
SE FAMILIARISER AVEC LES DONNÉES SATELLITES

Un exemple autour des îlots de chaleur urbains

Maëlle FONTAINE(*), Vianney COSTEMALLE(*)

(*)Insee, Département des Méthodes Statistiques, Division des méthodes et référentiels
géographiques

maelle.fontaine@insee.fr

Mots-clés. Données satellites, télédétection, îlots de chaleur urbains, tache urbaine.

Résumé

Cet article décrit une démarche récente de l'Insee qui, en lien avec des préconisations internationales (Organisation des Nations Unies, Eurostat), a initié sa familiarisation avec un nouveau type de source : les données satellites. Aujourd'hui souvent disponibles en *open data*, les images satellites représentent de nombreuses opportunités pour la statistique publique, à condition de savoir les traiter efficacement et d'être conscients de leurs limites. Contrairement aux sources statistiques plus traditionnelles, elles ont l'avantage certain d'une couverture exhaustive et d'un coût de collecte nul pour les instituts. En revanche, elles comportent l'inconvénient de ne pas être conçues à des fins statistiques, et de poser des questions de qualité et de validité. Dans une première partie générale, nous donnons quelques généralités sur les données satellites et la discipline qui consiste à les traiter, la télédétection. Nous proposons ensuite un panorama des différentes sources disponibles, et détaillons quelques exemples récents d'utilisation de données satellites pour la statistique publique, en France ou à l'étranger. Dans une seconde partie, nous choisissons le thème des îlots de chaleur urbains pour explorer les données issues de *Landsat 8*. Après avoir expliqué en quoi consiste le phénomène d'îlot de chaleur et établi une revue de littérature sur le sujet, nous décrivons notre démarche. Celle-ci consiste à mettre en place une procédure automatique de calcul de différentiel de température entre une ville et sa périphérie, en adoptant la définition officielle actuelle d'une unité urbaine. Nous présentons alors les résultats issus de cette procédure automatique appliquée à une dizaine de villes françaises à l'été 2017. Enfin, nous présentons les différentes limites qui affectent la méthode proposée, et les prolongements qui pourraient être menés pour fiabiliser ces premiers résultats.

Abstract

Nous présentons une première initiative de l'Insee pour explorer des données satellites autour du sujet des îlots de chaleur urbains. L'ambition, pour se familiariser avec ces données, est de

caractériser différentes métropoles françaises selon leur différence de température entre la ville et la périphérie. Après avoir mis en place une procédure automatique d'estimation de ce différentiel de température entre une ville et sa périphérie à partir des données *Landsat 8*, nous obtenons un écart systématiquement positif, de l'ordre de 2 degrés Celsius en moyenne, et peu différent d'une ville à l'autre. En dépit des limites, plutôt d'ordre technique, de cette étude, elle prouve que les opportunités des données satellites pour la statistique publique sont réelles.

Introduction

Depuis le lancement de *Sputnik 1* en 1957, bien du chemin a été parcouru en matière de satellites artificiels. Aujourd'hui, près de 300 satellites par an sont lancés à travers le monde, avec des objectifs aussi variés que l'étude d'autres atmosphères, la mesure des mouvements des étoiles, l'observation de la Terre, ou encore les télécommunications. Parmi eux, ceux destinés à observer les phénomènes terrestres sont à la fois de plus en plus nombreux et de plus en plus performants. En outre, les images qui en sont issues sont de plus en plus souvent disponibles de façon gratuite, favorisant le développement et la mise à disposition, par la communauté scientifique, d'outils libres pour traiter ces données. Aussi, les opportunités que représente l'imagerie satellitaire pour la statistique publique sont aujourd'hui multiples.

Une *Task Team* de l'ONU intitulée "*Earth Observations for Official Statistics*" a publié fin 2017 un rapport destiné à guider les Instituts Nationaux de Statistique (INS) envisageant de mobiliser les données satellites pour les statistiques officielles [33]. Les auteurs font apparaître un changement de paradigme, à l'heure où certaines méthodes statistiques traditionnelles (fondées sur des dénombrements et des mesures humaines) pourraient être remplacées par des estimations à partir de capteurs. Cette mutation amène à s'interroger sur les questions d'incertitude, de qualité, et de validité, puisque contrairement aux sources traditionnelles collectées *in situ* (enquêtes ou recensements), les images satellites ne sont pas conçues pour fournir de l'information statistique publique. Ces données représentent aussi des volumes qui n'ont pas de commune mesure avec les bases de données classiquement utilisées par des INS (de l'ordre de 3 pétabits par an pour le satellite Sentinel, par exemple). Les stratégies d'inclusion de ces nouvelles sources dans les chaînes de production statistique doivent donc s'accompagner en parallèle de développement de technologies "*Big Data*".

Dans cette double démarche, l'ONU pointe du doigt la nécessité pour les INS de se donner des ambitions modestes au départ, et de constituer autant que possible des équipes pluridisciplinaires, pour monter en compétence progressivement. En effet, le plus souvent, les utilisateurs qui souhaitent mobiliser ces données pour des analyses à forte valeur ajoutée souffrent d'un manque d'expertise dans leur utilisation, ne serait-ce que pour évaluer leur validité pour répondre à leur besoin. Pour pallier ce manque, la mise à disposition par les experts de produits dérivés pré-traités (images corrigées, données de températures, cartes, etc.) se développe.

C'est donc avec la modeste ambition de se familiariser avec les données satellites qu'interviennent les synthèses et travaux présentés dans cet article. Dans un premier temps, nous présentons les données satellites, donnons quelques notions de télédétection, et évoquons succinctement l'état de l'art dans quelques cas d'utilisation naturels de ces données dans le cadre de la statistique publique. Dans une seconde partie, nous présentons la méthode et les résultats de travaux visant à déterminer les écarts de température entre différentes métropoles françaises et leur périphérie, grâce aux données du satellite *Landsat 8*.

1 Données satellites et télédétection

1.1 Généralités

Il existe un grand nombre de satellites capables d'observer la surface de la Terre. Ils diffèrent de par de nombreux éléments techniques, parmi lesquels l'inclinaison (ou angle orbital) qui détermine quelle région de la Terre sera observée par le capteur, le type d'orbite (géostationnaire, polaire, direct ou rétrograde, héliosynchrone), le nombre de capteurs (et donc les parties du spectre analysées), et leur résolution¹.

La **télédétection** (ou *remote sensing*) est une discipline qui consiste à obtenir de l'information sur des objets en analysant des données collectées par des instruments n'étant pas en contact direct avec ces objets. Dans la suite, on consacre ce terme à l'observation (au sens large) de la Terre au moyen d'images satellites. Les caractéristiques fondamentales des images de télédétection sont les suivantes :

- la **résolution spectrale** : c'est l'aptitude du capteur à distinguer deux longueurs d'ondes voisines, définie par le nombre de bandes spectrales disponibles ;
- la **résolution spatiale** : c'est la capacité du capteur à distinguer deux objets voisins, souvent exprimée en «résolution-sol» (taille de la zone couverte par un pixel) ;
- la **résolution temporelle** : c'est la capacité de revisite d'un capteur sur un même site d'étude. Celle-ci peut-être altérée selon les conditions atmosphériques (on parle de résolution temporelle réelle VS effective). En général, la résolution temporelle est inversement corrélée à la résolution spatiale.

Selon ces caractéristiques, on distingue alors les imageries **panchromatique** (faible résolution spectrale mais forte résolution spatiale), **multispectrale** (3 à 8 bandes spectrales pas nécessairement contiguës), et **hyperspectrale** (souvent quelques centaines de bandes spectrales, beaucoup plus étroites et souvent contiguës).

En outre, à partir des données brutes issues des satellites, plusieurs types de corrections peuvent être appliquées. Les corrections **géométriques** traitent systématiquement les déformations dues aux erreurs de positionnement du satellite, aux effets de rotation de la terre, aux effets du relief terrestre, au fait que certains satellites prennent des images en oblique, en se fondant sur des informations enregistrées par les satellites. En sortie, les images sont rendues superposables à une carte. Les corrections **radiométriques** consistent à traiter les perturbations liées au fait que la lumière solaire traverse l'atmosphère (gaz, poussières qui viennent modifier les propriétés spectrales du rayonnement) et n'éclaire donc pas tous les objets sous un même angle. Cette deuxième catégorie de traitements est plus rare car ceux-ci sont fondés sur des modèles mathématiques complexes décrivant les interactions principales, mais souffrent d'une mauvaise connaissance de la composition de l'atmosphère au moment et au lieu de la prise de vue.

En pratique, les données satellites sont mises à disposition *via* plusieurs moyens : sites internet (par exemple WMO OSCAR ou Theia), interfaces de programmation (par exemple l'API de l'USGS), scripts de récupération automatique partagés par la communauté d'utilisateurs, etc. Selon le besoin, la requête de l'utilisateur peut plus ou moins être automatisée. Si ces solutions permettent toujours de récupérer les données "brutes" (généralement des `.tif` associées à des métadonnées), elles permettent aussi, de plus en plus souvent, de télécharger des produits ayant déjà subi des chaînes de traitements (étape appelée *pre-processing*). On parle alors de données

1. Pour améliorer la résolution certains satellites enregistrent, non pas des images complètes (carrées) toutes les quelques secondes, mais des lignes de pixels perpendiculairement à son axe de déplacement, et en utilisant le fait que le satellite se déplace de manière régulière le long de son orbite, l'image peut être constituée ligne à ligne.

ARD (pour *Analysis Ready Data*). Ces données résultent d'un certain nombre de processus automatiques de corrections d'erreurs et ont déjà un niveau de validité acceptable, ce qui les rend prêtes à être utilisées dans d'autres types d'algorithmes.

1.2 Panorama des données satellites existantes

Aujourd'hui, les systèmes d'observation de la Terre prolifèrent, avec le risque que l'utilisateur soit perdu. Devant la multiplicité des données, celui-ci souhaite choisir la source qui présente le plus haut niveau de validité. C'est là qu'intervient la notion de *fitness-for-purpose* : il convient de bien définir son besoin, et de choisir le satellite qui est susceptible d'y répondre au mieux, en comprenant qu'un satellite très adapté à un besoin particulier peut se révéler très inadapté pour un autre objectif. Par exemple, une étude sur l'occupation des sols à une date t devra mobiliser un capteur de très bonne résolution spatiale mais ne nécessite pas forcément de bonne résolution spectrale ou temporelle². *A contrario*, une étude sur des dynamiques d'évolutions de température, par exemple, devra s'appuyer sur un satellite de bonne résolution temporelle et couvrant les longueurs d'ondes infra-rouges (permettant de déduire les données de température), mais ne nécessite pas forcément une très bonne résolution spatiale. Statistiques Canada en 2002, puis l'*Australian Bureau of Statistics* (ABS) en 2009, proposent des cadres pour évaluer la validité des différentes sources en fonction des besoins. L'ONU reprend et actualise ces éléments dans son rapport (pages 26 à 30). Les critères à examiner sont les suivants : environnement institutionnel, pertinence, "fraîcheur" (*timeliness*), précision, cohérence, interprétabilité, et accessibilité.

Pour répondre au mieux à une problématique, il n'est pas exclu de combiner plusieurs sources satellitaires (on parle alors parfois de *data-data* ou de *blending*), ou de rapprocher les images satellites d'autres données décrivant un phénomène (on parle alors de *data-model fusion*).

L'ONU propose un tableau synthétique des différentes données satellites dans son rapport, pages 43 à 47 (figure 1). Une cinquantaine de satellites sont recensés, de *Landsat 1* à *Sentinel 3* en passant par *Modis*, *Ikonos*, *Worldview*, *RapidEye*, *Spot*, etc. Pour chacun de ces satellites, sont indiqués le capteur, la résolution spatiale, la période de revisite, la plage temporelle de couverture, l'accessibilité (gratuité ou non). Des scores de 1 à 5 sont également proposées afin d'évaluer le *fitness-for-purpose* pour différents critères (indice de végétation NDVI, pouvoir réfléchissant d'une surface ou albedo, fraction de rayonnement solaire absorbée par les plantes permettant la photosynthèse ou fPAR, indice de surface foliaire ou LAI).

1.3 Quelques exemples

Au premier rang des initiatives d'exploitation de données satellites pour la statistique publique, se trouve le thème des statistiques agricoles. En particulier, la caractérisation de l'occupation des sols apparaît comme un cas d'utilisation naturel des images satellites. Sur ce sujet, exploiter des données satellites revient à faire de la classification d'images, une discipline bien répandue dans divers domaines d'application (diagnostic médical, sécurité, traduction, reconnaissance faciale, agriculture, retouches photographiques, etc.).

2. En termes d'occupation des sols par exemple, les données Sentinel 2 sont sans doute aujourd'hui celles qui constituent la piste privilégiée des chercheurs. En effet, elles constituent un bon compromis entre résolution spatiale et résolution temporelle, bénéficient d'un bon niveau de correction, sont disponibles en open data, et bénéficient de l'expérience d'une forte communauté d'utilisateurs.

Data Currency	Sensor Functional Type	Mission Instruments	Mission Name (Short)	Spatial Resolution (m)	Revisit Period (days)	Accessibility	Launch Date	End Date	NDVI	Albedo	fPAR	LAI
Archival	Optical	TM	Landsat 5	30	16	Open	Jul-82	Jun-13	●	●	●	●
		MSS	Landsat 1-3	80	18	Open	Jul-72	Sep-83	●	●	●	●
		AVHRR/2	NOAA 7-14	1100	1	Open	Jun-81		●	●	●	●
Current	Active microwave	X-Band SAR	TanDEM-X	16	11	Open	Jun-10		●	●	●	●
		X-Band SAR	TerraSAR-X	16	11	Open	Jun-07		●	●	●	●
		S-Band SAR	HJ-1C	20	31	Open	Nov-12		●	●	●	●
		SAR (RADARSAT-2)	RADARSAT-2	25	24	Constrained	Dec-07		●	●	●	●
		Optical	MSI	RapidEye	6.5	1	Constrained	Aug-08		●	●	●
		MSI	Sentinel-2	10/20/60	5	Open	Jun-15		●	●	●	●
		ASTER	Terra	15	16	Open	Dec-99		●	●	●	●
		OLI	Landsat-8	30	16	Open	Feb-13		●	●	●	●
		ETM+	Landsat 7	30	16	Open	Apr-99		●	●	●	●
		Hyperion	NMP EO-1	30	16	Open	Nov-00	Oct-14	●	●	●	●
		AWiFS	RESOURCESAT-2	55	26	Open	Apr-11		●	●	●	●
		LISS-III (Resourcesat)	RESOURCESAT-2	55	26	Open	Apr-11		●	●	●	●
		MISR	Terra	250	16	Open	Dec-99		●	●	●	●
		MODIS	Aqua	250	16	Open	May-02		●	●	●	●
		MODIS	Terra	250	16	Open	Dec-99		●	●	●	●
		AVHRR/3	NOAA-18	1100	1	Open	May-05		●	●	●	●
		AVHRR/3	NOAA-19	1100	1	Open	Feb-09		●	●	●	●
		VEGETATION	SPOT-5	1150	26	?	May-02	Dec-14	●	●	●	●
Future		VIIRS	Suomi NPP	1600	16	Open	Oct-11		●	●	●	●
	Active microwave	SAR (RCM)	RADARSAT C-1	50	12	Constrained	2018		●	●	●	●
		SAR (RCM)	RADARSAT C-2	50	12	Constrained	2018		●	●	●	●
		SAR (RCM)	RADARSAT C-3	50	12	Constrained	2018		●	●	●	●
	Optical	LISS-III (Resourcesat)	RESOURCESAT-2A	5.8	26	Open	2015		●	●	●	●
		MSI (Sentinel-2)	Sentinel-2 A	10	10	Open	2015		●	●	●	●
		MSI (Sentinel-2)	Sentinel-2 B	10	10	Open	2016		●	●	●	●
		MSI (Sentinel-2)	Sentinel-2 C	10	10	Open	2020		●	●	●	●
	LISS-IV	RESOURCESAT-2A	23.5	26	Open	2015		●	●	●	●	
	HISUI	ALOS-3	30	60	?	2016		●	●	●	●	
	AWiFS	RESOURCESAT-2A	55	26	Open	2015		●	●	●	●	
	OLCI	Sentinel-3 A	300	27	Open	2015/16		●	●	●	●	
	OLCI	Sentinel-3 B	300	27	Open	2017		●	●	●	●	
	OLCI	Sentinel-3 C	300	27	Open	2020		●	●	●	●	
	VIIRS	JPSS-1	1600	16	Open	2017		●	●	●	●	

Source: Information derived from the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) Earth Observation Handbook (<http://www.eohandbook.com/>) and WMO Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (<http://www.wmo-sat.info/oscar/>).

FIGURE 1 – Tableau de synthèse des différentes sources satellitaires, extrait de [33]

1.3.1 Occupation des sols

Des statistiques ou cartographies d'occupations du sol sont produites à partir d'images satellites, selon des processus plus ou moins automatisés. C'est le cas de Corine Land Cover, mais aussi des occupations des sols régionales produites pour les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon. Deux expérimentations sont en cours à partir d'images de *RapidEye* : l'une en Rhône-Alpes par la maison de la Télédétection, l'autre en Limousin dans le cadre d'une expérimentation nationale pilotée par la Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN). Ces deux occupations du sol ont des nomenclatures très générales (5 postes : urbain, agricole, naturel, forestier et eau). Elles visent essentiellement à répondre à la problématique du suivi de la consommation des espaces agricoles, naturels et forestiers. Les inconvénients principaux de ces produits sont une précision réduite liée à la résolution des images sources et des erreurs de classification.

Dans le cadre du pôle de données et de services surfaces continentales Theia, une vingtaine de centres d'expertise scientifique (CES) se sont créés fin 2016. Il s'agit de laboratoires nationaux menant des travaux de recherche sur les méthodes innovantes de mobilisation des données satellitaires, et avec pour objectifs de mettre en réseau les acteurs scientifiques, recueillir les besoins des utilisateurs, et concevoir et valider les méthodes, élaborer des produits, et enfin, en former les utilisateurs. L'un de ces CES est relatif à l'occupation des sols à partir des données *Sentinel 2* (CES OSO), et a développé des algorithmes automatiques pour la production de cartes d'occupation des sols. Ces cartes, produites au départ à l'échelle nationale, n'ont pas d'équivalent aux mêmes échelles spatiales ni temporelles. Elles sont en effet mises à jour annuellement, avec un délai très court de production et de mise à disposition (de l'ordre du trimestre), ont une résolution spatiale de 10 à 20 mètres, et avec une nomenclature de plus de 15 classes différentes.

Des travaux sont également en cours à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) pour mettre en place des méthodes de type *deep learning* dans ce même objectif de cartographier exhaustivement le territoire.

Enfin, certains travaux sont relatifs à l'exploitation de séries temporelles d'images satellites (par exemple Dusseux 2014 [22] sur le suivi des prairies en milieu agricole). Dans un premier temps, des profils temporels des paramètres dérivés des données de télédétection obtenues sont établis (à condition d'avoir une répétitivité temporelle suffisante), et ils sont classifiés ensuite dans un deuxième temps, grâce à des méthodes spécifiques qui prennent en compte l'aspect temporel (*dynamic time warping*).

À l'étranger aussi, les initiatives sont nombreuses concernant l'exploitation d'images satellites pour les statistiques d'occupation des sols. Parmi eux, on peut citer des travaux colombiens autour de l'indicateur de développement durable 68 ("*ratio of land consumption rate and population growth rate*") et relatés dans le manuel de l'ONU [33], des travaux de l'institut statistique public portugais autour d'une approche multi-sources pour améliorer l'enquête européenne Lucas [2], ou encore des travaux allemands autour du projet *Cop4Stat* visant à extraire de l'information sur l'occupation des sols à partir des données de *Sentinel 2*.

1.3.2 Autres statistiques agricoles

En dehors de l'occupation des sols, l'exploitation d'images satellites fait aussi l'objet de nombreux projets pilote pour produire des statistiques agricoles. Parmi ces initiatives, on peut citer Marley Elazar Traeger 2014 [6] qui cherchent à estimer des prévisions de récoltes à partir de données issues de *Landsat 7* et *Modis*. De nombreux travaux poursuivent des objectifs proches dans d'autres pays : Etats-Unis, Corée du Sud, Canada, Pays-Bas, etc. Le manuel de l'ONU [33] décrit aussi un projet commun entre Google et l'ONU autour d'estimations de quantités de

pétrole brut, et évoque un projet danois visant à estimer des quantités d'eaux usées.

De plus amples informations sur les potentialités des données satellites pour ce thème sont données dans le manuel de la FAO sur la télédétection pour les statistiques agricoles [14].

1.3.3 Indicateurs de développement durable

Plus récemment, d'autres initiatives ont également été menées, notamment sur le thème des indicateurs de développement durable (ODD) de l'ONU. Une partie d'entre eux pourrait en effet être estimée au moyen de données satellites, comme l'indicateur 11.7.1 caractérisant l'accès de la population urbaine aux espaces verts, et sur lequel l'institut suédois, notamment, développe des travaux, mais aussi d'autres indicateurs comme le 6.6.1 relatif à la perte d'étendue des écosystèmes aquatiques, ou le 15.2.2 relatif à la perte d'étendue des forêts primaires. Ces indicateurs sont récapitulés dans le rapport de l'ONU (pages 59 et 60), et un rapport a également été rédigé conjointement par le Comité sur les Satellites d'Observation de la Terre (CEOS) et l'*European Space Agency* (ESA) intitulé "*Satellite Earth Observation in support of the sustainable development goals*" [5]. Produire ces indicateurs sur la base d'images satellites aurait parfois l'inconvénient d'une moindre précision lorsque des sources de données plus fiables existent, mais aurait en revanche l'avantage d'une couverture exhaustive du globe et la possibilité d'une méthode harmonisée, rendant l'indicateur en principe parfaitement comparable entre pays.

Dans la deuxième partie de cet article, nous allons nous intéresser à une autre utilisation possible des données satellites, autour du sujet des îlots de chaleur urbains. Ce thème intéresse en effet aujourd'hui de nombreux acteurs publics (agences d'urbanisme, agences régionales de santé), en lien avec une recrudescence des épisodes de canicule et de leurs conséquences sur les populations les plus vulnérables. Notre ambition se restreindra à caractériser l'intensité du phénomène d'îlot de chaleur pour différentes villes françaises, grâce à une procédure systématique de mesure de différence de température entre ville et périphérie à partir d'images satellites issues de capteurs infra-rouges. Par rapport aux thèmes agricoles susmentionnés, ce sujet a l'avantage de requérir moins d'expertise en classification d'images de télédétection.

2 Étude du phénomène d'îlot de chaleur urbain sur des grandes métropoles françaises à partir de *Landsat 8*

2.1 Le phénomène d'îlot de chaleur urbain

Définition

On parle d'îlot de chaleur urbain (ICU) pour désigner le phénomène selon lequel les villes sont, en moyenne, plus chaudes que les campagnes ou les périphéries (micro-climat urbain). Selon l'indice de réfléchissement (aussi appelé albedo), le bâti absorbe, ou au contraire, réfléchit, plus ou moins l'énergie solaire. Or les villes absorbent en journée une plus grande partie de l'énergie solaire que leurs périphéries (de 15 à 30 % en plus d'après Tabeaud 2006 [39]). Les villes produisent aussi plus d'énergie de par l'activité humaine et industrielle. Le phénomène ICU peut s'observer le jour mais il est plus accentué encore la nuit, où l'énergie accumulée et plus ou moins piégée par la géométrie du bâti, est restituée. On peut appréhender le phénomène soit à l'échelle globale d'une ville (en comparaison avec sa périphérie), soit à une échelle plus fine, où l'on parle alors parfois de micro-ICU.

Les ICU ne sont ni une cause, ni une conséquence du changement climatique, mais les effets de l'un aggravent les impacts de l'autre et *vice versa*.

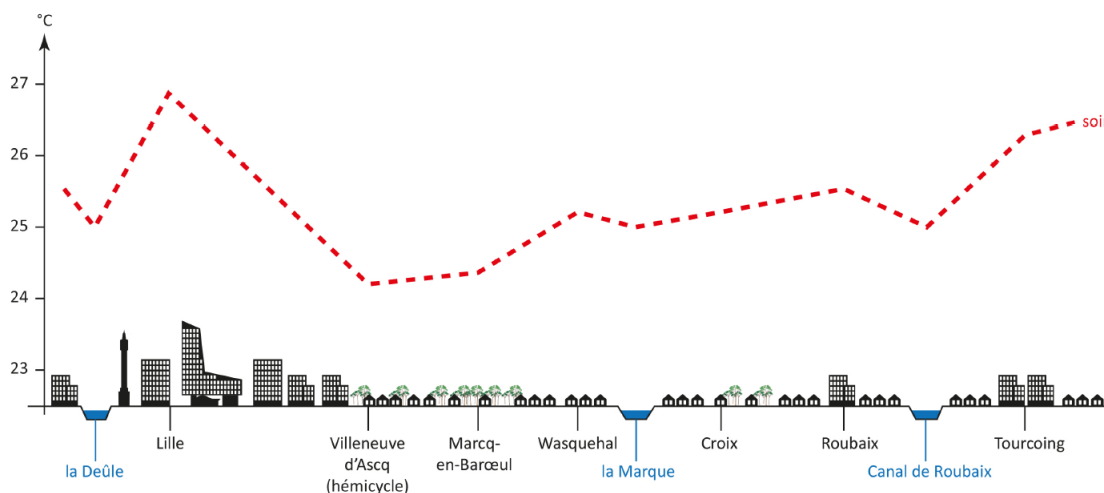


FIGURE 2 – Profil thermique des ICU autour de Lille. Source : Agence de développement et d'urbanisme de Lille métropole, extrait de [10]

Causes

À conditions climatiques données, la présence d'un îlot de chaleur peut s'expliquer par différents facteurs, classés ici par ordre d'influence (selon [41]) :

- la surface en eau ;
- le coloris des revêtements de l'espace public (les couleurs claires réfléchissent plus d'énergie que les couleurs foncées, qui absorbent une plus grande quantité d'énergie solaire) et les matériaux des bâtiments (une toiture en zinc ou en gravier stocke moins d'énergie que du bitume) qui peuvent renforcer l'inertie thermique ;
- les conditions géographiques comme le relief naturel, la forme de la ville, la profondeur des "canyons urbains", l'orientation des rues, l'exposition au vent, etc. ;
- la présence de végétation ;

- la densité des activités humaines (trafic routier, systèmes de chauffage et de climatisation, réseaux d'eau chaude, métabolisme humain, etc.).

Enjeux et leviers

Les conséquences néfastes des îlots de chaleur sont principalement de trois natures :

- un enjeu de **santé publique** avec la plus forte vulnérabilité des villes aux canicules ;
- un enjeu **énergétique** avec des besoins de réfrigération et de climatisation plus grands, induisant une plus forte demande en énergie des habitants et des entreprises, atteignant des pics en épisodes de canicule ;
- un enjeu **environnemental** avec des émissions accrues de gaz à effet de serre liées aux activités humaines (par exemple la climatisation).

Selon le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), la hausse des températures devrait se traduire par une amplification de l'intensité et de la fréquence des ICU. Le phénomène ICU s'accroît, en lien avec l'artificialisation grandissante du territoire d'une part, et avec le réchauffement climatique d'autre part. Dans ce contexte où les villes deviennent de plus en plus irrespirables, les analyses autour des îlots de chaleur deviennent importantes pour les aménageurs publics, qui souhaitent pouvoir repérer les ICU et anticiper leur évolution dans le temps, afin d'en anticiper les conséquences et de mieux protéger les populations les plus vulnérables.

Le phénomène d'ICU est aujourd'hui bien connu et les acteurs publics réfléchissent aux moyens pour lutter efficacement contre ces effets. On peut citer parmi les leviers : réduire la pollution thermique, mettre en place un "urbanisme résilient", c'est-à-dire limiter les zones d'échauffement en créant des "îlots de fraîcheur" (eau ou végétation pas simplement «récréative») ou en privilégiant les revêtements clairs ou les matériaux à faible inertie thermique, humidifier les sols perméables, mettre à profit la fraîcheur du sous-sol, ou encore agir sur les réglementations thermiques.

Revue de littérature

Dans la statistique publique, le sujet des îlots de chaleur ne fait pas à ce jour l'objet de publications dédiées. Néanmoins, depuis les années 1990, de nombreux travaux décrivent les îlots de chaleur urbains en Asie, aux États-Unis, en Europe, en Australie, et font l'objet d'une revue de littérature dans Paravantis et al [40]. Deux approches dominent.

1. La première est la modélisation des processus physiques sous-jacents. Pour ce faire, plusieurs méthodes cohabitent, sans parfois de limite nette entre elles ([25]) : la méthode physique, quasi-physique ou semi-physique. Ces méthodes relèvent de disciplines qui s'éloignent du champ de compétence des statisticiens publics. Il s'agit de prévoir la température à partir de modélisations détaillées de la ville (bâtiments, mobilier urbain, végétation), et des interactions entre les différentes composantes prises en compte. On cherche en particulier à déterminer l'équilibre radiatif.
2. La seconde approche, qui fait l'objet de la suite de cet article, est de réaliser des analyses empiriques à partir de données de température. À l'intérieur de cette catégorie d'études, on peut distinguer :
 - les études qui cherchent à percevoir des **tendances de long terme, en lien avec le réchauffement climatique** : en général elles mobilisent les séries historiques de relevés de stations météorologiques, sur une longue période (plusieurs dizaines d'années). Elles peuvent porter sur un grand nombre de villes, mais ne décrivent pas de phénomène à une échelle inférieure à celle d'une ville ;

- les études qui cherchent à évaluer la **vulnérabilité locale au phénomène de canicule** : il s’agit alors de détecter la présence de micro-îlots de chaleur urbains, à une échelle beaucoup plus fine. Elles mobilisent généralement des données collectées à une date donnée bien choisie (en période de canicule, la nuit), grâce à de multiples capteurs. Certaines, encore rares, font le lien avec des données démographiques, par exemple issues du recensement disponibles à l’Iris. En France, de telles études ont été conduites (ou sont en train de l’être), la plupart du temps par des agences d’urbanisme, dans les villes suivantes :
 - Paris (cartographie de micro-îlots par l’Institut d’aménagement et d’urbanisme³, études conjointes de l’agence d’urbanisme de Paris et de Météo France : [16], [18], [19], [20], [17], ou autres travaux : [15], [23]) ;
 - Lyon ([41], [29]) ;
 - Lille ([10], [11]) ;
 - Strasbourg (une étude à partir de *Landsat 8*, [9]) ;
 - Rennes (cartographie par satellite de l’entreprise Kermap⁴, [1]) ;
 - Nîmes [21], etc.

Ces études dépassent rarement l’échelle d’une ville ou de son périmètre restreint. Les données satellites peuvent être utilisées pour décrire les températures à des échelles aussi fines, mais elles comportent des limites d’interprétation que nous détaillons ultérieurement ;

- les études qui cherchent à **caractériser l’intensité d’un ICU ou de l’expliquer** par d’autres facteurs. Les données satellites peuvent être adéquates dans ces études qui portent sur des dimensions temporelles et spatiales intermédiaires entre les deux précédentes. Zhou et al 2013 ([44] mesurent l’intensité du phénomène d’ICU en comparant la température de surface moyenne de la ville à celle de sa périphérie pour un grand nombre de métropoles européennes. Ils montrent que la plupart des villes sont sujettes au phénomène d’ICU, avec des intensités qui dépendent néanmoins fortement de la température, des précipitations, du vent, des nuages ... Ils mettent en évidence un effet d’hystérèse⁵, sans en identifier clairement les causes. D’autres travaux se concentrent sur les relations entre la présence d’ICU et d’autres facteurs tels que la présence de végétation (Cao et al 2008 [4]), la taille de la population urbaine, ou l’étalement urbain (Debbage et Shepherd 2015 [13]). Enfin, différents articles se concentrent sur l’aspect temporel de l’analyse d’images satellites : identification de saisonnalités et de tendances dans l’apparition d’ICU (Meng et al 2017 [30]), dans leur déplacement au fil du temps (exemple de la ville de Beijing dans Quan et al 2014 [35]), ou dans les variations de températures de surface (Quan et al 2016 [36], Zhou et al 2016 [43], Kourtidis et al 2015 [26], ou Schatz et Kucharik 2014 [37] pour des études récentes portant respectivement sur les villes de Beijing, Londres, Athènes, ou Madison).

2.2 Données et méthode

On se propose ici de mesurer les différences de température entre ville et périphérie, avec en arrière-plan l’idée de mesurer l’impact de la construction humaine sur la température. L’objectif est de cibler une dizaine de métropoles françaises, sur une période estivale récente. On se situe donc à l’échelle globale d’une ville et non à l’échelle plus fine du quartier.

3. http://carto.iau-idf.fr/cartoviz/?id_appli=imu

4. <http://www.kermap.com>

5. On dit qu’il y a un phénomène d’hystérèse lorsque la courbe $ICU = f(T)$ obtenue quand on observe une croissance de T ne se superpose pas avec la même courbe obtenue quand on observe une décroissance de T . Autrement dit, le phénomène ICU ne serait pas totalement réversible.

Données

On utilise les données de *Landsat 8*, et plus précisément ses bandes spectrales 10 et 11. Celles-ci permettent, grâce à une formule physique, de déduire pour chaque pixel, la "*Brightness Temperature*" en haut de l'atmosphère. Cette variable ne correspond ni à la température de surface, ni à la température ressentie par un humain (généralement considérée à 2 mètres du sol), comme nous le détaillerons ultérieurement. La fréquence de passage est de 16 jours. La fauchée (c'est-à-dire la surface observée par le satellite) est d'environ 200 km et la résolutions spatiale est de 30 mètres (ce qui correspond à un pixel sur l'image). Pour la France métropolitaine, le satellite survole toujours le même point à une même heure, en l'occurrence 10h40 du matin pour la France.

Le champ de l'étude porte sur neuf métropoles françaises : Paris, Lyon, Marseille, Strasbourg, Nantes, Rennes, Lille, Toulouse et Bordeaux. L'ensemble des données satellites de *Landsat 8* a été récupéré de façon automatique sur la période portant de juin à septembre 2017.

Méthode

Pour caractériser l'intensité du phénomène d'ICU, on se donne pour objectif de mesurer un différentiel entre la température moyenne à l'intérieur de la ville et la température moyenne à l'intérieur de la périphérie. Pour ce faire, on s'inspire de la méthodologie utilisée par Zhou et al 2013 [44], où les auteurs construisent deux surfaces de même aire, la première correspondant à la ville grâce à une notion de continuité du bâti, et la seconde construite pour être de même superficie que la première, mais n'incluant ni autres tâches urbaines, ni surface en eau. Enfin, pour calculer la température de l'une et l'autre de ces deux zones, les auteurs pondèrent la température des pixels qui le composent par des indices de qualité.

Comme Zhou et al, nous allons considérer la ville selon une notion de continuité du bâti. Cependant, là où eux établissent différentes classes d'occupation des sols pour définir la continuité du bâti, nous utilisons la BDTopo pour être plus proche de la définition de l'Insee d'une unité urbaine, selon laquelle : "*on appelle unité urbaine une commune ou un ensemble de communes présentant une zone de bâti continu (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions) qui compte au moins 2 000 habitants*". Ainsi, on retiendra pour définir la continuité du bâti, les mêmes éléments que ceux servant à la construction du zonage en unités urbaines (habitations, bâti industriel, bâti remarquable, cimetières, aéroports, terrains de sport, et ponts). Ensuite, la périphérie sera définie géométriquement à partir du contour de la ville.

Les grandes étapes de notre démarche sont les suivantes :

1. **Déterminer une zone de bâti correspondant aux surfaces de vie dans l'agglomération.** Pour cela :
 - (a) on actualise le dessin des tâches urbaines avec la BDTopo 2017 selon un processus représenté en figure 3, en utilisant les mêmes définitions de continuité de bâti que pour le zonage de 2010 (le plus récent) ;
 - (b) afin d'approcher au mieux le concept d'espace où vit la population urbaine, on retire de cette tâche urbaine les surfaces en eau, les espaces verts, et ce qui a servi à faire la jonction entre les éléments de bâti indifférencié lors de l'étape précédente de délimitation de la tâche urbaine (bâti remarquable, bâti industriel, cimetières, pistes d'aéroports, terrains de sport, ponts).
2. **Déterminer une zone correspondant à la périphérie de la tâche urbaine ainsi construite.** Pour cela :
 - (a) on construit une zone tampon (ou *buffer*) d'un rayon maximal R (correspondant à la zone grise dans la figure 4), autour de la tâche construite en étape 1a ;

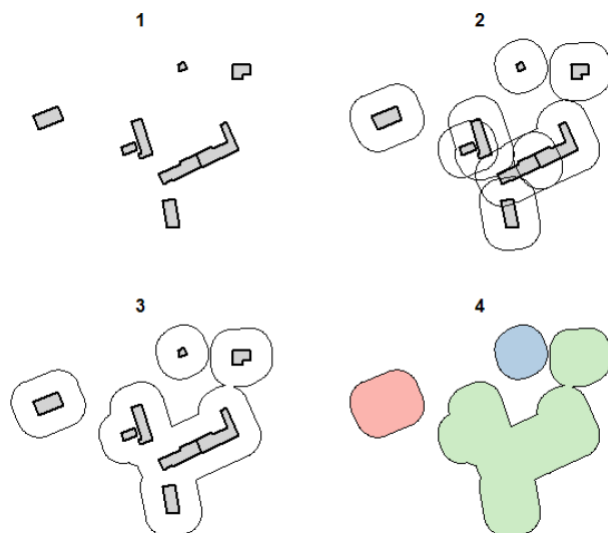


FIGURE 3 – Repérage de la continuité du bâti dans le dessin des tâches urbaines actualisées 2017

Note : On considère qu'il y a continuité si moins de 200 mètres séparent deux bâtiments (buffers de rayon égal à 100 mètres).

- (b) afin d'appréhender au mieux le complémentaire de la population urbaine au sens défini précédemment, on retire de cette zone tampon l'eau, le bâti industriel, et les autres tâches urbaines de plus de 2 000 habitants intersectant cette zone ;
 - (c) on réduit le rayon maximal de la couronne en diminuant R de façon itérative, de manière à ce que les deux objets "tâche urbaine" et "couronne périphérique" soient d'aire égale, une fois retirés tous les éléments susmentionnés. Au terme de cette étape, on obtient deux aires égales correspondant à la ville et à sa périphérie (figure 4).
3. **Recouper avec les données pixellaires de températures issues du satellite *Land-sat 8* :**
- (a) les images satellites ont été téléchargées au préalable de façon automatique pour une plage temporelle donnée et une série de villes données (grâce à un script Python utilisant l'API <https://espa.cr.usgs.gov/api>). On suppose que l'on dispose, pour chaque "image" (c'est-à-dire tuile*date) :
 - i. d'un fichier `.txt` de métadonnées ;
 - ii. d'un fichier `.tif` de "*brightness temperature*" (associé à la bande 10 ou 11) ;
 - iii. d'un fichier `.tif` de "*pixel quality*", contenant une information pixel par pixel de la présence ou non d'un nuage.
 - (b) Pour chaque ville, on sélectionne uniquement les pixels contenus dans les objets construits en sortie des étapes 1 et 2, et on leur associe une date, une température, et un indice de qualité (figure 5). À partir de cette table, on peut établir des cartographies de températures (figure 6).
4. **Déduire un différentiel global de température par ville**, par différence entre les températures de la ville et de la périphérie, obtenues par une moyenne (pondérée ou non) des températures des pixels de qualité suffisante. On peut alors hiérarchiser les villes en fonction de ce différentiel de température ville / couronne.

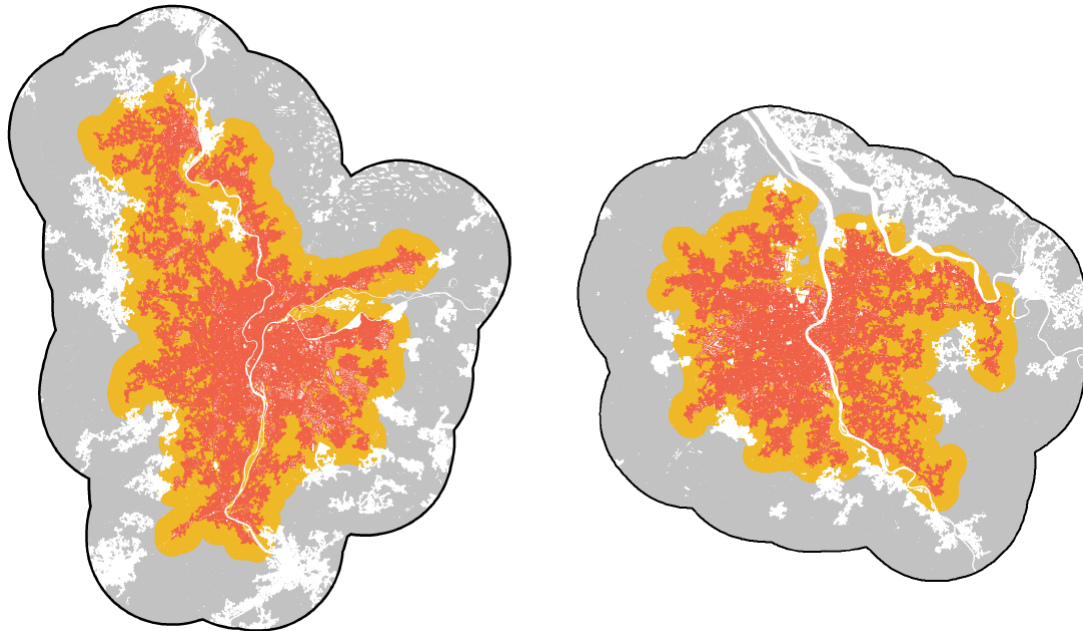


FIGURE 4 – Contours des tâches urbaines (en rouge) et de leur périphérie (en jaune), pour Lyon (à gauche) et Bordeaux (à droite)

temp_b10	temp_b11	pixel_qa	in_TU	ville	date	X	Y
19,75	17,35	322	FALSE	Toulouse	20170605	370050	4849110
19,55	17,15	322	FALSE	Toulouse	20170605	370080	4849110
19,45	17,05	322	FALSE	Toulouse	20170605	370110	4849110

FIGURE 5 – Table contenant l'information par pixel

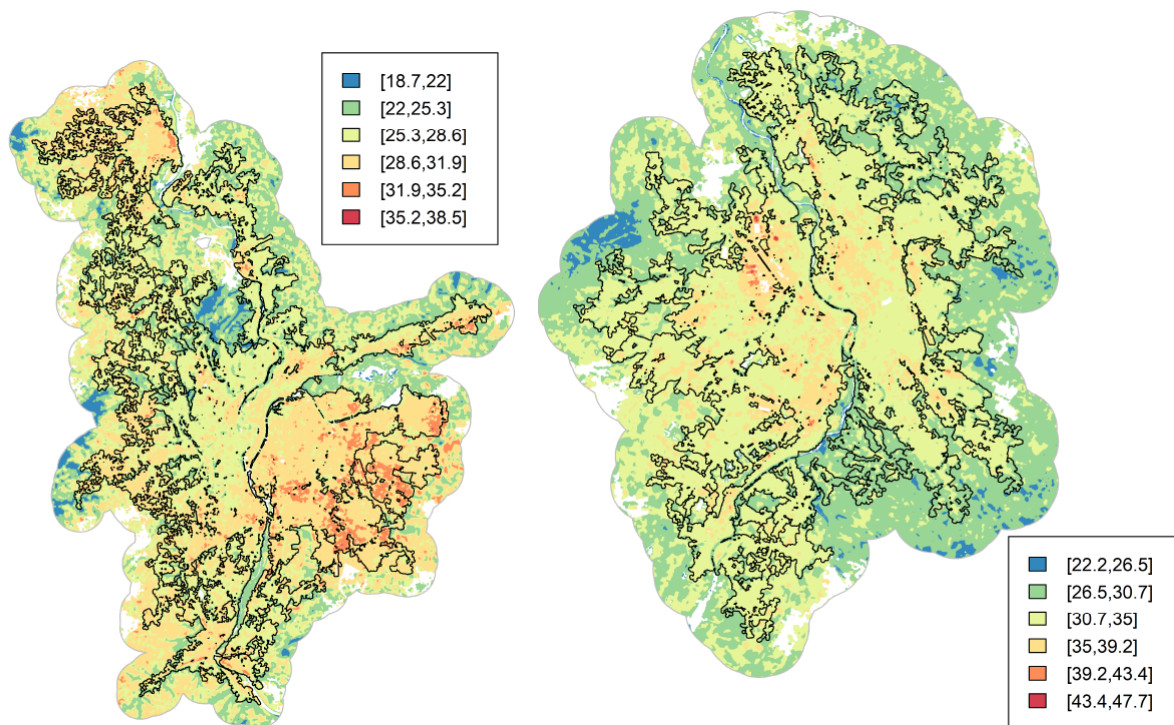


FIGURE 6 – Cartes de températures pour Lyon le 16/07/2017 et Toulouse le 21/06/17

2.3 Résultats

Un différentiel systématique de 2 degrés Celcius en moyenne

Quelles que soient les villes et les dates considérées, la température moyenne est quasiment toujours plus élevée en ville qu'en périphérie (figure 7). Cela est également visible sur les cartes représentées en figure 6. Toutes dates confondues, l'écart entre la température moyenne d'une ville et celle de sa périphérie se situe autour de 2 degrés Celcius en moyenne, quelle que soit la ville à laquelle on s'intéresse. Cet écart moyen varie peu selon la ville : entre 1.6 degrés Celcius pour Lyon et Marseille et 2.8 pour Bordeaux. D'une image à l'autre, cet écart peut varier mais il se situe quasiment toujours entre 1 et 3 degrés Celcius.

Les points chauds sont plus souvent situés en ville

On s'intéresse désormais à la distribution des températures dans la ville et la distribution dans la couronne. Pour une ville et une date donnée, on constate (figure 8) que les distributions sont systématiquement décalés, traduisant l'écart moyen évoqué précédemment. La forme de la densité n'est pas similaire d'une date à l'autre. En particulier, la forme de la distribution n'est pas systématiquement plus régulière dans la ville que dans la couronne, ou inversement.

On s'intéresse ensuite à la localisation des points chauds et froids : sont-ils situés le plus souvent en ville ou en périphérie ? Afin de considérer dans une même analyse les observations relatives à plusieurs dates avec des conditions météorologiques différentes, on définit les points chauds comme les pixels appartenant à un décile de température élevé parmi les pixels exploitables de la même zone d'intérêt à la date d'observation. Ce choix est imparfait car un pixel relativement chaud par rapport à ses voisins en période de canicule, ne le sera pas forcément ou pas autant dans des conditions normales de température. Les résultats de la figure 9 sont plus éloquentes : les 10 % de points les plus froids sont rarement situés dans la ville (dans seulement 20 % environ des cas quelle que soit la ville), tandis que les 10 % de points les plus chauds sont

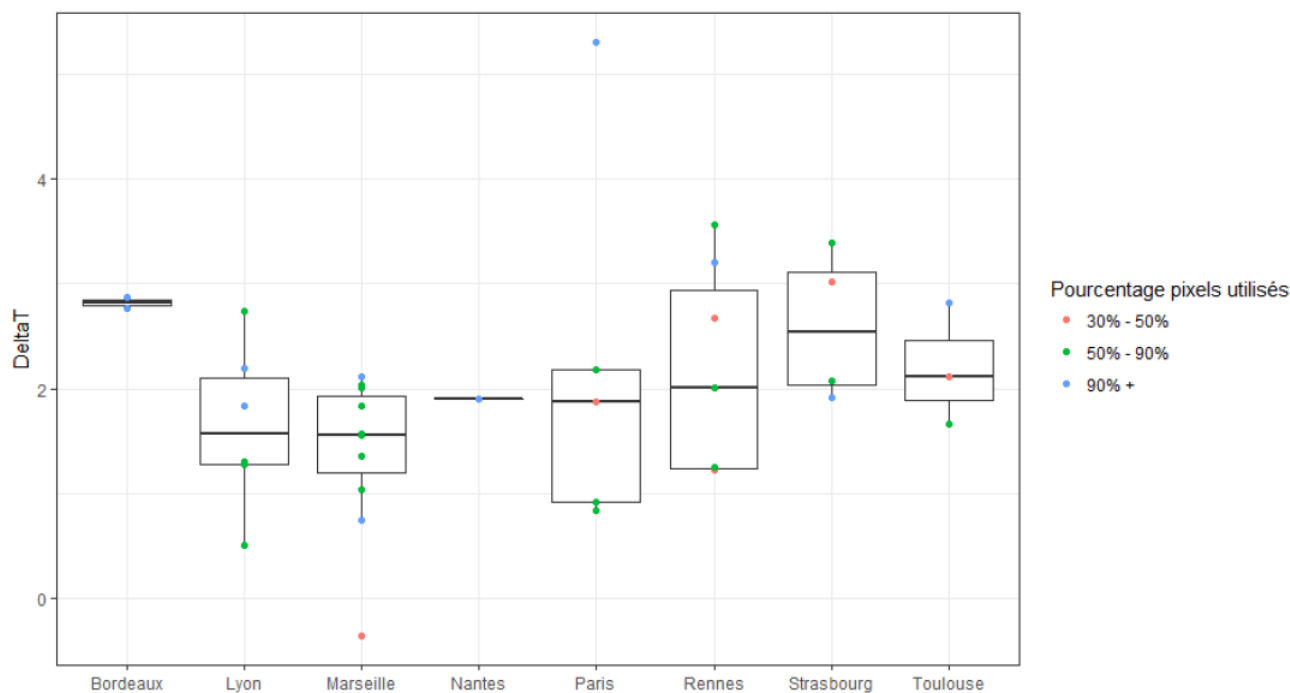


FIGURE 7 – Différentiels de températures, pour 8 villes et 8 dates sur la période de juin à septembre 2017

situés dans la ville dans la majorité des cas (de 65 à 85 % des cas selon la ville considérée). Les écarts entre ville et périphérie semblent moindres dans les villes du sud-est de la France (Lyon, Marseille), par rapport à celles du Grand Ouest (Nantes, Bordeaux, Rennes).

2.4 Limites et prolongements

2.4.1 Mesure de la température

Des différences conceptuelles

On a considéré pour cette étude la température déduite des bandes spectrales 10 et 11, qui diffère de la température ressentie par un humain, pour différentes raisons.

- **La température mesurée avec le satellite n'est pas la température au sol ...**

Ce que permet de mesurer le capteur infrarouge d'un satellite, c'est la radiance (puissance du rayonnement par unité de surface) reçue dans une longueur d'onde donnée. Cette radiance correspond au rayonnement émis et réfléchi par la surface du sol et atténué par l'interaction avec l'atmosphère, plus le rayonnement émis et réfléchi par l'atmosphère. Le rayonnement émis par la surface du sol dépend directement de sa température, de constantes physiques et d'un coefficient d'émissivité noté ϵ^6 , propre à chaque surface. Le problème est que l'on ne connaît pas ce coefficient d'émissivité et on ne connaît pas non plus la part du rayonnement mesuré qui correspond effectivement au rayonnement de la surface. C'est pourquoi lorsque l'on calcule la température directement à partir du rayonnement mesuré, on parle de température de radiance (BT, pour *brightness temperature*) en haut de l'atmosphère (TOA, pour *top of atmosphere*). Celle-ci s'obtient facilement

6. L'émissivité est le rapport de la luminance du corps réel sur la luminance du corps noir porté à la même température.

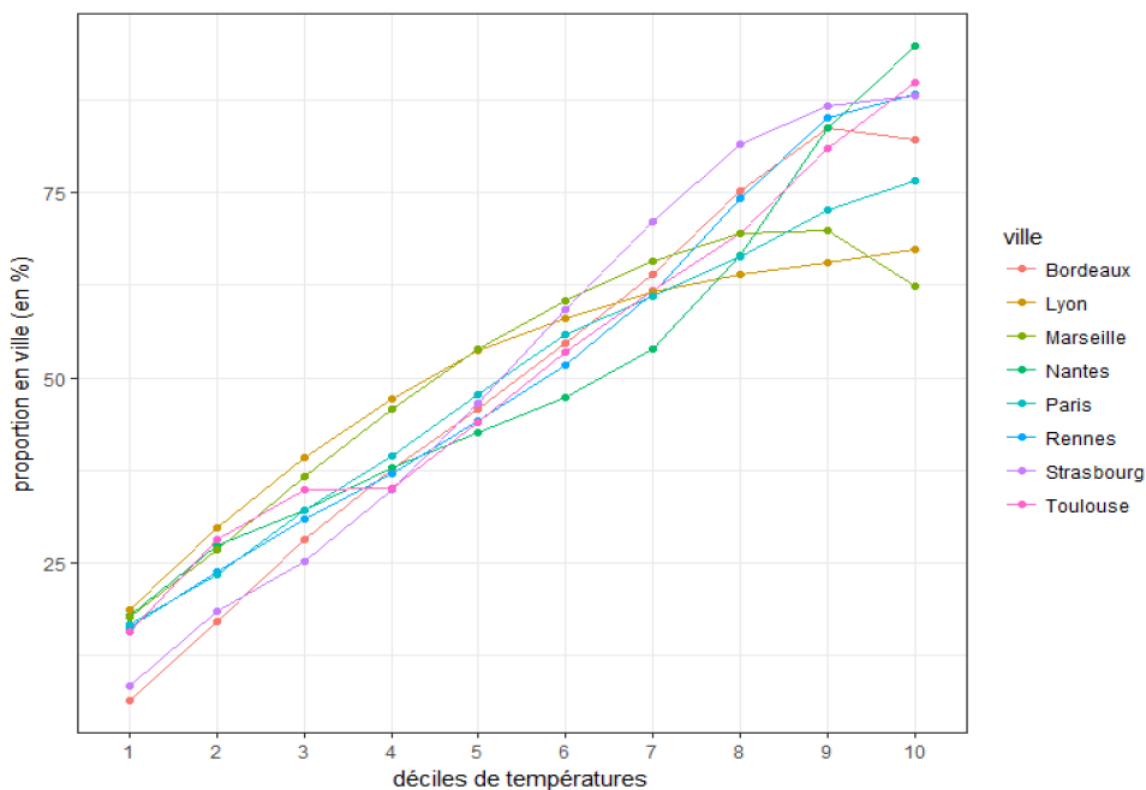


FIGURE 9 – Déciles de température pour plusieurs villes, toutes dates confondues

d’après la formule suivante (voir guide d’utilisation des données de *Landsat 8* [34], section 5) :

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{M_L * V_{pix} + A_L}\right) + 1} \quad (1)$$

où V_{pix} est la valeur prise par le pixel, M_L et A_L sont respectivement les facteurs multiplicatif et additif de radiance, et K_1 et K_2 des constantes thermales⁷. La température ainsi estimée n’est pas la même chose que température au sol (LST pour *Land Surface Temperature*), car d’une part elle intègre les autres rayonnements que celui du sol, et d’autre part on assimile le sol à un corps noir ($\epsilon=1$), ce qui en réalité n’est pas le cas. Pour la généraliser, il faudrait appliquer un coefficient d’émissivité propre à chaque parcelle de la surface. Li et al. 2012 [28] détaillent les raisons physiques de la différence entre la température de radiance en haut de l’atmosphère et la température au sol (figure 10) et font un état de l’art des différentes méthodes qui permettent d’estimer la LST à partir d’images de télédétection. Ces méthodes sont nombreuses et complexes à mettre en place techniquement. Certaines supposent connu le coefficient d’émissivité ϵ (algorithmes dits *single-channel*, *multi-channel* ou *multi-angle*), tandis que d’autres le supposent inconnu et cherchent à l’estimer *via* des méthodes de classification (CBEM), des méthodes fondées sur l’indice NDVI (NBEM), des méthodes de lissage spectral (ISSTES), etc.

- **... et la température au sol n’est pas la température ressentie.**

La température ressentie par un humain dépend de nombreux facteurs, mais est corrélée à la température de l’air. Généralement, la température de l’air est considérée à 2 mètres du sol. La température du sol et la température de l’air peuvent différer en raison notamment

7. M_L , A_L , K_1 et K_2 sont des métadonnées associées à une bande spectrale donnée (10 ou 11 dans le cas de *Landsat 8*)

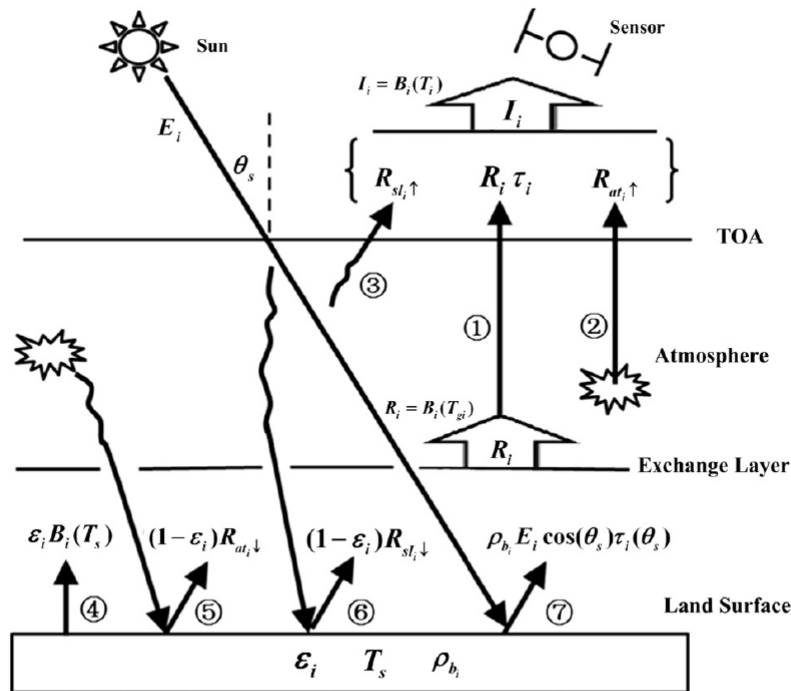


Illustration of radiative transfer equation in infrared regions (see the text for the definitions of symbols). Here, I_i is the radiance measured by channel i at the top of atmosphere. Path ① represents the radiance observed at ground level attenuated by the atmosphere. Paths ② and ③ represent the upward atmospheric thermal radiance and the upward solar diffusion radiance, respectively. Path ④ represents the radiance emitted directly by the surface. Paths ⑤ and ⑥ represent the downward atmospheric thermal radiance and solar diffusion radiance reflected by the surface, respectively. Path ⑦ represents the direct solar radiance reflected by the surface.

FIGURE 10 – Illustration de la différence entre TOA et LST, extrait de [28]

des mouvements de convections thermiques qui font que l'air se mélange et transporte la chaleur.

5 degrés Celcius de différence en moyenne

Pour appréhender quantitativement à quel point les données de température mesurées à partir du satellite diffèrent de celles réellement ressenties par un humain, nous effectuons une analyse comparative à partir des données de Météo France (figure 11). L'institut met librement à disposition des utilisateurs des relevés météorologiques, incluant la température entre autres variables, avec une fréquence de 3 heures, pour plusieurs dizaines de stations en France⁸. Afin que la comparaison ait du sens, nous sélectionnons les pixels contenus dans un cercle de 1 km autour de la station, et nous n'effectuons la comparaison que si au moins la moitié des pixels considérés sont de qualité suffisante dans ce disque. Les stations situées trop loin des centre-villes ont été exclues.

La figure 11 suggère qu'il y a un écart non nul entre les deux mesures de température (de l'ordre de 5 degrés Celcius, soit l'ordonnée à l'origine de la droite de régression), mais la pente unitaire de cette droite indique que les deux mesures évoluent dans le même sens : lorsque la température ressentie augmente d'un degré Celcius, la température mesurée d'après *Landsat 8* augmente également d'un degré Celcius. De plus, pour une ville donnée, si Météo France a mesuré que la température était plus élevée à une date $d1$ qu'à une date $d2$, *Landsat 8* donnera le même résultat (à une exception près). Cette comparaison conduit donc à rassurer sur la pertinence d'une analyse des écarts de températures à partir de *Landsat 8*. Le fait de porter l'analyse sur un périmètre plus large que celui d'un petit cercle autour d'une station Météo France (dont les sites sont choisis pour être propices à des mesures de bonne qualité), peut certes nuancer ce résultat.

8. Des données plus précises ou sur un plus grand nombre de stations sont disponibles avec redevance.

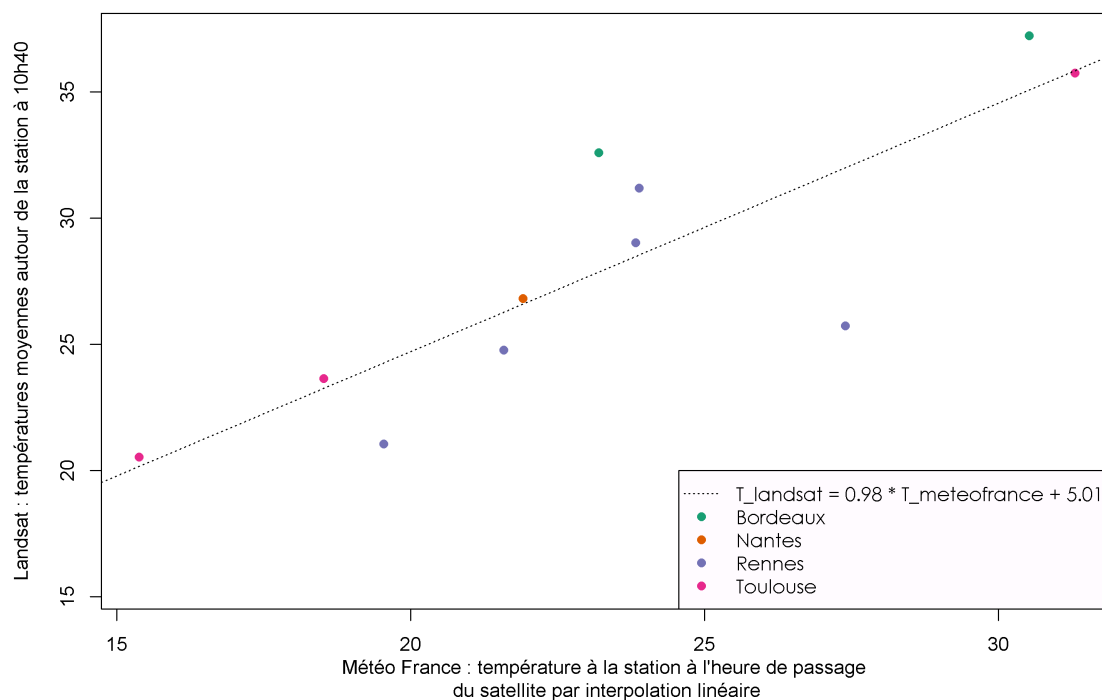


FIGURE 11 – Températures obtenues à partir de *Landsat 8* en fonction de celles mesurées en station par Météo France

Note : La température *Landsat 8* correspond à la moyenne des pixels de bonne qualité dans le cercle de 1 km autour de la station. Parmi les stations considérées, et avec ce filtre, seules 4 font l'objet de la comparaison. La température de Météo France à l'heure de passage du satellite (10h40) est obtenue par interpolation linéaire entre les températures mesurées à 9h et à 12h.

Cependant, comme le montre la figure 12 avec l'exemple de Toulouse, pour une ville donnée, les écarts entre les températures analysées et celle de la station la plus proche, restent raisonnables.

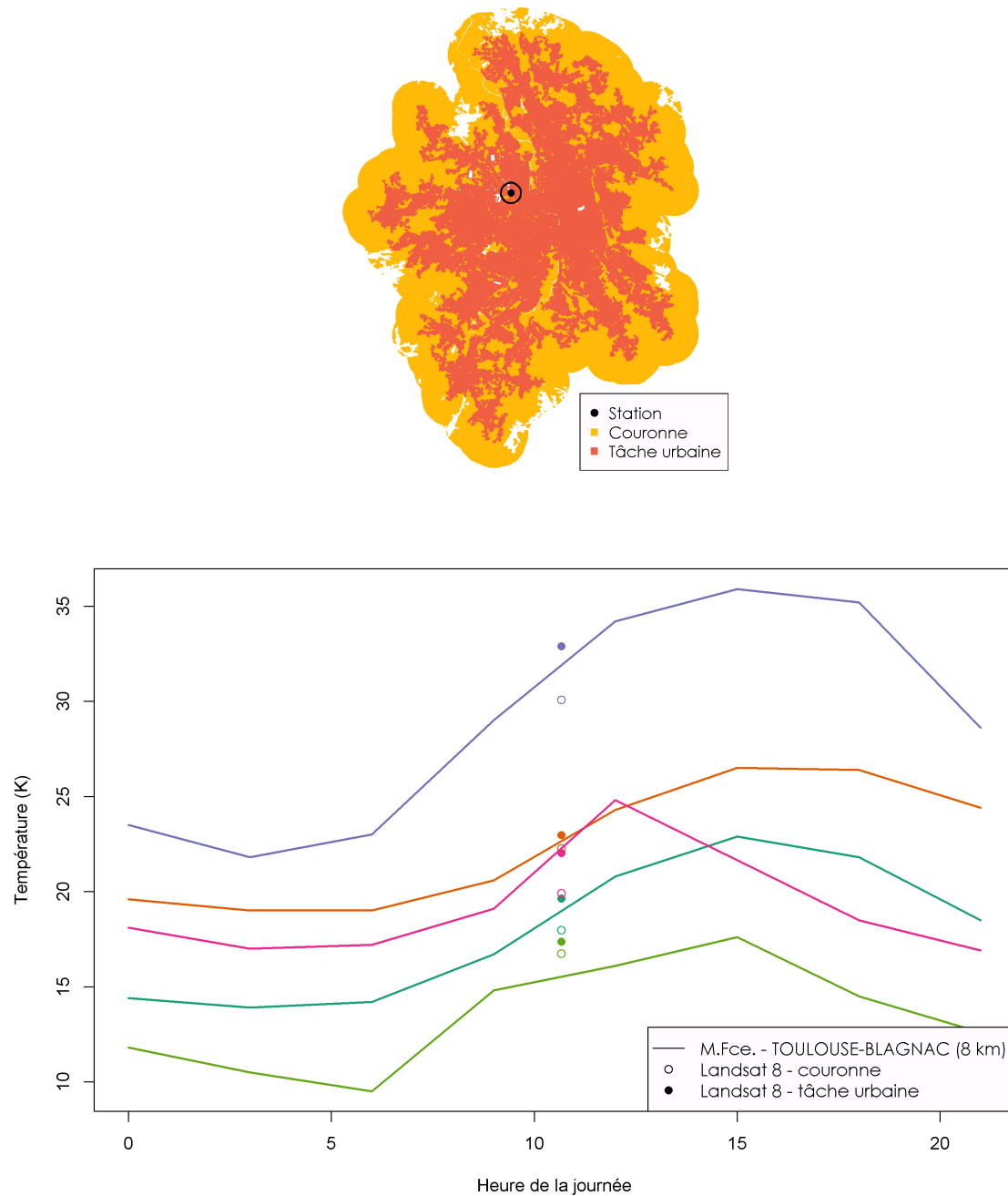


FIGURE 12 – Localisation de la station Toulouse-Blagnac et comparaisons des températures obtenues d’après Météo France et *Landsat 8* pour différentes dates

Note : Les températures Landsat 8 représentées sont celles conservées pour les analyses qui précèdent (moyenne des pixels non-nuageux dans le périmètre d’étude).

Des études qui tentent d’aller plus loin

La limite décrite ci-dessus est bien connue dans la littérature sur les analyses de températures à partir des images satellites. Certaines études sur les ICU les utilisent malgré tout : Zhou et al 2013 [44], ou Chen et al 2006 [7] exploitent les données de *Landsat 5* et *7* pour étudier la

relation entre les ICU et les changements d'occupation et d'usage des sols. D'autres études poursuivant le même objectif vont cependant plus loin en mobilisant des données plus proches de la température ressentie, le plus souvent issues d'un modèle. On peut en particulier citer le modèle *UrbClim* (De Ridder et al 2015 [12]), qui produit des données de température ressentie avec une résolution spatiale très fine. *UrbClim* est utilisé dans plusieurs études récentes sur les îlots de chaleur urbains, comme Lauwaet et al 2016 [27] pour la ville de Bruxelles ou Zhou et al 2016 [43] pour la ville de Londres. Par rapport à leurs précédents travaux de 2013, Zhou et al 2016 montrent que l'effet d'hystérèse mis en évidence sur la température de surface (cf supra), ne persiste pas lorsque l'on considère la température à 2 mètres du sol.

2.4.2 Contours de la ville et de la périphérie

Urbain et non-urbain : une frontière floue

Comme souvent expliqué dans la littérature autour de la géographie urbaine, il n'existe pas de définition consensuelle de ce qu'est la ville et de ce qu'est la périphérie. Les choix effectués pour dessiner les contours de l'une et de l'autre sont donc sujets aux débats. Stewart 2007 [38] fait un état des lieux des différentes définitions de l'urbain et du rural utilisées dans les études sur les îlots de chaleur entre 1950 et 2006. Certaines études établissent la dichotomie sur la base du résultat d'une classification des sols. D'autres utilisent des données du bâti, avec la question d'inclure ou non tel ou tel élément pour faire la jointure entre les zones habitées (aéroports, campus, stations météorologiques, terrains de sport, etc). La sensibilité de la considération ou non de ces éléments dépend en outre du pays.

Villes frontalières

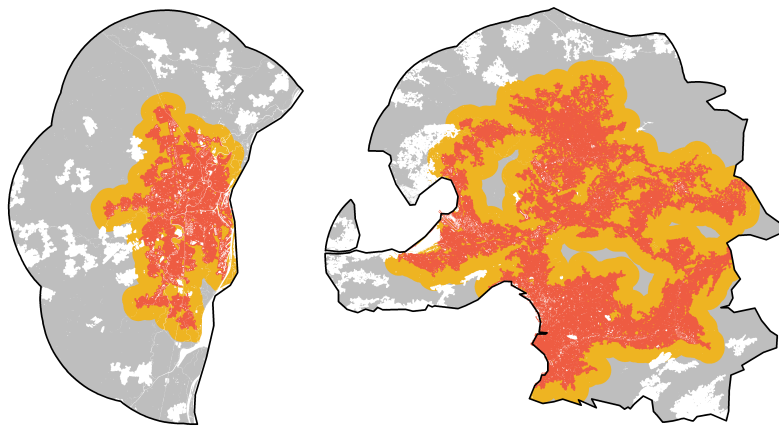


FIGURE 13 – Dessins des tâches urbaines de Strasbourg et Marseille

Par ailleurs, pour les villes frontalières, notre étude a ses limites puisque ne disposant pas de la BDTopo au-delà du territoire français, la périphérie est définie sur un rayon plus large, mais uniquement dans le territoire français (c'est le cas de Strasbourg par exemple, figure 13, à gauche). De la même manière, pour les villes situées sur le littoral comme Marseille, on s'éloigne davantage du centre-ville pour définir la couronne, puisque l'eau fait partie des éléments non pris en compte dans le calcul des températures (figure 13, à droite).

2.4.3 Limites de couverture

Nuages

En cas de passage de nuages, les pixels sont manquants à l'analyse (on les sort du champ de

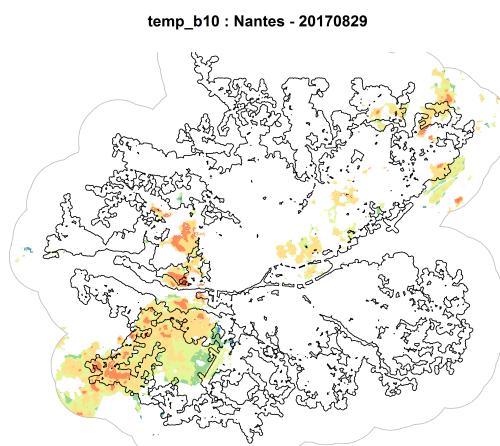


FIGURE 14 – Carte de températures pour la ville de Nantes le 29 août 2017

l'étude pour qualité insuffisante). Ce problème de couverture peut se révéler assez important sur certaines images (figure 14). On pourrait envisager de raffiner la méthode pour imputer des valeurs pour ces pixels, prendre en compte d'éventuels biais, ou réaliser l'étude sur une période plus longue de manière à récupérer davantage d'observations.

Villes à cheval entre plusieurs tuiles

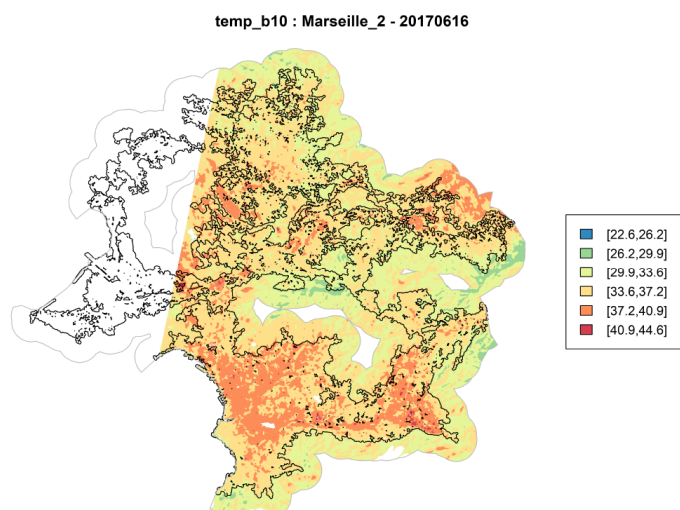


FIGURE 15 – Carte de températures pour la ville de Marseille le 16 juin 2017

Enfin, si la couronne périphérique n'est pas entièrement couverte par une image satellite (figure 15), le travail de jointure entre les différentes tuiles n'a pas été réalisé dans le cadre de cet article, et pourrait faire l'objet de prolongements.

Conclusion

Dans cet article, nous proposons une procédure automatique de calcul de différentiel de température entre une ville et sa périphérie, à partir des images satellites issues de *Landsat 8*. Cette procédure, dont la première étape est en Python et les autres sont en R, mobilise également les données de la BDTopo pour dessiner un contour de ville et de périphérie cohérent avec les définitions officielles. Certains ajustements sont effectués pour que ces contours correspondent le plus possible aux endroits où est susceptible de vivre la population humaine, en cohérence avec la littérature sur le sujet.

En appliquant cette procédure à une dizaine de villes françaises sur la période de juin à septembre 2017, nous obtenons un écart de température entre une ville et sa périphérie systématiquement positif, en moyenne de l'ordre de 2 degrés Celcius, peu différent d'une ville à l'autre. Pour être fiabilisés, ces premiers résultats descriptifs mériteraient d'être prolongés par des traitements plus précis, qui seraient possibles en formant des équipes pluridisciplinaires (modélisation de l'émissivité des bâtiments, corrections atmosphériques...).

Bien que plusieurs limites d'ordre technique puissent être avancées ici, cette première initiative de l'Insee pour investir sur les données satellites reste prometteuse quant à la possibilité, pour la statistique publique, de travailler à moyen terme sur d'autres sujets mobilisant le même type de source. Par exemple, comme l'indique le récent rapport du CEOS et de l'ESA [5], les sources satellitaires pourraient s'avérer très pertinentes pour produire certains indicateurs de développement durable, et ainsi les rendre comparables d'un pays à un autre grâce à une même méthodologie.

Références

- [1] Des quartiers chauds à rennes. *Sciences Ouest 298* (Mai 2012).
- [2] ALMEIDA, D., MARCELINO, F., GUTIERRES, F., CAMPOS, P., VALA, F., AND CAETANO, M. Multi-source approach for enhanced lucas statistics : A pilot study in portugal. *Scorus, Conférence 2016, Session "Space transformation, land use and value"* (Juillet 2016).
- [3] ARNOLD, S., AND WIATR, T. Cop4stat 2015plus : Analysis of copernicus remote sensing data for areal statistical purposes. *Conference EFGs, Paris, Fr, 2016* (11 2016).
- [4] CAO, L., LI, P., ZHANG, L., AND CHEN, T. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and vegetation fraction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37* (2008), 1379–1384.
- [5] CEOS, E. Satellite earth observation in support of the sustainable development goals.
- [6] CHELLI, F. M., AND GUANDALINI, A. Satellite imagery for studying development ? the italian case study. *Rivista Italiana di Economia Demografia e Statistica 69*, 3 (2015).
- [7] CHEN, X.-L., ZHAO, H.-M., LI, P.-X., AND YIN, Z.-Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote sensing of environment 104*, 2 (2006), 133–146.
- [8] COMBREXELLE, S., WENDT, H., DOBIGEON, N., TOURNERET, J.-Y., McLAUGHLIN, S., AND ABRY, P. Bayesian estimation of the multifractality parameter for image texture using a whittle approximation. *IEEE Transactions on Image Processing 24*, 8 (2015), 2540–2551.
- [9] DE DÉVELOPPEMENT ET D'URBANISME DE L'AGGLOMÉRATION STRASBOURGEOISE, L. Les îlots de fraîcheur dans la ville. *Les notes de l'Adeus 140* (Novembre 2014).
- [10] DE DÉVELOPPEMENT ET D'URBANISME DE LILLE MÉTROPOLÉ, A. Les îlots de chaleur urbains. *Le 4 pages de l'agence de développement et d'urbanisme de Lille Métropole 12* (Avril 2017).

- [11] DE DÉVELOPPEMENT ET D'URBANISME DE LILLE MÉTROPOLE, A. Les îlots de chaleur urbains. *Etude* (Juin 2017).
- [12] DE RIDDER, K., LAUWAET, D., AND MAIHEU, B. Urbclim—a fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate* 12 (2015), 21–48.
- [13] DEBBAGE, N., AND SHEPHERD, J. M. The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban Systems* 54 (2015), 181–194.
- [14] DELINCE, J., LEMOINE, G., DEFOURNY, P., GALLEGRO PINILLA, F. J., DAVIDSON, A., RAY, S., ROJAS, O., LATHAM, J., AND FRÉDÉRIC, A. Handbook on remote sensing for agricultural statistics.
- [15] DU CLIMAT ET MÉTÉO FRANCE, A. P. L'îlot de chaleur urbain à paris : Un microclimat au coeur de la ville.
- [16] D'URBANISME, A. P. Les îlots de chaleur urbains à paris, cahier 1.
- [17] D'URBANISME, A. P. Les îlots de chaleur urbains à paris : Point d'étape. *Note 70* (Mai 2014).
- [18] D'URBANISME, A. P. Les îlots de chaleur urbains à paris, cahier 2 : Simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements.
- [19] D'URBANISME, A. P. Les îlots de chaleur urbains du coeur de l'agglomération parisienne, cahier 3 : Brises thermiques.
- [20] D'URBANISME, A. P. Les îlots de chaleur urbains à paris, cahier 4 : Influence climatique des revêtements de sol à paris.
- [21] D'URBANISME DE LA RÉGION NÎMOISE ET ALÉSIENNE, A. Agir contre les îlots de chaleur urbains. *Synthèse* (Décembre 2014).
- [22] DUSSEUX, P. *Exploitation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole*. PhD thesis, Université Rennes 2, 2014.
- [23] EPICEA, P. Etude pluridisciplinaire des impacts du changement climatique à l'échelle de l'agglomération parisienne. *Rapport final* (Octobre 2012).
- [24] EYOH, A., AND EKPA, A. Temporal appraisal of land surface temperature dynamics across the nine states of niger delta region of nigeria from 2004-2016 using remote sensing dataset of modis.
- [25] HUANG, F., ZHAN, W., DUAN, S.-B., JU, W., AND QUAN, J. A generic framework for modeling diurnal land surface temperatures with remotely sensed thermal observations under clear sky. *Remote sensing of environment* 150 (2014), 140–151.
- [26] KOURTIDIS, K., GEORGOULIAS, A., RAPSOMANIKIS, S., AMIRIDIS, V., KERAMITSOGLOU, I., HOOYBERGHS, H., MAIHEU, B., AND MELAS, D. A study of the hourly variability of the urban heat island effect in the greater athens area during summer. *Science of The Total Environment* 517 (2015), 162–177.
- [27] LAUWAET, D., DE RIDDER, K., SAEED, S., BRISSON, E., CHATTERJEE, F., VAN LIPZIG, N. P., MAIHEU, B., AND HOOYBERGHS, H. Assessing the current and future urban heat island of brussels. *Urban Climate* 15 (2016), 1–15.
- [28] LI, Z.-L., TANG, B.-H., WU, H., REN, H., YAN, G., WAN, Z., TRIGO, I. F., AND SOBRINO, J. A. Satellite-derived land surface temperature : Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment* 131 (2013), 14–37.
- [29] MAILLARD P., DAVID F., D. M. B. J.-B. L. E. Caractérisation d'îlots de chaleur urbains et humidification de chaussée à lyon. *Article TSM* 6 (2014).
- [30] MENG, Q., ZHANG, L., SUN, Z., MENG, F., WANG, L., AND SUN, Y. Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area : A 12-year case study in beijing, china. *Remote Sensing of Environment* 204 (2018), 826–837.

- [31] METZ, M., ROCCHINI, D., AND NETELER, M. Surface temperatures at the continental scale : Tracking changes with remote sensing at unprecedented detail. *remote sensing*, 2014, 6, 3822-3840.
- [32] MITRAKA, Z., BERGER, M., RUESCAS, A., SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., BROCKMANN, C., AND CHRYSOULAKIS, N. Estimation of land surface emissivity and temperature based on spatial-spectral unmixing analysis. In *Proceedings of Sentinel-3 OLCI/SLSTR and MERIS/(A) ATSR workshop, Frascati, Italy (15-19 October)* (2013).
- [33] NATIONS, U. Earth observations for official statistics.
- [34] OF THE INTERIOR U.S. GEOLOGICAL SURVEY, D. Landsat 8 data users handbook.
- [35] QUAN, J., CHEN, Y., ZHAN, W., WANG, J., VOOGT, J., AND WANG, M. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in beijing, china based on a gaussian volume model. *Remote Sensing of Environment* 149 (2014), 33-46.
- [36] QUAN, J., ZHAN, W., CHEN, Y., WANG, M., AND WANG, J. Time series decomposition of remotely sensed land surface temperature and investigation of trends and seasonal variations in surface urban heat islands. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 121, 6 (2016), 2638-2657.
- [37] SCHATZ, J., AND KUCHARIK, C. J. Seasonality of the urban heat island effect in madison, wisconsin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 53, 10 (2014), 2371-2386.
- [38] STEWART, I. D. Landscape representation and the urban-rural dichotomy in empirical urban heat island literature, 1950-2006. *Acta Climatologica et Chorologica* 40, 41 (2007), 111-121.
- [39] TABEAUD, M. Les villes font-elles leur temps? *Ville et Environnement* (2006).
- [40] TZAVALI, A., PARAVANTIS, J. P., MIHALAKAKOU, G., FOTIADI, A., AND STIGKA, E. Urban heat island intensity : a literature review. *Fresenius Environmental Bulletin* 24 (2015), 4535-4554.
- [41] URBAINE, G. L. C. Lutte contre les îlots de chaleur urbains. *Les thématiques* (2010).
- [42] VOOGT, J. A., AND OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment* 86, 3 (2003), 370-384.
- [43] ZHOU, B., LAUWAET, D., HOOYBERGHS, H., DE RIDDER, K., KROPP, J. P., AND RYBSKI, D. Assessing seasonality in the surface urban heat island of london. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 55, 3 (2016), 493-505.
- [44] ZHOU, B., RYBSKI, D., AND KROPP, J. P. On the statistics of urban heat island intensity. *Geophysical research letters* 40, 20 (2013), 5486-5491.