of-environment-integratedapproaches/satellite-and-ground-measurements-for-studying-the-urban-heat-island-effect-incyprus>>.

Haklay M., 2015, « *Citizen science and policy: A European perspective* », Washington D.C., The Woodrow Wilson Center/Commons Lab : 76 p.

Hu Y.H., Jia G.S., 2009, « *Influence of land use change on urban heat island derived from multi-sensor data* », *Int J Climatol* 30: pp.1382-1395.

Houiller F. et Merilhou-Goudard J.B., 2016, « Les sciences participatives en France : états des lieux, bonnes pratiques et recommandations », Rapport destiné au Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche : 124 p.

IPCC, 2013, « *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group* », dans « *The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* » de Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. et Midgley P. M., *Cambridge University Press*, Cambridge, Grande-Bretagne et New York, NY, USA : 1535 pp.

Jouzel J., Ouzeau G., Deque M., Jouini M., Planton S., Vautard R., 2014, « Le climat de la France au XXIème siècle », Volume 4. Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer : 64 p.

Kaloustian N. et Diab Y., 2015, « *Effects of urbanization on the urban heat island in Beirut* », *Urban Climate*, 2015, Vol. 14, Part. 2 : pp. 154 à 165.

Keramitsoglou I., Kiranoudis C.T., Ceriola G., Weng Q. et Rajasekar U., 2011, « *Identification and analysis of urban surface temperature patterns in Greater Athens, Greece, using MODIS imagery* », *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, Iss.12 : pp.3080 à 3090.

Kim H.H., 1992 « *Urban Heat Island* », *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13, Iss. 12 : pp. 2319 à 2336.

King J., Lonquist M.P. et Peg M. 1994, « *The future of collaborative action research : promises, problems, and prospects* », *Conference papers* : 43 p.

Konno S., Izumi T. et Takahashi H., 2015, « *Relationship between Terra/ASTER Land Surface Temperature and Ground-observed Air Temperature* », *Geographical Review of Japan Series B*, Vol. 88, Iss. 1 : pp. 38-44.

Lac C., Donnelly R.P., Masson V., Pal S., Riette S., Donier S., Queguiner S., Tanguy G., Ammoura L., Xueref-Remy I., 2013, « *CO2 dispersion modelling over paris region within the CO2-megaparis project* », *Atmos. Chem. Phys.*, Vol.13 : pp. 4941 à 4961.

Lafore J. P. , Stein J., Asencio N., Bougeault P., Ducrocq V., Duron J., Fischer C., Hérelil P., Mascart P. , Masson V., Pinty J. P., Redelsperger J. L., Richard E. et Vilà-Guerau de Arellano J., 1997, « *The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: adiabatic formulation and control simulations* », *Annale Geophysicae*, Vol. 16, Iss. 1 : pp. 90–109.

Lahme E. et Bruse M., 2003, « *Microclimatic effects of a small urban park in a densely built up area : measurements and model simulations* », poster pour *European Commission in the 5th Framework Program*.

Lewin K., 1946, « *Action Research and minority Problems* ». Dans *Journal of Social Issues*, volume 2 : pp. 34-46.

Loconte P., Ceppi C., Lubisco G., Mancini F., Piscitelli C. et Selicato F., 2012, « *Climate Alteration in the Metropolitan Area of Bari: Temperatures and Relationship with Characters of Urban Context* », *Computational Science and Its Applications – ICCSA*, Vol. 7334 : pp. 517–531.

Maillard P., David F., Dechesne M., Bailly J.B., Lesueur E., 2014, « *Caractérisation des îlots de chaleur urbains et test d'une solution d'humidification de chaussée dans le quartier de la Part-Dieu à Lyon* », *Techniques Sciences Méthodes* ; 6 : pp. 23-35.

Masson V., 2000, « *A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models* », *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 94 : pp. 357-397.

Maupassant (de), G., 1885. *Bel-Ami*, Ed. Ollendorff, Paris, 352 p.

Mestayey P.G., Durand P., Augustin P., Bastin S., Bonnefond J-M., Bénech B., Campistron B., Coppalle A., Delbarre H., Dousset B., Drobinski P., Druilhet A., Fréjafon E., Grimmond C.S.B., Groleau D., Irvine M., Kergomard C., Kermadi S., Lagouarde J-P., Lemonsu A., Lohou F., Long N., Masson V., Moppert C., Noilhan J., Offerle B., Oke T.R, Pigeon G., Puygrenier V., Roberts S., Rosant J-M., Sanid F., Salmond J., Talbaut M. et Voogt J., « *The urban boundary-layer field campaign in marseille (ubl/clu-escompte): set-up and first results* », *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.114, Iss. 2 : pp. 315 à 365.

Météo-France, 2011-a, « Aide mémoire pour l'observation du réseaux d'observation du climat de Météo-France », Edition pour la France métropolitaine : 6 p.

Météo-France, 2011-b, « Étude du changement climatique pour le SRCAE Rhône-Alpes » : 73 p.

Moran M.S., Jackson R.D., Clarke T.R., Qi J., Cabot F., Thome K.J. et Markha B.L., 1995, « *Reflectance factor retrieval from Landsat TM and SPOT HRV data for bright and dark targets* », *Remote Sensing of Environment*, Vol. 52, Iss. 3 : pp. 218 à 230.

Musy M., Calmet I., Bozonnet E., Rodriguez F., 2012, « Modélisation des interactions ville-climat-énergie », Colloque « La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain », Février 2011, Marne la Vallée, France. *Revue du commissariat général au développement durable* : pp. 16-33.

NASA, 2000, « *Landsat 7 Science Data Users Handbook* », document de préparation en vu du *Landsat Project Science Office* :186 p.

NASA, 2009, « *GOES N series data book* », PM-1.1-03 Révision D, Novembre 2009 : 226 p.

Nichol J. E., 1996, « *High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: A satellite-based study* », *Journal of Applied Meteorology*, Vol.35 : pp. 135– 146.

NOAA, 2014, « NOAA KLM Users Guide : description of the noaa klm sensor package », révision d'avril 2014 : 79 p.

Nunez M. et Oke T.R., 1977, « *The energy balance of an urban canyon* », *J. Appl. Meteorology.*, Vol.16 : pp. 11-19.

Oke T.R., 1973, « *City size and the urban heat island* », *Atmospheric Environment (1967)* 7 (8): pp. 769–779.

Oke T., 1976, « *The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands* », *Atmosphere*, Vol. 14, Iss. 4 : pp. 268–277.

Oke T.R., 1981, « *Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations* », *J. Climatology*, 1: pp. 237–254.

Oke T., 1987, « *Boundary Layer Climate* », *Routledge*, seconde édition : 460p.

Oliver M. A., 1990, « *Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems* », *International Journal of Geographic Information Systems* 4 : pp. 313–332.

Oliveira S., Andrade H. et Vaz T., 2011, « The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat : a case study in Lisbon », *Building and Environment*, Vol. 46 : pp. 2186 à 2194.

OMM, 2011, « Guide des pratiques climatologiques », *OMM-N°100* : 152 p.

ONERC, 2011, « L'adaptation de la France au changement climatique », Rapport au Premier ministre et au Parlement : 80 p.

ORECC, 2016, « Changement climatique en Rhône-Alpes. Températures moyennes annuelles et saisonnières », Fiche indicateur- Climat : 5 p.

Proglia H., 2007, « Les 100 mots de l'environnement », Presses Universitaires de France, éditions *Que sais-je* : 127p.

Plan d'Urbanisme Construction Architecture, 2015, « Changements climatiques, comment les villes s'adaptent », Le Journal d'informations du PUCA, N°33, octobre-décembre 2015 : 16 p.

Quenault B., 2013, « Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique », *EchoGéo* : 23 p.

Quénol H., Bridier S., Vergne O. et Dubreuil V., 2007, « Apport de la géomatique pour la caractérisation de l'îlot de Chaleur Urbain à Rennes (France) », Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brésil, 21-26 avril 2007, INPE : pp. 5467-5469.

Renard F. et Sarr M.A., 2009, « Quantification spatiale de la pluie en milieu rural sahélien (Ferlo, Sénégal) et en milieu urbain tempéré (Grand Lyon, France) : évaluation de méthodes d'interpolation spatiale », *Sécheresse*, 20 (3) : pp. 244-252.

Renard F., Soto D., Alonso L., 2015, « *Identification et répartition spatiale des personnes vulnérables à la chaleur dans la Métropole de Lyon* ». Congrès SFSE « *Changement climatique et santé : quels risques ? Quels remèdes ?* », 24-25 Novembre 2015, Hôtel de ville de Paris.

Renard F., Alonso L., Soto D., 2016, « *The diversity of land surface temperatures in the Greater Lyon (France) : preliminary characterization with Landsat 8 TIRS to monitor heat waves impacts* », Conférence annuelle de la Japan Geoscience Union, Tokyo, Japon.

Renard F., Alonso L., Bechkit W., Ponsar L., 2017, « La combinaison de l'image satellitaire avec les données citoyennes pour la mesure de l'îlot de chaleur urbain », Actes du colloque *Inforsid*, Toulouse : du 30 mai au 2 juin 2017 : 4p.

Réseaux Conseil en développement Territorial et EXPLICIT, 2010, « Etude des effets du changement climatique dans le Grand Sud-Est », dans le cadre de la Mission d'étude et de développement des coopérations interrégionales et européennes, financé par la DATAR : 103 p.

Robitu M., Musy M., Inard C. et Groleau D., 2006, « *Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate* », *Solar Energy*, Vol. 80 : pp. 435 à 447.

Roth M., Oke T.R. et Emery W.J., 1989, « *Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology* », *International Journal of Remote Sensing*, Vol.10, Iss. 11 : pp. 1699 à 1720.

Rudolf F., 2003, « La participation au piège de l'enrôlement », *Espaces et Sociétés* « Ville et Démocratie », n°112, L'Harmattan : pp.133-153.

Sailor D.J., 2014, « *Risks of summertime extreme thermal conditions in buildings as a result of climate change and exacerbation of urban heat islands* », *Building and Environment*, 78 : pp. 81-88.

- Silvertown J., 2009, « *A new dawn for citizen science* », *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 24, n° 9, pp. 467-471.
- Slater G., 2010, « *The Cooling Ability of Urban Parks* », ASLA 2010 Student Award : 3p.
- Spronken-Smith R., Oke T. et Lowry W., 2000, « *Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park* », *International Journal of Climatology*, Vol. 20 : pp. 1033 à 1047.
- Stewart I., 2011, « *Redefining the urban heat island* », Thèse de doctorat, The University of British Columbia, Vancouver : 368 p.
- Sundborg A., 1950, « *Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area* », *Tellus*, Vol.2 : pp. 222 à 232.
- Terrin J.-J., 2013, « *Jardins en villes, villes en jardin : Gardens in the city* », *Edition Bilingue français et anglais*, Collection *La ville en train de se faire* : 320 p.
- Tranquilli C., Viticchiè B., Pessina S., Hewison T., Müller J. et Wagner S., 2016, « *Meteosat SEVIRI Performance Characterisation and Calibration with Dedicated Moon/Sun/Deep-space Scans* », *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Space Operations*, Daejeon, Korea, May 16-20, 2016, article: AIAA : pp. 2016-2536.
- Proglie H., 2007, « *Les 100 mots de l'environnement* », Presses Universitaires de France, éditions *Que sais-je*, 127p.
- USGS, 2016, « *Landsat 8 (l8) data users handbook* », L8DS-1574, Version 2.0 : 106 p.
- Vigneau J.P., 2005, « *Climatologie* », Edition Armand Colin, Collection Campus : 200 p.
- Walawender J.P., Hajto M.J. et Iwaniuk P., 2012, « *A new ArcGIS toolset for automated mapping of land surface temperature with the use of LANDSAT satellite data* », article de conférence, juillet 2012 : 5p.
- Wamsler C., Brink E., 2014, « *Interfacing Citizens' and Institutions' Practice and Responsibilities for Climate Change Adaptation* », *Urban Climate*, 7 : pp. 64–91.
- Wang F., Qin Z.H., Song C.Y., Tu L.L., Karnieli A., Zhao S.H., 2015, « *An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data* » *Remote Sens* 7 : pp. 4268-4289.
- Watson D. F. et Philip G. M., 1985, « *A refinement of inverse distance Weighted Interpolation* », *Geoprocessing*, 2: pp. 315-327.
- Weng Q.H., 2009, « *Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends* », *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 64(4): pp.335-344.
- Willett W., Aoki P., Kumar N., Subramanian S., Woodruff A., 2010 : Common Sense Community: Scaffolding Mobile Sensing and Analysis for Novice Users. *Pervasive Computing* : pp. 301–318.

Yu C. et Hien W., 2006, « *Thermal benefits of city parks* », *Energy and Buildings*, Vol. 38 : pp. 105 à 120.

Zanter K., 2016, « *Landsat 8, data users handbook* », Département de l'intérieur *U.S. Geological Survey* : 106 p.

## Liste des figures

Figure 1: Evolution des températures annuelles moyennes maximales (Tx) et minimales (Tn) sur la période 1921-2016 .....	12
Figure 2: Evolution du nombre de jours de forte chaleur sur la période 1921-2016 à partir des données de températures de la station météorologique Lyon-Bron.....	13
Figure 3: Seuil Tmin et Tmax (en °C) pour chaque département français - source Météo-France.....	13
Figure 4: Evolution du nombre de jour de canicule sur la période 1921-2016 à partir des données de températures de la station météorologique Lyon-Bron .....	15
Figure 5: Evolution du nombre de période de canicule entre 1921-2016 à partir des données de températures de la station météorologique Lyon-Bron .....	15
Figure 6: Impacts de l'aléa canicule sur la santé humaine en Europe depuis 1985 (source des données : <i>Disaster Database EM-DAT</i> ) .....	16
Figure 7: Impacts de l'aléa canicule sur la santé humaine en France depuis 1990 (source des données : <i>Disaster Database EM-DAT</i> ) .....	17
Figure 8: <i>Différent processus du bilan radiatif terrestre</i> .....	18
Figure 9: <i>Spécificité nocturne de l'atmosphère urbaine (source : Vigneau, 2005 – d'après Hufty)</i> .....	19
Figure 10: <i>Spécificité diurne de l'atmosphère urbaine (source : Vigneau, 2005 – d'après Hufty)</i> .....	19
Figure 11: <i>Profil horizontal schématisé d'un îlot de chaleur urbain se manifestant sur l'agglomération de Lyon.</i> .....	20
Figure 12: Abris blanc ventilé de marque Davis .....	26

Figure 13: Visualisation des données de températures de surface (°C) le 08 juin 2006 à 12h 19 issue du satellite Landsat 7-off - Source USGS .....	40
Figure 14: Différentes températures de surface (°C) suivant le revêtement ou l'exposition au soleil .	41
Figure 15: Thermo-hygromètre et thermomètre infrarouge de précision HVAC+ .....	41
Figure 16: Lieux de passage sélectionnés à partir l'ortho-photographie 8 cm – source Data Grand Lyon .....	42
Figure 17: Enregistreur de température EL-USB-1-RGC-JM .....	43
Figure 18: Enregistreur de température et d'humidité LOG 32-NJM .....	43
Figure 19: Abri antiradiation .....	44
Figure 20: Dispositif de mesures embarqué à l'intérieur d'un panier à Vélo'V .....	44
Figure 21: Carte mentale destiné aux participants des campagnes participatives de mesures de température .....	46
Figure 22: Lieux emblématiques et sites d'intérêt sur Lyon à choisir par les participants-bénévoles .	47
Figure 23: Dispositif SMARTHLY de prise de mesures de température et d'humidité relative .....	47
Figure 24: Nuage de point issue de la validation croisée depuis l'outil RBF à partir des données de la moyenne des températures annuelles 2013 sur le territoire de la Métropole de Lyon.....	51
Figure 25: Interpolation spatiale de la moyenne des températures annuelles 2013 sur le territoire de la Métropole de Lyon par la méthode <i>RBF</i> .....	52
Figure 26: Températures de surface (°C) le 30 août 2016 à 12h29 – source <i>USGS</i> .....	55
Figure 27: Moyenne annuelle 2015 des températures de surface (°C) – source <i>USGS</i> .....	56

Figure 28: Moyenne estivale 2015 des températures de surface (°C)– source <i>USGS</i> .....	57
Figure 29: Moyenne estivale 2015 des températures de surface sur la ville de Lyon (°C) – source <i>USGS</i> .....	58
Figure 30 : NDVI de la Métropole de Lyon le 04 juillet 2015 - source <i>USGS</i> .....	60
Figure 31: Températures de surface le 04 juillet 2015 à 12h22 - source <i>USGS</i> .....	60
Figure 32: Représentation de l'indice de végétation normalisé (NDVI) en fonction des températures de surface le 04 juillet 2015 sur le territoire de la Métropole de Lyon .....	61
Figure 33: Evolution spatial de l'isotherme minimale 24°C sur le territoire de la Métropole de Lyon depuis 2000 - Source Data Grand Lyon .....	62
Figure 34: Evolution spatial de l'isotherme 44°C sur le territoire de la Métropole de Lyon depuis 2000 - Source Data Grand Lyon.....	63
Figure 35: Evolution spatial des isothermes de l'année 2003 sur le territoire de la Métropole de Lyon - Source Data Grand Lyon.....	65
Figure 36 : Etendue spatiale de 22 285m <sup>2</sup> de l'isotherme 32°C pour l'année 2000 au-dessus de la zone arborée de Chassieu/Saint-Priest – source Data Grand Lyon .....	66
Figure 37: Etendue spatiale de 113 518 m <sup>2</sup> de l'isotherme 32°C pour l'année 2003 au-dessus du parc de Parilly – source Data Grand Lyon .....	67
Figure 38: Evolution de l'air (m <sup>2</sup> ) l'isotherme 32°C et de l'isotherme 36°C de la zone arborée proche de l'aérodrome de Bron depuis 2000.....	68
Figure 39: Evolution de l'air (m <sup>2</sup> ) de l'isotherme 32°C et de l'isotherme 36°C du parc de Parilly depuis 2000.....	69
Figure 40: : Distance (1331 m) entre l'île du Souvenir et l'intersection de l'isotherme 36°C avec la droite formée par le boulevard du 11 Novembre 1918 pour l'année 2004 autour du parc de la Tête d'Or – source Data Grand Lyon .....	70

Figure 41: Evolution de la portée (m) de l'isotherme 30°C et de l'isotherme 34°C du parc de la Tête d'Or depuis 2000 .....	71
Figure 42: Températures du sol (°C) acquises grâce au dispositif HVAC le 11 avril 2017 entre 10h30 et 12h30 – source Data Grand Lyon .....	72
Figure 43: Campagne de mesures de températures de l'air (°C) effectuée le 11 avril 2017 (heure de départ : 10h30) – Source Data Grand Lyon .....	74
Figure 44: Campagne de mesures de température de l'air (°C) effectuée le 30 août 2016 (heure de départ : 20h30) – Source Data Grand Lyon .....	75
Figure 45: Photo de groupe prise le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participatives de températures .....	76
Figure 46: Points de mesures enregistrés le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participatives de températures – Source Data Grand Lyon .....	77
Figure 47: Interpolation spatiale par <i>RBF</i> des températures de surface enregistrées le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participatives de température – Source Data Grand Lyon	78
Figure 48: Interpolation spatiale par <i>RBF</i> des températures de l'air enregistrées le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participative – Source Data Grand Lyon .....	79
Figure 49: Interpolation spatiale par <i>RBF</i> de l'humidité relative le 13 avril 2017 lors de la première campagne de mesures participative - Source Data Grand Lyon .....	80
Figure 50: Points de mesures enregistrées le 29 mai 2017 lors de la deuxième campagne de mesures participatives de températures – Source Data Grand Lyon .....	82
Figure 51: Interpolation spatiale par <i>RBF</i> des températures de surface enregistrées le 29 mai 2017 lors de la deuxième campagne de mesures participative– Source Data Grand Lyon .....	83
Figure 52: Interpolation spatiale par <i>RBF</i> des températures de l'air enregistrées le 29 mai 2017 lors de la deuxième campagne de mesures participative – Source Data Grand Lyon .....	84

## Liste des tableaux

Tableau 1: Seuils de canicule en Rhône-Alpes .....	14
Tableau 2 : Caractéristiques des différents satellites météorologiques à orbite quasi polaire et géostationnaire .....	24
Tableau 3: Les différents niveaux d'implication des citoyens dans la recherche participative (Haklay M., 2015) .....	28
Tableau 4 : Etude scientométrique d'articles scientifiques sur les sciences participatives .....	32
Tableau 5: Dates de passage du satellite Landsat 8 au-dessus de la Métropole de Lyon d'avril à juin 2017 .....	36
Tableau 6: Répartition des données Landsat de 2000 à 2017 sur la Métropole de Lyon (le chiffre entre parenthèse indique le nombre de passage de Landsat par mois) .....	39
Tableau 7: Gammes de valeurs du NDVI pour différents types d'utilisation ou couverture du sol.....	59
Tableau 8 : Valeur du coefficient de détermination pour différentes campagnes de mesures de température .....	85

## Liste des abréviations

**ASTER** : *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

**ATSR** : *Along Track Scanning Radiometer*

**AVHRR** : *Advanced Very-High-Resolution Radiometer*

**EOS** : *Earth Observation System*

**ETM+** : *Enhanced TM*

**FCI** : *Flexible Combined Imager*

**MODIS** : *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

**MSS** : *Imageur Multispectral*

**MVIRI** : *Meteosat Visible and Infrared Imager*

**NOAA** : *National Oceanic and Atmospheric Administration*

**OLI** : *Operational Land Imager*

**RBV** : *Caméra Return Beam Vidicon*

**SEVIRI** : *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*

**TIRS** : *Thermal Infrared Sensor*

**TM** : *Thematic Mapper*

## Annexe 1 : Répartition des données issues de passage de jours sans nuages du satellite Landsat 5, 7 (on et off) et 8.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Jun	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
2000								L7 on (1)	L7 on (1)	L7 on (1)		
2001			L7 on (1)			L7 on (1)	L7 on (1)   L5 (1)	L7 on (1)		L7 on (2)		
2002				L7 on (1)		L7 on (1)   L5 (1)		L7 on (1)		L7 on (2)		
2003					L7 on (1)		L5 (2)	L7 off (2)	L7 off (1)			
2004					L7 off (1)	L7 off (1)	L7 off (2)					
2005						L5 (1)						
2006						L7 off (1)						
2007												
2008												
2009												
2010												
2011				L5 (1)								
2012												
2013				L8 (1)			L8 (2)	L8 (3)	L8 (1)			
2014				L8 (1)	L8 (2)		L8 (1)		L8 (1)			
2015				L8 (1)			L8 (2)	L8 (4)				

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
<b>2016</b>		L8 (1)						L8 (2)	L8 (1)			
<b>2017</b>				L8 (1)								

Annexe 2-a: Flyer de programmation du village éphémère All Terre Nativ' (recto)



VILLAGE DES ALTERNATIVES

ÉNERGIE - AGRICULTURE - ÉCONOMIE - VIE COLLECTIVE - ÉDUCATION - BIEN ÊTRE

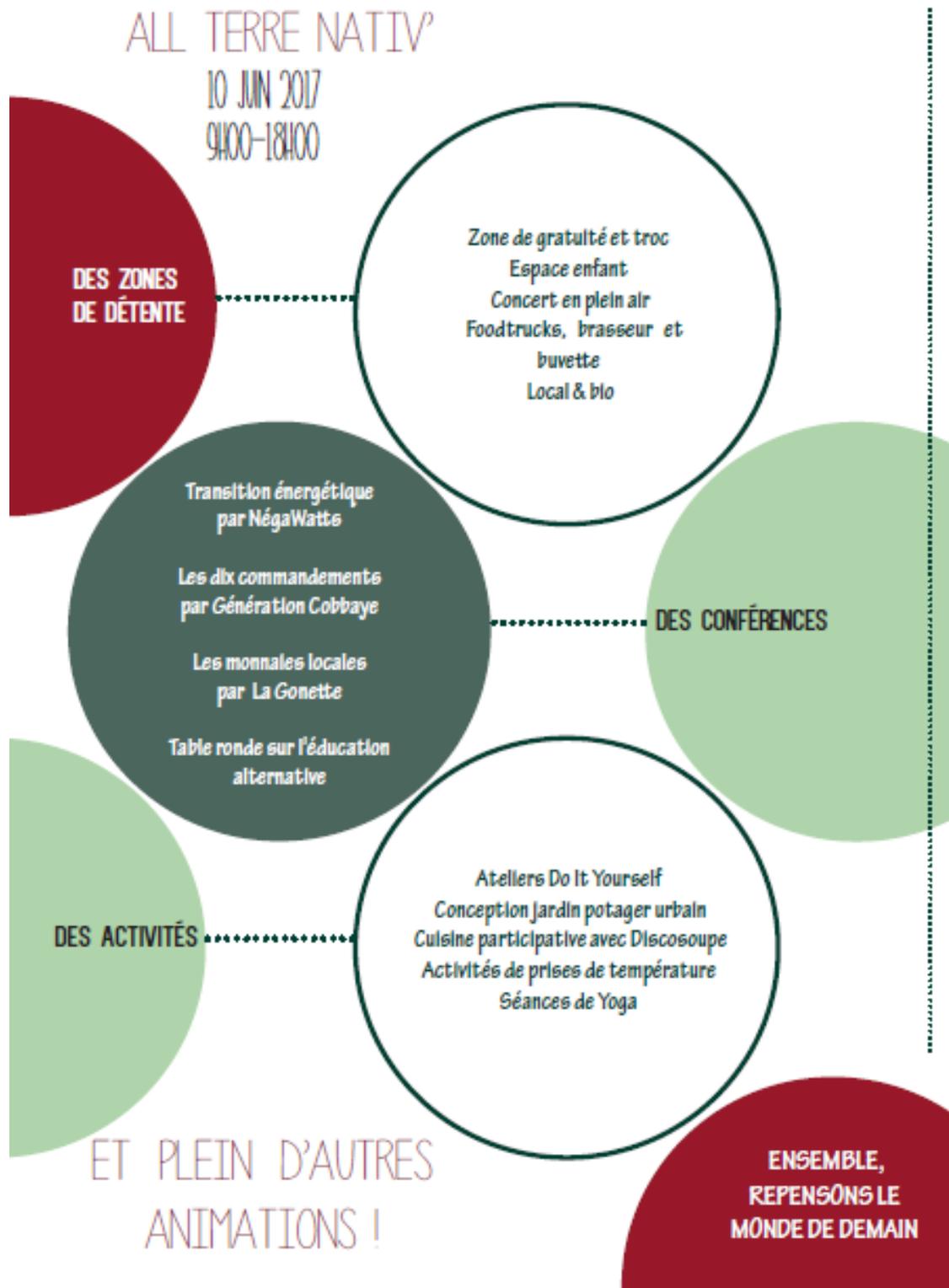


10 JUN 2017  
Berges du Rhône  
Pont Guillotière  
9h00-18h00

SAINTE-MARIE LYON  
MADE IN

 All Terre Nativ'  All.terre.nativ@gmail.com  <http://allterrenativ.wixsite.com/event>

Annexe 2-b: Flyer de programmation du village éphémère All Terre Nativ' (verso)



Annexe 3: Carte mentale thermique collective réalisée lors du village éphémère All Terre Nativ'



Remerciements .....	3
Sommaire .....	5
Introduction à la connaissance des îlots de chaleur urbains : une nécessité pour le territoire lyonnais .....	8
Partie 1. L'îlot de chaleur urbain dans le cadre du changement climatique : enjeux et impacts sur les espaces urbains .....	11
1.1    L'îlot de chaleur urbain : un microclimat naissant au cœur des villes et particulièrement chaud. 11	
1.1.1    Changement climatique global .....	11
1.1.2    Période de canicule et effet sur la population .....	12
1.1.3    Les sociétés et leur climat urbain : la formation des Ilots de Chaleur Urbains (ICU) .....	17
1.2    Est-il possible de quantifier et spatialiser l'ICU ? .....	21
1.2.1    A l'aide de mesures de température de surface : satellitaire et locale .....	21
1.2.2    A l'aide de mesures de la température de l'air .....	25
1.2.3    Le recours à la science participative : entre une ouverture au public et une production de données scientifiques.....	27
1.3    Caractérisation de l'ICU par la prise en compte des différents types de situation atmosphériques et par modélisation .....	33
1.3.1    Les facteurs d'observation du ciel influençant l'intensité des ICU .....	33
1.3.2    Les principes de la modélisation numérique .....	34
Partie 2 : Des méthodes complémentaires de traitement des températures de surface et d'air pour la caractérisation des ICU.....	36
2.1. Mesure des températures de surface par télédétection et mesures locales .....	36
2.2 Mesure de la température de l'air par mesures mobiles.....	42
2.3 Mesure de la température de l'air par participation citoyenne .....	45
2.4 L'interprétation des données à l'aide d'interpolation spatiale et de traitements statistiques ..	48
2.4.1 Méthodes d'interpolation spatiale de la température et de l'humidité relative.....	48
2.4.1.1 Interpolation spatiale à l'aide de krigeage ordinaire .....	49
2.4.1.2 Tracé à l'aide d'un IDW (Inverse Distance Weighting) .....	49
2.4.1.3 Tracé à l'aide d'une interpolation polynomiale globale.....	49

2.4.1.4 Tracé à l'aide d'une interpolation polynomiale locale .....	50
2.4.1.5 Tracé à l'aide d'une méthode particulière des splines.....	50
2.4.2. La régression linéaire entre les différentes méthodes d'appropriation des températures de surface et celles de l'air. ....	53
Partie 3 : Des résultats prometteurs liées à l'utilisation de méthodes complémentaires.....	54
3.1. Des dynamiques thermiques journalières, diurnes et nocturnes misent en évidence à l'aide de techniques supplétives.....	54
3.1.1. La mise en évidence de variations de température de surface remarquables.....	54
3.1.1.1 L'analyse des données satellitaires Landsat.....	54
3.1.1.2 La relation entre valeur du NDVI et températures de surface.....	59
3.1.1.3 Une évolution temporelle et spatiale des isothermes .....	61
3.1.1.4 L'acquisition des températures de surface par le biais du dispositif HVAC+ .....	71
3.1.2. Les campagnes de mesure en vélo révèlent de fortes variations de température de l'air. 73	
3.2. Les campagnes participatives confirment les précédents résultats .....	76
3.2.1 La campagne de mesure de températures du 13 avril 2017 .....	76
3.2.2 La campagne de mesure de températures du 29 mai 2017.....	81
3.3. Confrontation des températures de surface et du sol à l'aide des différents moyens d'acquisition : des résultats encourageants à conforter.....	85
3.3.1 Relation entre températures de surface de Landsat 8 et HVAC + .....	86
3.3.2 Relation entre températures de surface de Landsat 8 et températures de l'air .....	86
3.3.3 Relation entre températures de surface relevées par le HVAC+ et températures de l'air ..	86
Conclusion : des résultats complémentaires prometteurs à approfondir dans le cadre de mon doctorat.....	88
Bibliographie.....	90
Liste des figures.....	100
Liste des tableaux.....	104
Liste des abréviations .....	105
Annexes .....	106
Annexe 1 : Répartition des données issues de passage de jours sans nuages du satellite Landsat 5, 7 ( <i>on</i> et <i>off</i> ) et 8.....	106
Annexe 2-a: Flyer de programmation du village éphémère All Terre Nativ' (recto).....	108
Annexe 2-b: Flyer de programmation du village éphémère All Terre Nativ' (verso) .....	109
Annexe 3: Carte mentale thermique collective réalisée lors du village éphémère All Terre Nativ' .....	110
Table des matières .....	111