



Evolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire

Bénédicte Dousset, Françoise Gourmelon, Emmanuel Giraudet, Karine Laaidi,
Abdelkrim Zeghnoun, Philippe Bretin, Stéphanie Vandentorren

► To cite this version:

Bénédicte Dousset, Françoise Gourmelon, Emmanuel Giraudet, Karine Laaidi, Abdelkrim Zeghnoun, et al.. Evolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire. rapport final. 2011, pp.77. <hal-00620833>

HAL Id: hal-00620833

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00620833>

Submitted on 8 Sep 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉVOLUTION CLIMATIQUE ET CANICULE EN MILIEU URBAIN

apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire

Rapport de projet soutenu par la Fondation MAIF (2008-2011)



Mars 2011

L'étude a été confiée au laboratoire Géomer UMR 6554 LETG CNRS par la Fondation MAIF, après avis favorable de son conseil scientifique et sur la décision de son Conseil d'administration en date du 11 juin 2007 (convention signée entre l'Université de Bretagne Occidentale et la Fondation MAIF le 5 février 2008).

Elle a été réalisée sous la co-responsabilité de Bénédicte DOUSSET, Responsable scientifique du projet et Chercheur associé au laboratoire Géomer et Chercheur à l'Université d'Hawaï, et Françoise GOURMELON, Directeur de recherche au CNRS et responsable du laboratoire Géomer.

Ont également participé à la recherche :

- E. GIRAUDET, Ingénieur d'études CNRS, Géomer,
- K. LAAIDI, Epidémiologiste, Institut national de Veille Sanitaire (InVS),
- A. ZEGHNOUN, Statisticien, InVS.
- P. BRETIN, Epidémiologiste, InVS,
- S. VANDENTORREN, Epidémiologiste, InVS,

Fondation MAIF
Le Pavois
50, Avenue Salvador Allende
79000 Niort
Tél : 05 49 73 87 04
Fax : 05 49 73 87 03
<http://www.fondation-maif.fr>

Géomer UMR 6554, LETG, CNRS
Technopôle Brest-Iroise
Institut Universitaire Européen de la Mer
Place Nicolas Copernic
29280 Plouzané
<http://letg.univ-nantes.fr>

Institut de Veille Sanitaire
12, rue du Val d'Osne
94415 Saint-Maurice cedex
France
Tél : 33 (0) 1 41 79 67 00
Fax : 33 (0) 1 41 79 67 67
<http://www.invs.sante.fr/>



Résumé

Les observations et les modèles de reconstruction de l'évolution des températures globales indiquent une augmentation de l'occurrence, de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur, notamment en Europe Occidentale. Les grandes métropoles sont particulièrement vulnérables aux vagues de chaleur, en raison de leur densité de population, des caractéristiques des surfaces, des îlots de chaleur et de la production de chaleur anthropique et de polluants. Ce projet, fondé sur les travaux précédents des auteurs, fait la synergie entre l'observation satellitaire des températures de la région parisienne pendant la canicule d'août 2003 et une enquête sanitaire portant sur la surmortalité des personnes âgées. Les objectifs de cette étude étaient (i) de mieux comprendre la variation spatio-temporelle des températures de surface dans la région parisienne en fonction de l'occupation du sol et des caractéristiques physiques des surfaces; (ii) de détecter les secteurs ayant des seuils critiques de température; (iii) de produire de nouveaux indices thermiques pour définir un indicateur plus représentatif des risques sanitaires; et (iiii) d'établir une méthodologie de surveillance satellitaire locale pour une meilleure anticipation et gestion des risques. La méthode est basée sur l'usage des satellites polaires orbitaux pour l'obtention des températures de surface et leur interprétation.

Une série de 50 images thermiques satellitaires (NOAA-AVHRR) et une image multispectrale (SPOT-HRV) ont été utilisées pour analyser la variation spatiale des températures de surface du cycle diurne pendant la canicule (4 -13 Août). Ces images démontrent (i) le contraste entre la distribution des îlots de chaleur de jour et de nuit en relation avec l'occupation du sol et l'inertie thermique des surfaces; (ii) l'atténuation de la chaleur par la végétation, (iii) l'importance des températures nocturnes élevées sur la canicule, (iv) la variation spatio-temporelle des îlots de chaleur et des secteurs ayant des seuils critiques de température, et (v) la corrélation entre la distribution spatiale des températures minimales les plus élevées, et des plus hauts ratios de mortalité.

La température de surface aux adresses de 482 personnes âgées (65 ans et plus, 281 décès et 281 témoins) a été extraite d'une série de 61 images thermiques satellitaires (1-13 Août). Des indicateurs de température minimale, maximale, moyenne ainsi que d'amplitude ont été construits, prenant en compte l'intervalle de temps entre l'incidence de la température et l'impact sanitaire. Les indicateurs ont été intégrés dans un modèle logistique conditionnel, ajusté pour différents facteurs de risques. Les résultats indiquent un risque de mortalité significativement plus important pour les températures minimales sur une période de 7 jours (jour du décès et 6 jours précédents) et sur la période totale d'étude de 13 jours. Ils confirment l'importance des températures nocturnes et de la durée des canicules pour les risques sanitaires.

L'étude démontre l'apport de la télédétection à la compréhension de l'intensité des vagues de chaleur en milieu urbain, et à l'anticipation et la gestion de leur impact sanitaire. Cette étude montre qu'il est possible d'anticiper les risques sanitaires non seulement en termes de probabilité, mais en termes de temps, lieux et magnitude. Ces résultats devraient contribuer au développement de stratégies d'adaptation et d'atténuation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire dans la région parisienne. La méthodologie peut être appliquée à d'autres métropoles, en tenant compte des instruments téléportés disponibles, de la situation géographique et des paramètres environnementaux et sociaux locaux.

Table des matières

1. Introduction	1
1.1. Evolution climatique et canicules en Europe	1
1.2. Canicules et vulnérabilité urbaine	3
1.3. Canicule et risques sanitaires en milieu urbain	3
2. Objectif du projet	6
3. La canicule d'août 2003	7
4. Matériel et méthodes	10
4.1. Site et période d'étude	10
4.2. Acquisition et traitement des données climatiques et d'occupation du sol	11
4.2.1. Données des satellites NOAA-AVHRR	11
4.2.2. Données du satellite SPOT-HRV4	14
4.2.3. Combinaison des données NOAA-AVHRR et SPOT-HRV	16
4.2.4. Données météorologiques à la station de Paris-Montsouris	16
4.3. Acquisition et traitement des données sanitaires	18
4.3.1. Enquête cas-témoins	18
4.3.2. Variables étudiées	19
4.3.3. Analyses statistiques cas-témoins	19
4.4. Production des indices thermiques à partir des données des satellites NOAA-AVHRR	21
4.4.1. Extraction des indices thermiques aux adresses géocodées	21
4.4.2. Définition de nouveaux indicateurs thermiques	22
4.4.3. Intégration des indicateurs thermiques dans le modèle de régression logistique	22
5. Résultats	23
5.1. Le cycle diurne de température de surface	23
5.2. Variation de température et caractéristiques des surfaces	25
5.2.1. Végétation	25
5.2.2. Caractéristiques physiques des matériaux de surface	27
5.3. Comparaison des températures des mois d'août 1998 et 2003	27
5.4. Secteurs d'anomalies thermiques	28
5.5. Nouvel indice thermique	36
5.6. Comparaison entre les images Landsat-TM et NOAA-AVHRR du 9 août 2003	37
5.7. Différences entre les indices thermiques des cas et des témoins	39
5.8. Assimilation des indices thermiques dans le modèle de Breslow et Day	40
6. Synthèse des résultats et discussion	43
7. Références bibliographiques et logiciels	46
8. Actions de valorisation	51
8.1. Publications	51
8.2. Conférences internationales	51
8.3. Citations dans la presse	53
Remerciements	53
Annexes	54

1. Introduction

1.1. Évolution climatique et canicules en Europe

Les observations et les modèles de reconstruction de l'évolution des températures globales révèlent un réchauffement prononcé durant les 150 dernières années, permettant de prédire un climat plus extrême et un accroissement moyen de température de 1,4°C à 5,8°C durant le 21^{ème} siècle (Schär *et al.*, 2004 figure 1; 4^{ème} rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 2007). Des simulations numériques fondées sur les données de 1948 à 2003 indiquent qu'en Europe occidentale, l'occurrence, l'intensité et la durée des vagues de chaleur devraient augmenter dans la deuxième partie du 21^{ème} siècle (Stott *et al.*, 2004 ; Meehl et Tebaldi, 2004; Tebaldi *et al.*, 2006) (figure 2). Sans réduction des émissions de gaz à effet de serre, le nombre de jours avec des températures supérieures à 30°C en France, pourrait égaler celui qui est actuellement observé en Espagne ou en Sicile (Beniston *et al.*, 2007) (figure 3).

Les villes influencent sensiblement le climat régional. D'autre part, le forçage climatique urbain, la pression anthropique avec une importante consommation d'énergie et l'émission de gaz à effet de serre, ont des conséquences et des implications globales. Rappelons ici que plus des 2/3 du CO2 est produit dans les agglomérations urbaines. Les réponses climatiques régionales à l'augmentation de l'effet de serre, ne sont pas uniformes, mais dépendent de l'occupation du sol, et sont plus importantes dans les grandes agglomérations (Kalnay *et al.*, 2006). Ainsi en ce qui concerne Paris, la comparaison des distributions des températures moyennes estivales de 1900 à 1920, et de 1980 à 2000, indique un doublement du nombre de jours pour lesquels la température est supérieure à 25°C (2,4% vs. 5, 2%) (figure 4). Un épisode de canicule considéré comme extrême en 2003 pourrait dans quelques décennies devenir banal, notamment en région parisienne (figure 5).

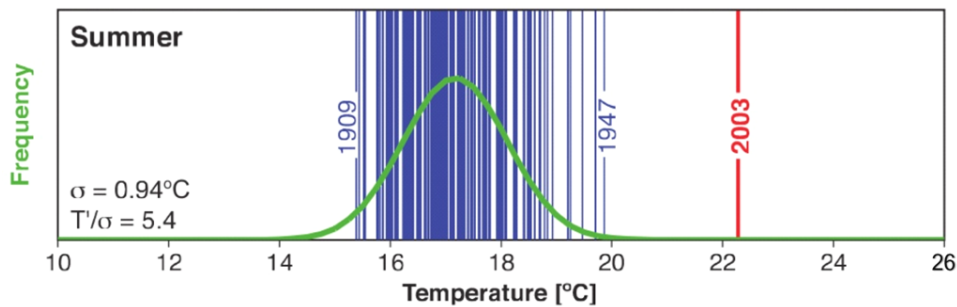


Figure 1. Distribution des températures estivales (juin, juillet août) en Suisse de 1864 à 2003. Gaussienne (vert) ; σ : deviation standard ; T/σ : anomalie de 2003 normalisée par la deviation standard (source : Schär *et al.*, 2004).

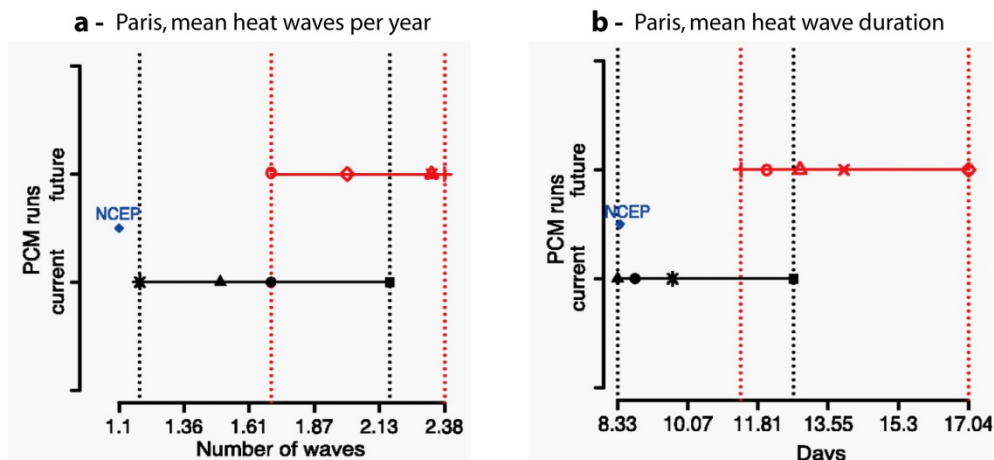


Figure 2. Augmentation de l'incidence (a) de la durée (b) des vagues de chaleur à Paris au 21^{ème} siècle, calculée à partir du modèle de reconstruction du National Center for Environmental Prediction (source : Meehl and Tebaldi, 2004).

Nombre de jours par an > 30 °C

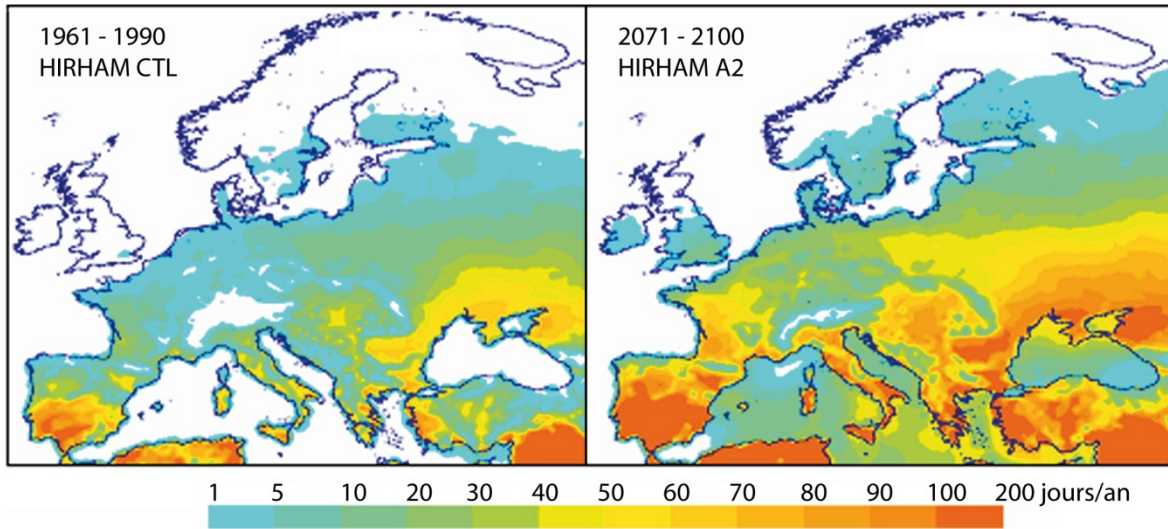


Figure 3. Augmentation des températures estivales, estimées selon les modèles HIRHAM. Nombre de jours/an > 30 °C (a) de 1961 à 1990 et (b) prédiction pour 2071-2100, d'après Beniston et al., 2007.

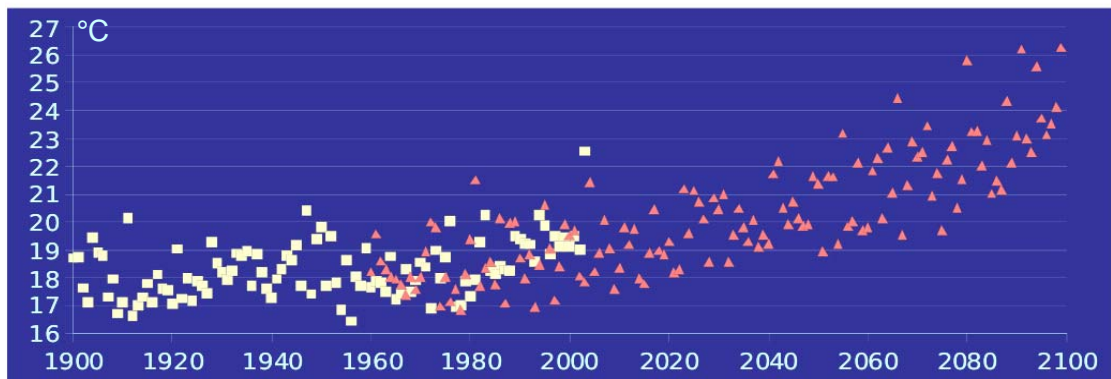


Figure 4: Température moyenne estivale en France.

- : observations 1900-2003
- ▲: simulation numérique scénario A2 1960-2100 Arpège Climat (Météo-France).

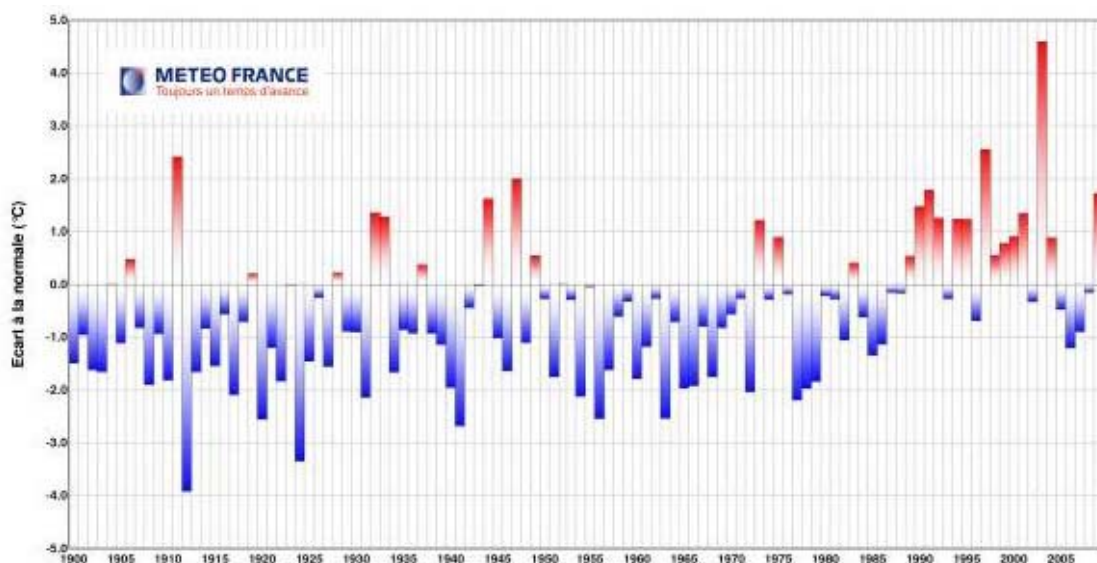


Figure 5. Température en France en août depuis 1900 : écarts à la moyenne de référence 1971-2000. La référence est la moyenne des températures mensuelles de 30 stations métropolitaines relevées sur cette période.

1.2. Canicules et vulnérabilité urbaine

Actuellement environ 50% de la population mondiale vit en ville et cette proportion pourrait atteindre 60% en 2030 (United Nations 2007). En Europe, cette proportion est de 73% et en France de 77%. Au cours des dernières décennies, la croissance de la population urbaine a rendu les villes particulièrement vulnérables aux événements climatiques extrêmes. Durant les 25 dernières années, de nombreuses vagues de chaleur ont sévi à Marseille (1983), Athènes (1987, 2007), Londres et Séville (1995), Paris, Lisbonne, Madrid et Londres (2003 et 2006). Durant l'été 2003, une vague de chaleur d'une ampleur exceptionnelle a touché l'Europe de l'ouest, provoquant 14 802 décès en France, (InVS, 2003; World Health Organization Europe, 2003). La température moyenne a dépassé d'environ 3°C les températures enregistrées durant les étés antérieurs (1961- 1999). Les métropoles européennes occidentales ont subi, durant l'été 2006, un nouvel épisode de canicule plus long qu'en 2003 mais moins intense.

La vulnérabilité urbaine s'explique en partie par la densité de population et par l'altération de la distribution des flux de chaleur de surface en zone urbaine, comparée aux zones rurales environnantes. Cette altération résulte principalement : (a) du changement des propriétés physiques des surfaces dû au remplacement de la végétation par des matériaux de couverture tels que l'asphalte et le béton, entraînant la modification des flux radiatifs, (b) de la réduction de l'humidité de surface nécessaire à l'évapo-transpiration, (c) du changement de l'écoulement d'air à la surface et de la formation de turbulences causées par les rues et les grands bâtiments, et (c) de la chaleur produite par les activités humaines. L'ensemble de ces effets génère des écarts de température entre les zones urbaines et les zones rurales appelés "îlots de chaleur urbains". Caractérisés par une persistance de températures nocturnes élevées, ils peuvent entraîner une surmortalité en période caniculaire. De plus, l'augmentation de température modifie les réactions chimiques dans l'atmosphère ainsi que la concentration et la diffusion des polluants, exacerbant les effets de la chaleur sur l'organisme.

L'évolution climatique, et en particulier l'augmentation des températures nocturnes pourrait faire doubler en moins de 20 ans la mortalité attribuable à la chaleur dans les grandes agglomérations (Kalstein and Green, 1997; Besancenot, 2002 ; Tan *et al.*, 2010). L'augmentation du nombre de jours chauds est plus marquée dans les zones urbaines que dans les zones rurales, et la mortalité liée à la chaleur y est plus importante.

En France, la surmortalité en 2003 fut de ~40% dans les petites villes ou les villes moyennes à l'exception de Dijon et Le Mans, de 80% à Lyon, et de 141% à Paris (Vandentorren *et al.*, 2004). Une canicule analogue à New York aurait causé une surmortalité de +150% (Kalkstein *et al.*, 2008). Il devient essentiel d'anticiper les conséquences sanitaires des épisodes caniculaires dans les grandes villes.

1.3. Canicule et risques sanitaires en milieu urbain

La chaleur nocturne est plus néfaste que la chaleur diurne car elle empêche l'organisme humain de récupérer. La vulnérabilité sanitaire relève de paramètres socio-économiques et environnementaux. Les personnes âgées, les jeunes enfants ou les personnes ayant des problèmes respiratoires, cardio-vasculaires ou des pathologies psychiatriques¹, sont les plus fragiles. Les facteurs de vulnérabilité à la canicule ont fait l'objet de nombreuses recherches, notamment depuis 2003 (Vandentorren *et al.* 2005 ; Lorente *et al.*, 2005). Les risques sanitaires dépendent principalement (a) de l'intensité de la chaleur et de l'humidité relative de l'air, (b) de la durée d'exposition et (c) de la vulnérabilité des personnes. Le corps humain évacue une grande partie de sa chaleur par la transpiration mais si l'humidité de l'air est élevée la transpiration est ralentie. Différents indices bio-météorologiques ont été développés pour mesurer la sensation de chaleur ressentie par le corps humain, et différents systèmes de prévention de vagues de chaleur ont été développés à l'échelle locale ou régionale (Kalkstein *et al.*, 1996; Michelozzi, 2004; World Health Organization Europe, 2003; US EPA, 2006).

¹ dû en particulier à leur consommation médicamenteuse

Après la canicule de l'été 2003 en France, l'Institut national de Veille Sanitaire (InVS) en collaboration avec Météo-France, a mis au point un système d'alerte "canicule et santé" à partir d'une analyse rétrospective des données sanitaires et météorologiques dans 14 villes pilotes (Laaidi *et al.*, 2004, 2005 et 2006 ; Pascal *et al.*, 2006). Plusieurs indicateurs ont été testés, au regard de différents pourcentages de surmortalité, afin de définir des valeurs seuils à partir desquelles il existe un risque majeur pour la santé et où une alerte sera proposée aux instances politiques. L'étude a permis de retenir un indicateur mixte représenté par la moyenne, sur trois jours, des températures minimales et maximales. Cet indicateur tient compte à la fois de la persistance de la chaleur et des températures nocturnes. Le système est fondé sur la surveillance d'un indicateur bio-météorologique (IBM) pouvant être lié à une forte surmortalité quotidienne en cas d'atteinte ou de dépassement de valeurs seuils, associé à des critères qualitatifs d'ordre météorologiques (humidité, vent), atmosphériques (pollution) et conjoncturels (départ en vacances, rassemblement de populations). Pour Paris par exemple, le seuil IBM minimal est de 21° C, et le seuil maximal de 31 °C. Ce seuil sert de base au déclenchement d'une alerte dans le cadre du "Plan National Canicule", qui est activé du 1^{er} juin au 31 août. Ce plan se décline au niveau départemental et prévoit des mesures d'information, de prévention et de gestion de crise.

Le nombre de jours consécutifs d'exposition à la chaleur accroît l'épuisement et donc le risque de mortalité. Cette exposition est difficilement quantifiable en l'absence de données climatiques locales. En effet, le système d'alerte repose sur les températures enregistrées dans des stations météorologiques situées dans des parcs ou des aéroports, à l'écart des zones bâties. Par exemple, les mesures enregistrées en continu depuis 1872 à la station météorologique Paris-Montsouris contribuent efficacement à l'étude du changement climatique. Cependant afin d'éviter l'altération des mesures synoptiques, la station est située dans un parc, et les données acquises ne sont pas représentatives des conditions auxquelles les personnes sont exposées durant une vague de chaleur (figure 6). De plus, le réseau de stations est trop lâche pour estimer le gradient de température. Par exemple, les mesures radiatives de surface enregistrées par satellites durant la nuit du 4 au 13 août 2003 indiquent des écarts de 3°C à 7°C entre des parcs urbains et Paris Centre (Dousset *et al.*, 2007).

Les incertitudes relatives aux conditions thermiques locales auxquelles les personnes sont directement exposées peuvent actuellement être réduites par l'utilisation de l'imagerie satellitaire. L'application de la télédétection thermique satellitaire à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire est primordiale, car c'est la seule technique permettant l'observation des variations spatiales des températures urbaines à 1 km de résolution spatiale et la mise en évidence de leurs relations à l'occupation du sol (Dousset et Gourmelon, 2003). Depuis les années 1970, les images optiques ont été utilisées pour étudier les changements d'occupation des sols. L'usage des images thermiques s'est développé plus lentement en raison de la complexité des interférences du rayonnement infrarouge (IR) avec les composants de l'atmosphère et des surfaces urbaines. Actuellement, l'imagerie thermique satellitaire est utilisée principalement pour : (a) détecter les effets d'îlots de chaleur urbains et analyser la variabilité de la température de surface en fonction de ses caractéristiques (Caselles *et al.*, 1991 ; Lee, 1993 ; Gallo *et al.*, 1995 ; Nichol, 1996, 2005 ; Owen *et al.*, 1998 ; Dousset et Gourmelon, 2003) ; (b) paramétrer les variables de la balance énergétique urbaine (Chrysoulakis, 2003 ; Offerle *et al.*, 2003, Kato and Yamaguchi, 2005 ; Rigo and Parlow, 2007) ; (c) estimer les risques urbains associés aux événements climatiques extrêmes (Dousset *et al.*, 2007 ; Cheval *et al.*, 2009 ; Johnson *et al.*, 2009).

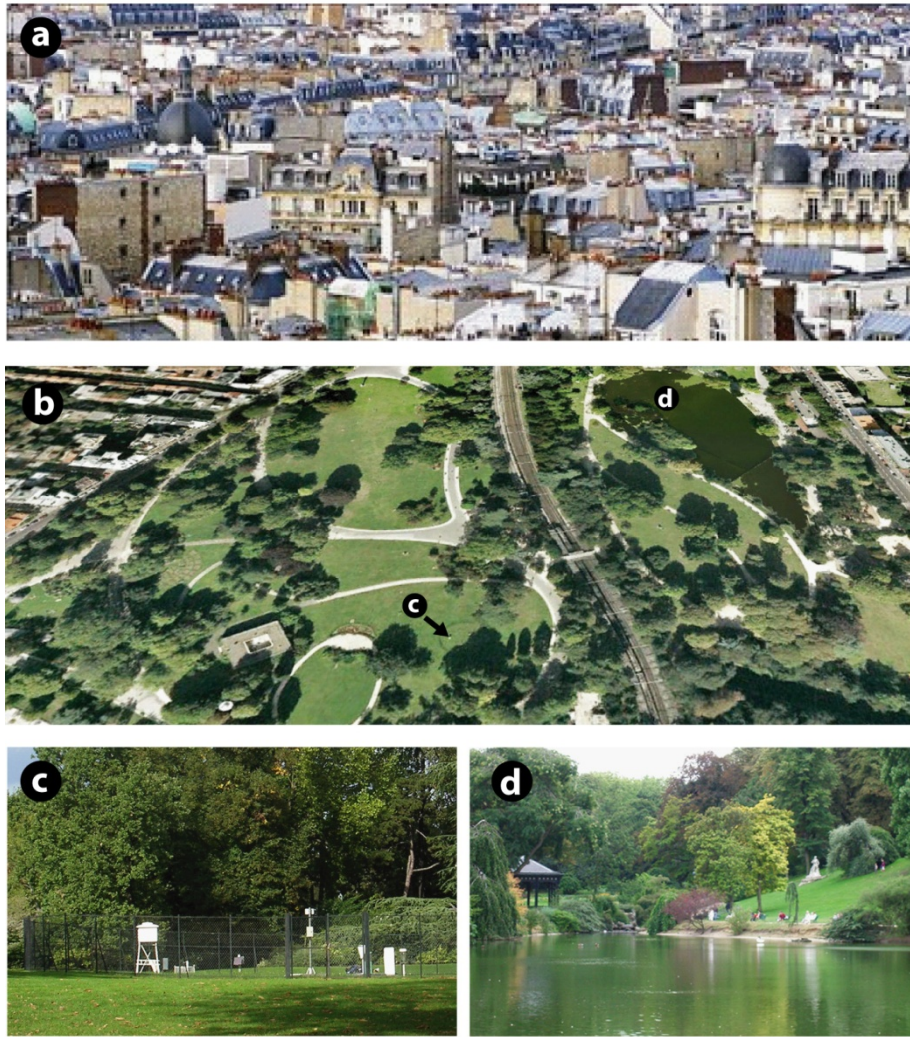


Figure 6. Occupation du sol à Paris. **a)** Paris centre ; **b)** Parc Montsouris ; **c)** station météorologique de référence Paris-Montsouris ; **d)** plan d'eau (parc Montsouris).

2. Objectifs du projet

Étant donné l'accroissement (1) des températures estivales, (2) de l'incidence, de la durée et de l'intensité des canicules, et (3) du vieillissement de la population, la surveillance des températures estivales est devenue indispensable pour la gestion des risques dans les grandes agglomérations. Dans cette optique, ce projet avait pour objectifs de démontrer l'apport de la télédétection à l'étude et à la surveillance des canicules en milieu urbain, ainsi qu'à l'anticipation et à la gestion des risques sanitaires associés en s'attachant à :

- mieux comprendre la variation spatio-temporelle des températures de surface dans la région parisienne en fonction de l'occupation du sol et des caractéristiques physiques des surfaces ;
- détecter les secteurs d'anomalies thermiques à différentes heures du jour et de la nuit ;
- produire de nouveaux indices thermiques pour définir un indicateur plus représentatif des risques sanitaires ;
- établir une méthodologie de surveillance satellitaire locale pour une meilleure gestion des risques.

Ce projet s'inscrit dans la continuité et la synergie des travaux des auteurs (figure 7), d'une part l'observation satellitaire des températures de la région parisienne en août 1998 (Dousset et Gourmelon 2003) et en août 2003², durant la canicule (Dousset *et al.*, 2007) ; d'autre part une enquête sanitaire portant sur la surmortalité des personnes âgées durant cette canicule (Bretin *et al.*, 2004; Vandertorren *et al.*, 2006).

Les conditions exceptionnelles de la canicule d'août 2003 et son impact sanitaire en Ile de France, sont rappelées dans le chapitre 3. La méthodologie de l'acquisition et du traitement des données est présentée dans le chapitre 4. Les résultats sont analysés dans le chapitre 5 et discutés dans le chapitre 6.

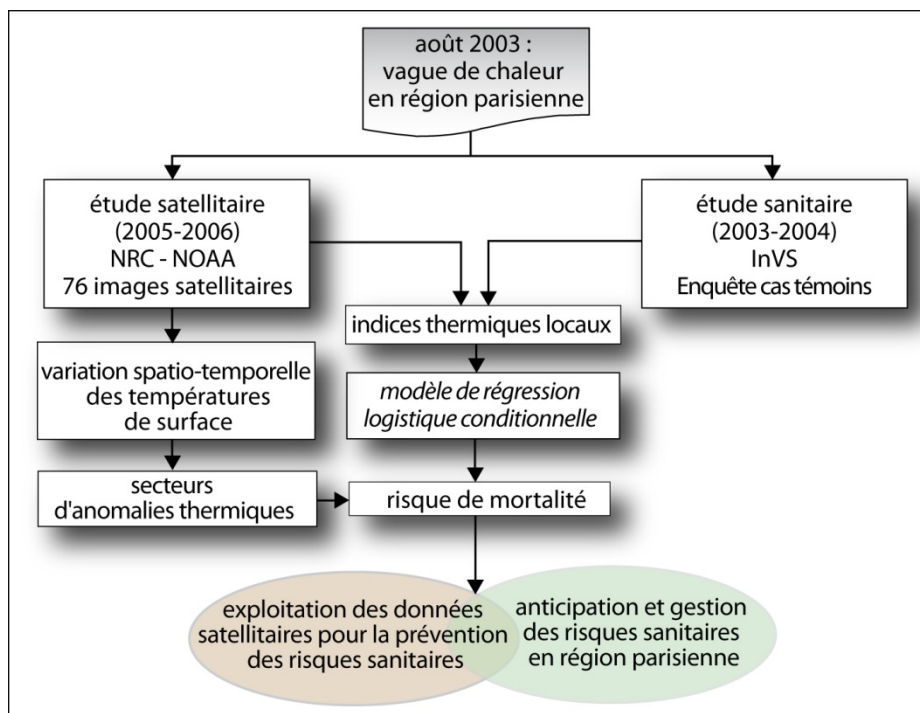


Figure 7. Contributions de Géomer et de l' InVS à la prévention des risques dus à la canicule

² Recherche menée au Air Resources Laboratory de la " National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA), et financée par le National Research Council (NRC) of the National Academy of Sciences (NAS) Washington, D.C.

3. La canicule d'août 2003

En août 2003, un anticyclone persistant caractérisé par une très haute pression atmosphérique au dessus de l'Europe de l'ouest a perturbé la circulation des masses d'air d'ouest en est, bloquant les dépressions venant de l'Atlantique et favorisant la circulation d'air chaud et sec venant de l'Afrique du Nord. Ces conditions ont provoqué une vague de chaleur d'une intensité et d'une durée exceptionnelles, qui a entraîné la mort de plus de 70 000 personnes (Robine et al., 2008). La figure 8, illustre ces conséquences sanitaires et la figure 9 représente les conditions anticycloniques lors de la première quinzaine d'août qui ont générées la vague de chaleur. La température moyenne de l'été a excédé celle de 1961-1990 de $\sim 3^{\circ}\text{C}$, atteignant 5°C de standard déviation (Schär and Jendritzky, 2004) (figure 10).

En France, cette canicule a été précédée par un printemps exceptionnellement chaud et sec, caractérisé par un déficit de précipitation et une forte radiation incidente. Ces conditions ont contribué à l'éclosion précoce de la végétation et à l'assèchement du sol par évapotranspiration (Zaitchik *et al.*, 2006 ; Fischer *et al.*, 2007). De mars à août, les températures ont excédé celles de 1971-2000, de 4.7°C en juin, 1.8°C en Juillet, et 4.4°C en août (Bessemoulin *et al.*, 2004). Les fortes chaleurs ont débuté dès le mois de juin, puis les températures sont redevenues proches de la normale en fin juillet.

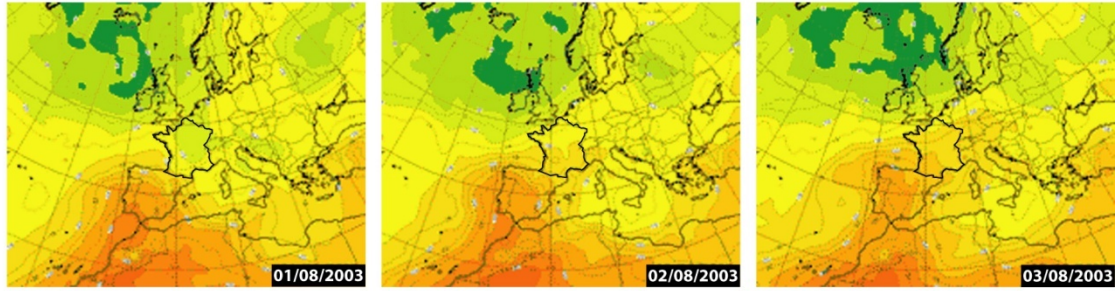
En région parisienne, la canicule a duré neuf jours consécutifs, du 4 au 13 août. Les températures maximales de l'air supérieures à 35°C ont atteint 39°C le 12 août, et les températures minimales ont augmenté progressivement de 20°C à 25.7°C (le 11 et 12 août). L'atmosphère était très stable et le vent n'a pas dépassé 5 m/s. L'humidité relative et l'évapotranspiration potentielle furent respectivement en dessous et au dessus de celles des étés normaux. L'humidité relative détermine le transfert de chaleur latente du corps humain par la transpiration, par conséquent l'élévation du taux d'humidité augmente le risque sanitaire. Cela n'a pas été le cas, puisque depuis le début de la canicule jusqu'à son point culminant, l'humidité relative a décré de 38% à 18% le jour, et de 78 % à 58% la nuit. Les ciels clairs et le rayonnement solaire ont intensifié le forçage radiatif, et la production photochimique d'ozone (Tressol *et al.*, 2008). Cependant, pour la période du 3 au 17 août à Paris, l'ozone a joué un rôle mineur par rapport à celui des températures dans l'impact sanitaire (Filleul *et al.*, 2006).

Dans la région parisienne, c'est la température qui a été la cause majeure de décès. Ceux-ci ont été estimés à 4 867, correspondant à une surmortalité de 141%, et concernant principalement les personnes âgées (Hémon and Jouglu, 2003) (figure 11).

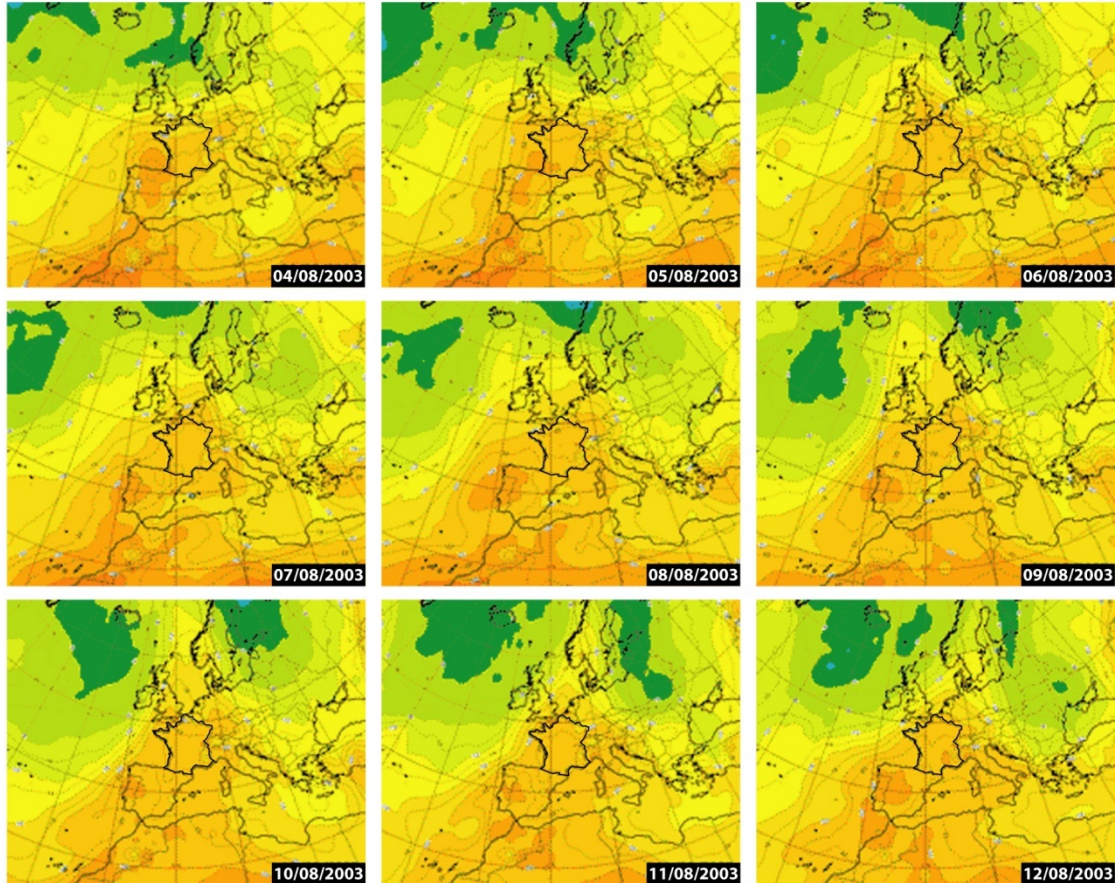


Figure 8. à gauche : personnes âgées dans un couloir des urgences de l'hôpital de Versailles, le 11 août 2003 (© AFP, M. Bureau) ; à droite : installation de 3000 lits dans un hall réfrigéré du Marché National de Rungis, pour résorber l'engorgement des funérariums d'Île de France (© AFP, T. Coex).

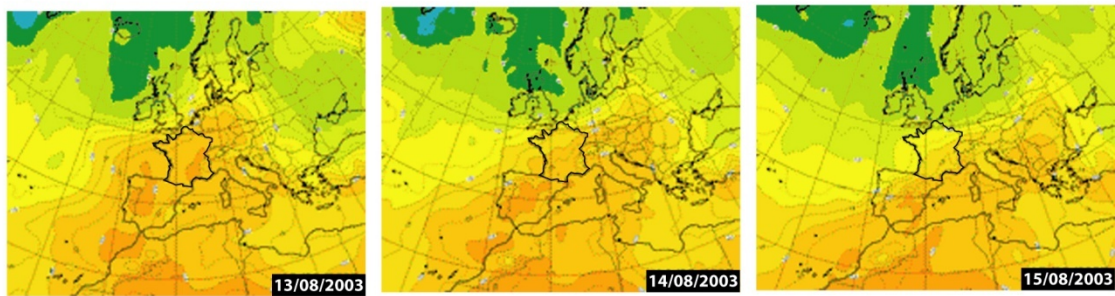
avant la canicule : du 01 au 03 août



pendant la canicule : du 04 au 12 août



après la canicule : du 13 au 15 août



© Météo France

Figure 9. Apparition et retrait d'une masse d'air chaud sur l'Europe en août 2003. D'après « *Canicule 2003 : un événement météorologique exceptionnel ?* » PlanèteMag 01/10/2003.

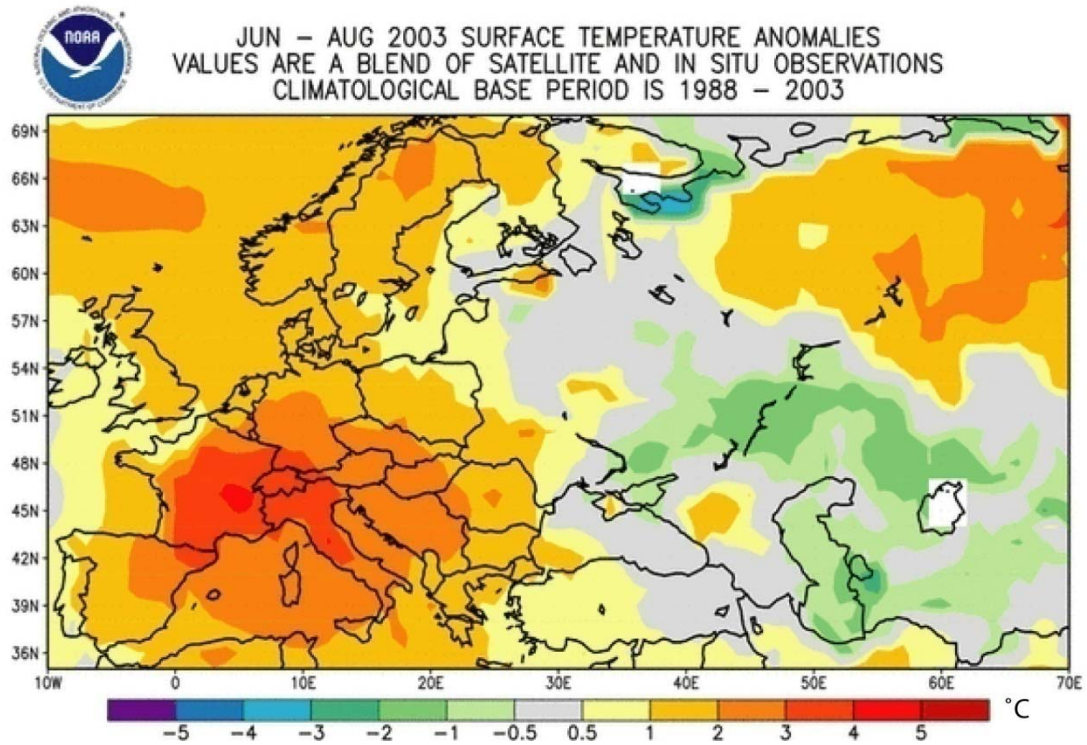


Figure 10. Anomalies des températures de surface de juin à août 2003, identifiées à partir des observations climatiques satellitaires et in situ, en référence à la période 1988-2003 (source : NDC/NOAA).

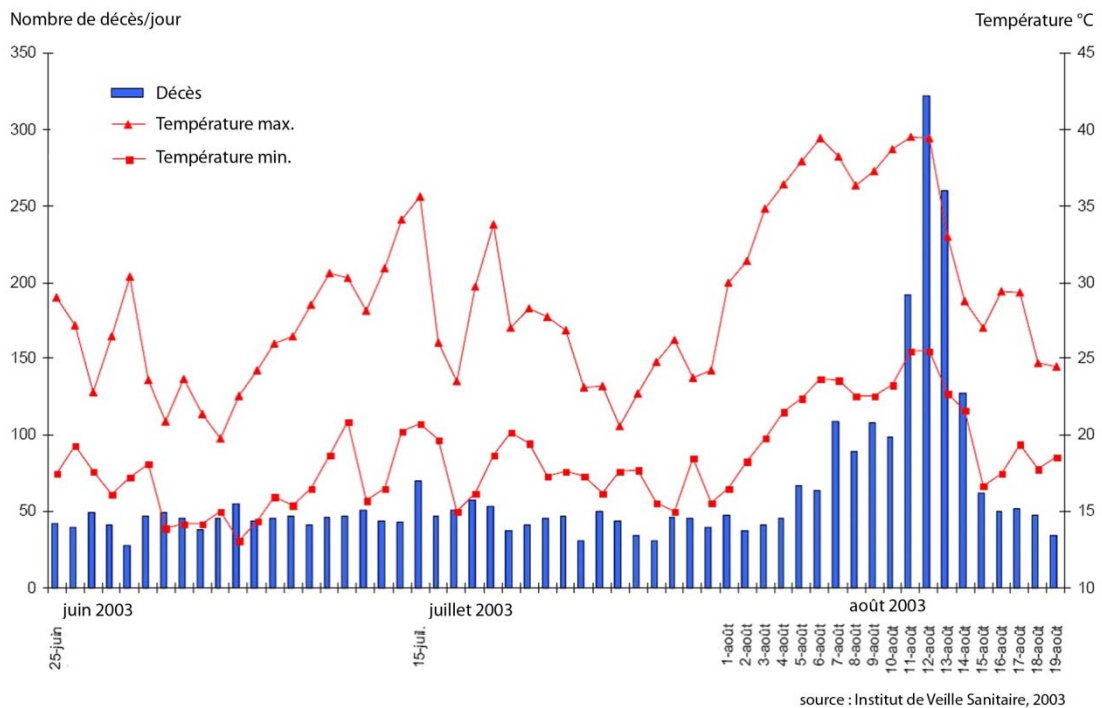


Figure 11. Nombre de décès journaliers à Paris et températures minimales et maximales entre le 25 juin et le 19 août 2003 (source : InVS, 2003).

4. Matériel et méthodes

4.1. Site et période d'étude

Le site retenu est l'agglomération parisienne, centrée à 2°.20'E, 48°.50'N, dans un bassin sédimentaire traversé par la Seine. Le climat est tempéré par l'influence océanique du régime d'ouest de mi-latitude. En été, il peut être altéré par des conditions anticycloniques qui favorisent le développement d'îlots de chaleur urbains. L'agglomération comprend environ 12 millions d'habitants, dont 2,2 millions dans la commune de Paris qui a une densité de population d'environ 20 500 habitants / km². Les observations satellitaires utilisées couvrent la région comprise entre 49°.17-48°.49N et 1°.82-2°.85E, et les données sanitaires concernent un secteur compris entre 48°.90-48°.72N et 2°.25-2°.59E.

Les images satellitaires NOAA-AVHRR³ ont été enregistrées du 21 juillet au 21 août. L'épisode de canicule a duré du 4 au 13 août. L'étude sanitaire initiale de 2003 portait sur la période du 8 au 13 août au cours de laquelle la plus forte mortalité a été observée, et où les décès pris en compte avaient une forte probabilité d'être liés à la chaleur. La présente étude utilise les observations satellitaires du 1^{er} au 20 août, incluant les jours qui ont précédé et suivi la vague de chaleur. Le tableau 1 présente les images sélectionnées, pour la période d'analyse du 1^{er} au 13 août 2003. Le nombre d'images par jour varie entre 3 et 7 sauf le 11 août où une seule image était disponible.

heure date	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
21/07/03																									
22/07/03			02:21		04:42																				
23/07/03			02:10		04:18																				
24/07/03																									
25/07/03																									
26/07/03																									
27/07/03																									
28/07/03																									
29/07/03			02:42			05:12																			20:50
30/07/03																									
31/07/03																									20:59
01/08/03			02:09			05:39					10:52		13:40		15:20										20:37
02/08/03		01:58				05:14					10:29		13:28	14:59											21:54
03/08/03		01:46				04:50					10:07		13:17												21:32
04/08/03						04:25							13:06		15:50										21:09
05/08/03				03:05		05:41					11:02	12:54				15:25									
06/08/03			02:53			05:17						12:43													
07/08/03			02:42			04:52					10:16		12:32			16:17									21:41
08/08/03					04:28					09:54		12:20				15:52									21:19
09/08/03			02:19			05:44					11:12		13:50		15:28										20:56
10/08/03			02:08			05:19					10:49		13:38		15:03										
11/08/03																									21:51
12/08/03		01:45				04:30		06:57					13:16												21:28
13/08/03				03:15		05:47							13:05		15:30										
14/08/03																									
15/08/03											10:36		12:42				16:21								
16/08/03																									
17/08/03																									
18/08/03																									
19/08/03																									20:30
20/08/03		01:56																							21:48
21/08/03		01:45																							

Tableau 1. Sélection des images satellitaires, captées par les satellites NOAA-AVHRR, 12, 16 et 17, durant la période du 21 juillet au 21 août 2003, et utilisées pour l'étude.

³ National Oceanic and Atmospheric Administration – Advanced Very High Resolution Radiometer

4.2. Acquisition et traitement des données climatiques et d'occupation du sol

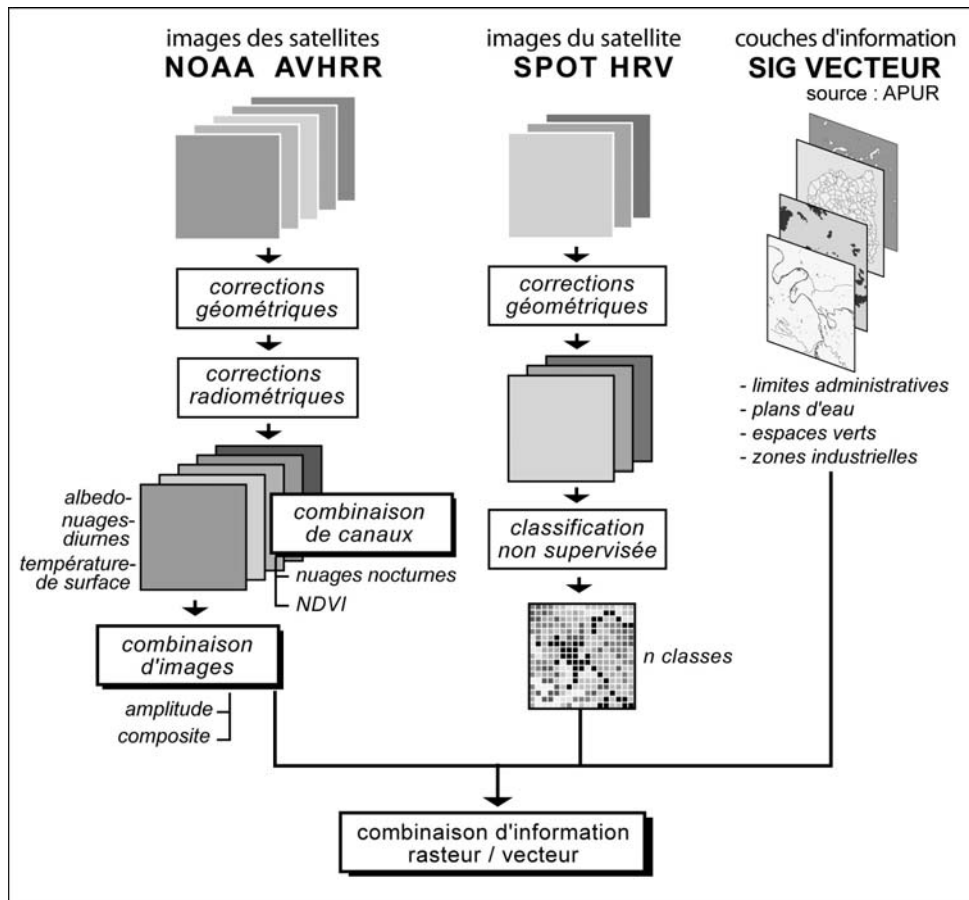


Figure 12. Enchaînement des étapes d'acquisition et de traitement des données satellitaires et des données d'occupation du sol

4.2.1. Données des satellites NOAA-AVHRR

La surveillance satellitaire urbaine nécessite à la fois un enregistrement répétitif et une haute résolution spatiale pour résoudre le cycle diurne de température et sa variation spatiale. A ce jour, ces conditions sont mutuellement exclusives. Du 4 au 13 août, on pouvait obtenir : (1) une image Landsat-5 Thematic Mapper (TM) le 9 août et une image Terra-ASTER le 10 août, à la résolution spatiale respective de 120m et 90m; (2) plusieurs images par heures à partir des satellites géostationnaires, avec une résolution spatiale de plusieurs kilomètres; (3) des images à 1 km de résolution, des satellites à orbite polaire héliosynchrone tels que NOAA, Terra, et Aqua qui revisitent le même site avec une périodicité de 12 heures. Dans le premier cas il n'y a pas de périodicité, dans le deuxième cas la résolution est incompatible avec l'observation des villes, le troisième cas est le plus adapté à la surveillance caniculaire en milieu urbain.

Terra et Aqua MODIS et NOAA-AVHRR ont des résolutions spatiales similaires dans le domaine thermique, respectivement de 1 et 1.1km au nadir. Bien que MODIS enregistre sur six canaux thermiques et NOAA-AVHRR sur deux, l'activité en août 2003 des satellites NOAA 12, 16, 17 induit une périodicité de 6 à 4 heures, plus appropriée pour les statistiques d'images et l'estimation du cycle diurne de température.

Quatre-vingt-quatre images, captées entre le 21 juillet et le 21 août par le radiomètre AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), à bord des satellites NOAA, ont été acquises par la station de réception de l'Istituto Nazionale di Oceanografica e di Geofisica Sperimentale de Trieste, en Italie. La figure 13 montre une image NOAA-AVHRR du 10 août 2003 dans le canal 1 visible (13.a) et le canal 4 thermique IR (13.b).

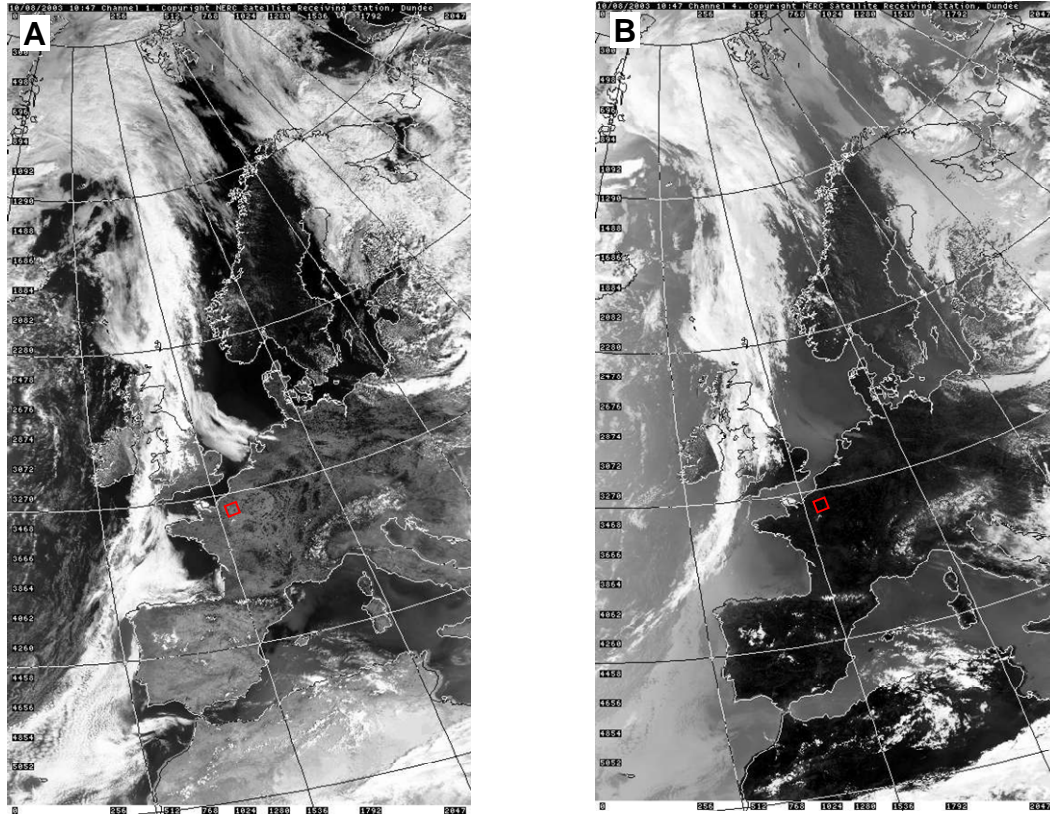


Figure 13. Images NOAA-AVHRR reçues à la station de réception (H RTP), le 10 août 2003 à 10:20 TU, (A) canal 1 dans le visible, (B) canal 4 dans l'infrarouge thermique

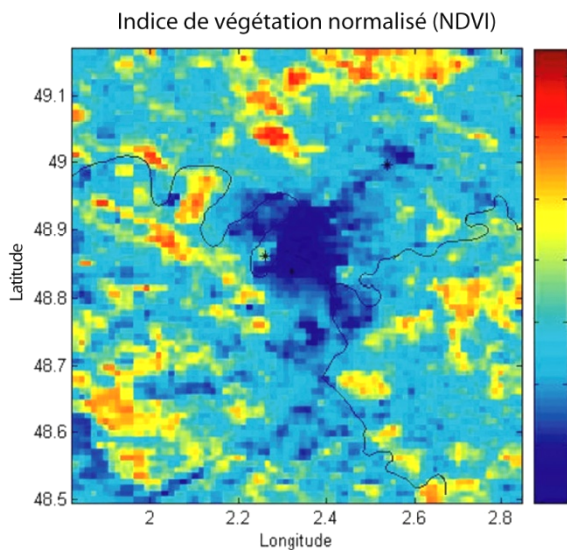


Figure 14. Zoom sur l'Indice de Végétation en région parisienne, extrait de la figure 13 A

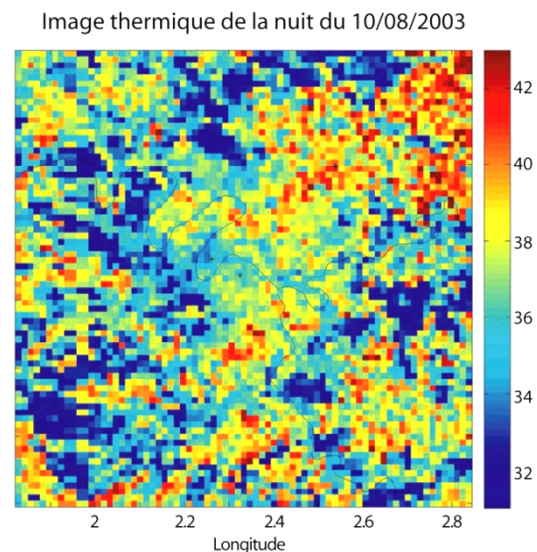


Figure 15. Zoom sur la température de radiance en région parisienne, extrait de la figure 13 B.

Les images ont été traitées avec les logiciels TeraScan® et Matlab®, et avec des scripts spécifiques écrits par le "Urban Remote Sensing Laboratory" de l'Université de Hawaii. Soixante-seize images furent sélectionnées, en fonction de la nébulosité, de la qualité de l'image et de la visée du capteur, afin d'obtenir une résolution au sol d'environ 1,1 km et de minimiser l'atténuation atmosphérique et les effets d'anisotropie. Les images ont été rectifiées géométriquement pour éliminer les perturbations générées par la rotation et la courbure terrestres, puis projetées selon le référentiel géographique. Le capteur NOAA-AVHRR comprend 6 canaux centrés à 0.62 μ m (canal 1), 0.91 μ m (canal 2), 1.61 μ m (canal 3A) et 3.74 μ m (canal 3B), 10.8 μ m (canal 4), et 12 μ m (canal

5). On dispose pour chaque passage du satellite de six images (une par canal) à partir desquelles on peut calculer l'albédo⁴ terrestre et nuageux (canal 2) et la température de surface (canal 4). L'Indice de Végétation (figure 14) a été calculé par la Différence Normalisée (NDVI) entre les canaux visible (C_{vis}) et proche-infrarouge (C_{pir}) selon la formule ci-dessous :

$$NDVI = (C_{pir} - C_{vis}) / (C_{pir} + C_{vis})$$

La couverture nuageuse est estimée, la nuit à partir de la variation spectrale de l'émissivité⁵ des nuages entre les canaux 3 et 4, et le jour à partir d'un seuil de référence basé sur l'histogramme d'une image sans nuage. La figure 15 montre une image de température de surface de la région parisienne (canal 4).

Les températures de radiance ont été calibrées à l'aide des références du corps noir à l'intérieur du capteur. La température de radiance se différencie de celle de la surface pour les raisons suivantes: (a) l'absorption partielle de la radiation infrarouge par des composants de l'atmosphère tels que la vapeur d'eau; (b) la variation spatiale et spectrale de l'émissivité de surface des matériaux de couverture (Becker and Li, 1995 ; Dash *et al.*, 2002 ; Gustafson *et al.*, 2006); (c) les fluctuations de température au sein du pixel moyennées de manière non linéaire selon la loi de Planck (Dozier, 1981 ; Dousset *et al.*, 1993) ; (d) les canyons urbains qui trappent l'énergie radiante et incidente, augmentant l'émissivité moyenne du pixel ; et (e) les effets directionnels et d'anisotropies causés par l'angle de vue du satellite et la structure urbaine (Lagouarde *et al.*, 2004; Voogt and Oke, 1998).

La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est estimée par l'atténuation différentielle des canaux 4 et 5 (McClain *et al.*, 1985). En août 2003, dans la région parisienne, l'air était sec. La figure 16 montre que l'atténuation correspond à une erreur inférieure à 1°C la nuit et à une erreur comprise entre 1°C et 1.8°C le jour pour des températures de radiance comprises entre 30°C et 40°C. Une correction n'était pas justifiée car la marge d'erreur des mesures de radiosondes et du modèle de transfert radiatif, utilisés à cet effet, aurait excédé celle de la température de radiance. L'objectif étant d'étudier la variation temporelle de la température de surface, les corrections d'émissivité, indépendantes du temps, n'ont pas été prises en compte. L'émissivité pourrait être estimée, comme dans nos travaux précédents (Dousset, 1989) par la linéarisation de la loi de Planck ou être extraite d'une image EOS ASTER selon une méthode de séparation entre la température et l'émissivité (Gustafon *et al.*, 2006)

L'absorption du rayonnement s'accroît avec la distance du trajet dans l'atmosphère. Cette distance varie avec la mesure de l'angle compris entre le zénith et la visée du capteur. De plus l'angle solaire crée un effet miroir à l'opposé de la position du soleil. Ces variations directionnelles dépendent de trois paramètres : 1) la portion de la structure urbaine éclairée par le soleil (excepté le point de chaleur solaire); 2) le point de chaleur solaire (dépendance soleil-zénith); 3) la radiation moyenne des surfaces urbaines. On peut soit : sélectionner les images captées avec un faible angle de visée compris entre 0° et 30°; définir un seuil inférieur à 45°; ou garder toutes les images. Le premier cas limite le nombre d'images utilisables, le deuxième cas exige une correction rigoureuse, le troisième cas ne peut être envisagé car le pixel est trop déformé. Comme nous voulions utiliser le plus d'images possibles, nous avons choisi le deuxième cas et nous avons appliqué une correction empirique à partir des images consécutives (Roujean , 2000 ; Lagouarde *et al.*, 2004).

Ces données ne sont donc pas absolues mais relatives, et compatibles avec les données relatives de l'enquête sanitaire. Il faut rappeler ici que la notion de température de surface urbaine, à l'échelle d'un kilomètre, est toujours une approximation car le pixel est composé de multiples « surfaces » ayant chacune des propriétés radiatives différentes, et que le spectre de radiation est un spectre hybride qui ne suit pas la loi du corps noir. La figure 17 montre la distribution thermique des pixels pour les images de nuit et de l'après-midi, pour la période de la canicule.

⁴fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi vers l'espace. La valeur est comprise entre 0 et 1.

⁵rapport entre l'énergie rayonnée par un matériel et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température. (valeur entre 0 et 1).

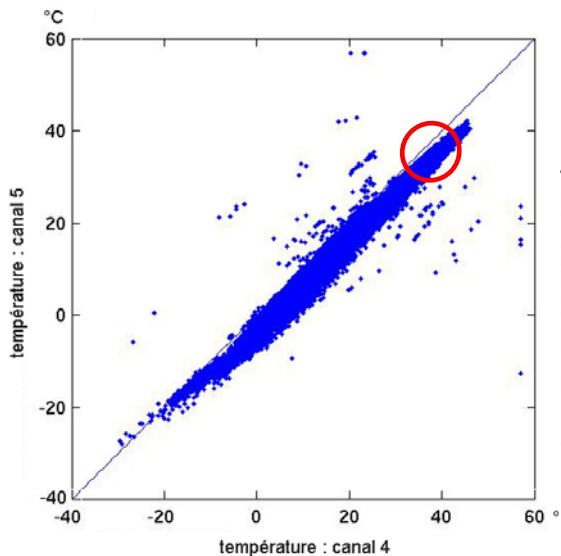


Figure 16. Déviation de la température due à l'absorption du rayonnement infrarouge par les composants de l'atmosphère. L'atténuation est plus importante le jour (cercle rouge) que la nuit.

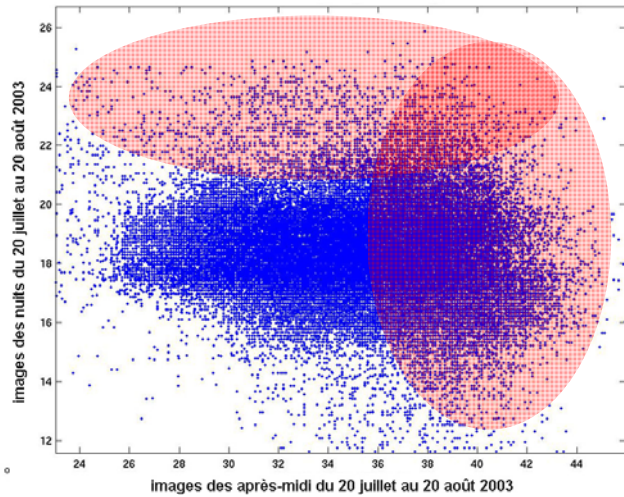


Figure 17. Nuage des pixels des images de nuit et d'après-midi en août 2003. Les zones rouges couvrent les pixels correspondant à la canicule

Des images composites de température de surface moyennées ont été réalisées à partir de 50 images NOAA-AVHRR couvrant la canicule du 4 au 13 août. La figure 18 montre la distribution des images sur les six intervalles de temps correspondant aux différentes heures de passage des satellites : i.e. 1-3, 4-7, 9-12, 12-15, 15-18, et 20-23 Temps Universel (TU).

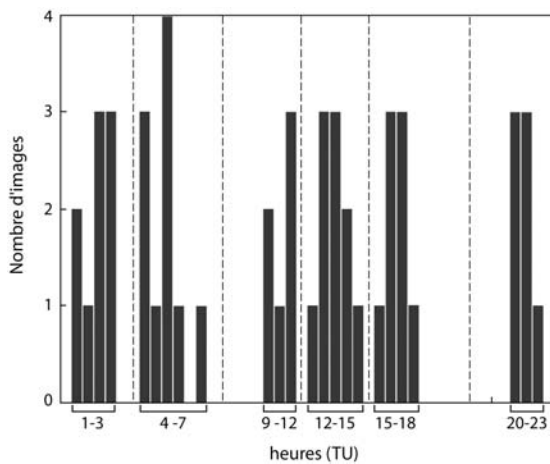


Figure 18. Distribution des 50 images NOAA-AVHRR sur les six intervalles de temps, aux différentes heures de passage des satellites, durant la vague de chaleur du 4 au 13 août 2003

4.2.2. Données du satellite SPOT-HRV4

Les caractéristiques et les propriétés physiques de surface, qui déterminent la balance énergétique ont été extraites d'une image SPOT multi-spectrale haute résolution, acquise le 13 juillet 2003, trois semaines avant la canicule. Le capteur SPOT HRV-4 comprend quatre canaux, du visible au proche infrarouge, centrés à 0.55 μm , 0.65 μm , 0.84 μm , et 1.66 μm . Sa résolution spatiale est de 20 m en mode multi-spectral et de 10 m en mode panchromatique. Les images SPOT-HRV4, livrées dans un niveau de prétraitement 1B, ont été rectifiées géométriquement et projetées selon un référentiel Lambert II étendu.

Une classification non dirigée selon un algorithme de nuées dynamiques a été appliquée afin de produire une couche d'information décrivant l'occupation des sols, ultérieurement superposable aux images thermiques. Le schéma de classification repose sur les types d'occupation des sols ayant *a priori* une relation avec les températures de surface. Six classes ont été définies pour Paris : l'eau, l'urbain dense, l'urbain dispersé (résidentiel), les sols nus clairs, la végétation dense (forêt, bois), la

végétation rase (pelouse, friche, agriculture). Pour améliorer la classification, l'image multi-spectrale est segmentée suivant le NDVI en espaces végétalisés et sols nus. La classification est alors réalisée sur les deux images seuillées, puis après validation des résultats, leurs classes sont agrégées (figure 19).

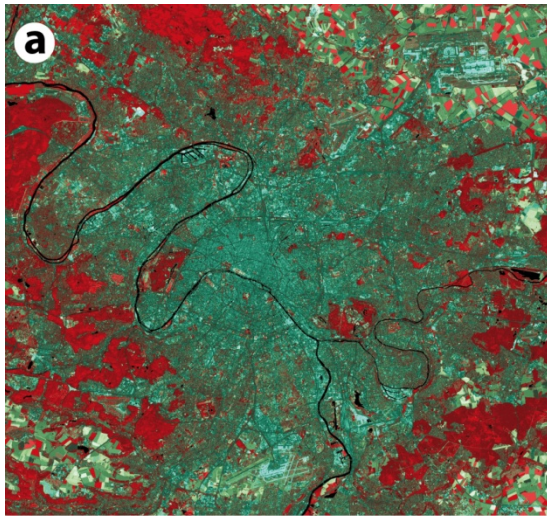



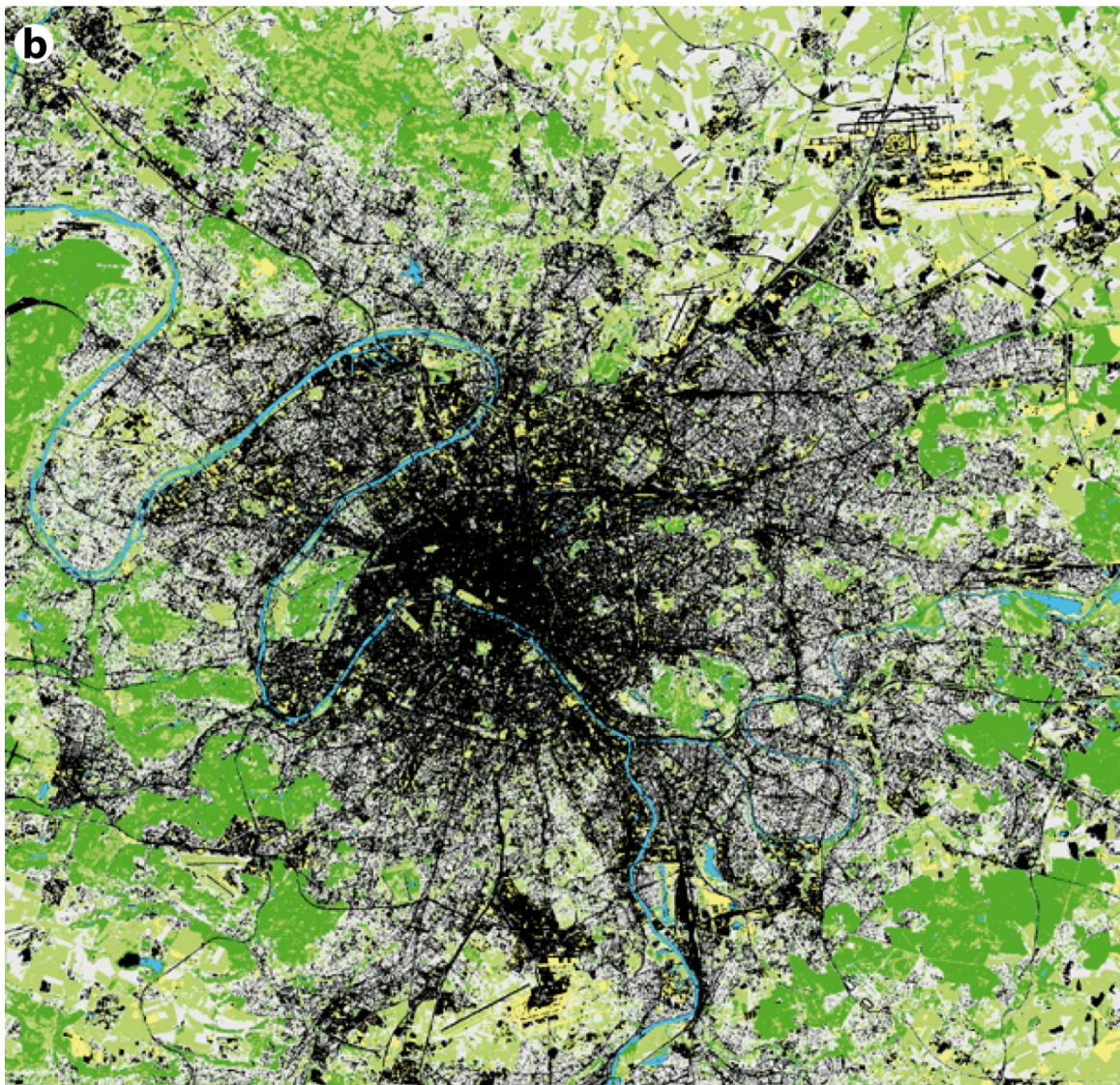


Figure 19. a) Image SPOT HRV 4 du 13 juillet 2003 en fausses couleurs ; b) Classification non supervisée de l'image SPOT en 6 classes d'occupation du sol

	eau		sol nu
	zone urbaine dense		bois et forêts
	banlieue		pelouses et champs



Des données complémentaires concernant les limites administratives, l'hydrographie, la végétation et les zones industrielles ont été fournies par l'Agence Parisienne d'Urbanisme (APUR) et intégrées dans une base d'information pilotée par un Système d'Information Géographique (SIG).

4.2.3. Combinaison de données NOAA-AVHRR et SPOT-HRV

Les produits thématiques résultant du traitement des images ont été introduits dans une base d'information géographique, pilotée par le logiciel Arc Info®. La classification de l'image SPOT est transformée en grille géoréférencée (Arc Info Grid®), dans laquelle chaque pixel⁶ de 20 m est décrit par une valeur de classification. L'image NOAA-AVHRR est également introduite dans la base d'information géographique et transformée en grille. Chaque pixel de 1000 m y est décrit par une valeur de température de surface. A ce stade, les deux grilles référencées dans un système de projection commun sont combinées. Leur fusion est réalisée, soit en mode raster/raster, soit en mode vecteur/raster notamment pour l'exploitation cartographique des résultats. Ainsi, une fonction zonale permet d'estimer les températures associées aux types d'occupation des sols. Une fonction régionale permet de calculer le pourcentage de couverture d'un type d'occupation des sols dans un pixel NOAA-AVHRR, décrit par une température donnée.

4.2.4. Données météorologiques à la station de Paris-Montsouris

Les données météorologiques *in situ* proviennent de la station automatisée de Paris-Montsouris. Les données horaires concernent la température de l'air à 1,50 m et à 10 cm du sol, la température dans le sol à -10 cm, le point de rosée, la vitesse du vent et sa direction, l'humidité relative, la vapeur d'eau, l'insolation et la nette radiation. Des données supplémentaires à 00:12 TU concernent la température dans le sol à 20 cm, 50 cm, et 1 m de profondeur.

Les températures de l'air (Tair) et de la surface (Tsurf) sont intrinsèquement différentes. Tair correspond à la température ambiante à 1.50 m au dessus du sol, tandis que Tsurf représente la température de radiance moyennée sur 1 pixel (1.1km) incluant principalement des surfaces horizontales à différentes hauteurs dans la canopée urbaine. Ces mesures sont complémentaires parce que le flux de chaleur sensible est déterminé par la différence de température entre la surface et l'air juste au dessus de celle-ci. Leur corrélation dépend de la distribution des flux de chaleur.

La figure 20 comprend, pour la période du 1^{er} au 13 août, (a) la température horaire de l'air et la température de surface à un intervalle de 4 ou 6 heures, (b) l'humidité relative horaire, (c) la vitesse du vent, (d) la relation entre Tsurf et Tair le jour (12-15 TU), et (e) la nuit (01-06 TU). Les pentes et écarts des régressions linéaires sont indiqués dans les figures respectives. Le coefficient de corrélation linéaire était de 0,92 la nuit et 0,68 le jour, reflétant probablement, au sein du pixel, une plus grande variation de matériaux de surface et des flux de chaleur. Les températures minimales de Tair et Tsurf surviennent avant le lever du soleil à ~5:00 TU, juste avant le retour de l'insolation lorsque la radiation cesse d'être négative. La nuit, Tair était généralement de 1°- 2°C plus élevé que Tsurf, sauf le 12 août au pic de la vague de chaleur, quand le gradient près du sol a atteint 5°C, à cause du faible mélange vertical. Les températures maximales de surface correspondent au moment de plus grand rayonnement solaire, alors que les températures maximales de l'air sont décalées typiquement de 3 heures. A ~13:00 TU, la différence entre Tair et Tsurf varie de -2°C à -4°C, indiquant un important gradient de température près de la surface, dû à l'intense chaleur radiative. Du 5 au 8 août au milieu de la journée, il manque des images satellitaires faisant paraître à tort Tsurf inférieur à Tair. Quelques différences résiduelles peuvent aussi être attribuées aux effets directionnels (Lagouarde *et al.*, 2004).

⁶unité de surface permettant de mesurer une image numérique, à chaque pixel est associée une valeur.

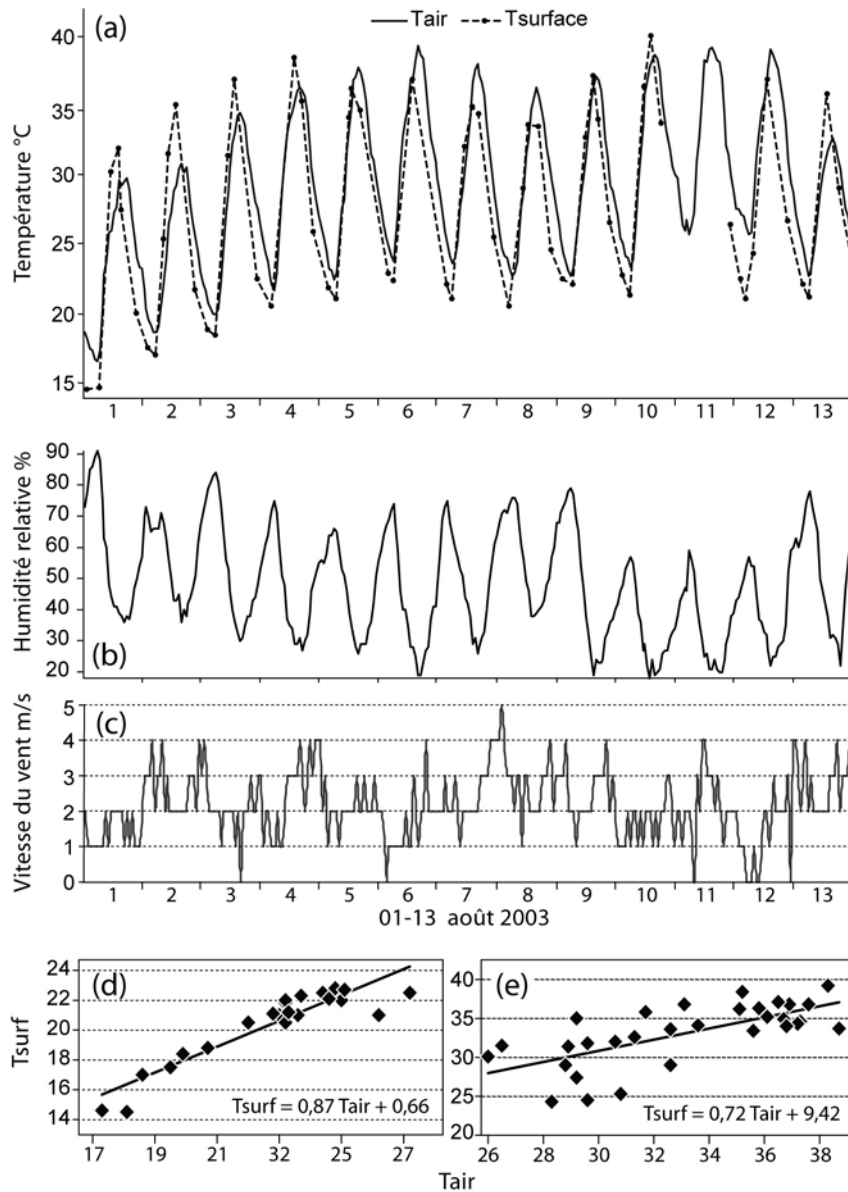


Figure 20. Mesures à la station météorologique de Paris-Montsouris du 1^{er} au 13 août, (a) Tair : température horaire de l'air ; Tsurf : température (satellitaire) de surface mesurée à un intervalle de 4 ou 6 heures, (b) humidité relative horaire, (c) vitesse du vent, (d) relation entre Tsurf et Tair la nuit (01-06 TU), (e) relation entre Tsurf et Tair le jour (12-15 TU).

Note sur le graphique (a) : l'absence d'image en mi-journée du 5 au 8 août fait apparaître à tort des températures de surface inférieures aux températures de l'air. L'absence d'image pour la période du 10 août à 15h jusqu'au 11 août à 22h explique la rupture de la courbe Tsurface.

4.3. Acquisition et traitement des données sanitaires

4.3.1. Enquête cas-témoins

L'enquête réalisée juste après la canicule d'août 2003 était une enquête cas témoins exploratoire appariée (Bretin *et al*, 2004). L'étude analysait de façon rétrospective les différences d'état de santé et de conditions de vie chez des personnes âgées décédées, par rapport à des personnes du même âge, du même sexe, habitant dans la même zone géographique, et qui sont considérées comme un groupe témoin (de personnes survivantes). Les données de cette enquête ont servi à l'analyse réalisée lors de la présente étude.

Les personnes de 65 ans et plus ont représenté 91% de la répartition par âge de surmortalité durant la période du 1 au 20 août (Tableau 2). Les régions de l'Ile de France et du Centre ont été les plus touchées. Le tableau 3 présente la surmortalité par département pour ces deux régions.

Tranches d'âge	O	E	O/E	O-E
45-54 ans	2 212	1 798	1,2	414
55-64 ans	3 065	2 328	1,3	737
65-74 ans	5 964	4 664	1,3	1 300
75-84 ans	12 583	7 336	1,7	5 247
85-94 ans	12 626	7 488	1,7	5 138
≥ 95 ans	3 323	1 498	2,2	1 825
tous âges	41 621	26 819	1,6	14 802

Tableau 2. Répartition des décès par âge pendant la période du 1er au 20 août.
O = décès observés, E= décès estimés à partir des décès observés en 2000, 2001 et 2002 (source : Inserm)

	Nombre de décès observés (O)	Nombre de décès attendus (E)	Excès : O - E	Contribution à l'excès global	O / E
France métropolitaine	41621	26818,6	14802,4	100,0%	1,6
Ile-de-France					
Paris	1910	843,1	1066,9	7,2%	2,3
Seine-et-Marne	730	387,1	342,9	2,3%	1,9
Yvelines	815	391,7	423,3	2,9%	2,1
Essonne	905	366,5	538,5	3,6%	2,5
Hauts-de-Seine	1295	495,7	799,3	5,4%	2,6
Seine-Saint-Denis	949	365,2	583,8	3,9%	2,6
Val-de-Marne	1202	443,8	758,2	5,1%	2,7
Val-d'Oise	700	345,9	354,1	2,4%	2,0
Total Ile-de-France	8506	3639,1	4866,9	32,9%	2,3

Tableau 3. Répartition régionale des décès de l'Île-de-France du 1er au 20 août.
O = décès observés, E= décès estimés à partir des décès observés en 2000, 2001 et 2002 (source : Inserm)

La population retenue dans la présente étude concerne les personnes de plus de 65 ans vivant à Paris et dans le Val de Marne, qui représentent 93% des cas et témoins inclus dans l'enquête initiale de 2003. La population de la région Centre est exclue. Les cas et les témoins ont été définis lors de la première étude en 2003, ainsi que les caractéristiques des logements, qui étaient des domiciles individuels (logements dans un immeuble collectif ou une maison individuelle ne faisant pas partie d'une structure de soins ou d'hébergement pour personnes âgées). Le détail de ces choix est présenté en Annexe 1.

Les cas ont été définis comme des personnes :

- ayant un certificat de décès ne mentionnant pas une cause accidentelle, de suicide ou de complication chirurgicale aiguë,
- ayant 65 ans ou plus,
- décédées au cours du pic de mortalité lié à la chaleur (entre le 8 et le 13 août),
- qui vivaient dans un logement individuel (quel que soit le lieu du décès) et qui avaient passé au moins 24 heures chez eux avant leur prise en charge hospitalière ou leur décès,
- dont le domicile est situé à Paris ou dans le département du Val-de-Marne.

Les témoins ont été définis comme des personnes :

- ayant 65 ans et plus,
- domiciliées dans la zone d'étude,
- ayant vécu à leur domicile pendant la période du 8 au 13 août (comme pour les cas, il s'agit du domicile individuel).

Les témoins ont été appariés aux cas sur l'âge, le sexe et la zone d'habitation. Les principes retenus pour le recrutement des témoins furent les suivants :

- l'âge des témoins ne devait pas différer de celui des cas de plus de 5 ans,
- la zone d'habitation était définie comme une unité géographique regroupant environ 100 000 habitants, de même profil social. Ainsi pour Paris, 14 zones ont été définies selon le niveau moyen des loyers (IAURIF⁷, INSEE⁸, 2001), et 11 zones pour le Val de Marne en fonction de la répartition de la population résidant dans les foyers à bas revenus (IAURIF, INSEE, 2000).

4.3.2. Variables étudiées

Les variables étudiées lors de la première enquête cas-témoin, et qui ont été à nouveau introduites dans le modèle de la présente étude, concernent les caractéristiques individuelles (âge, mode de vie, comportement, pathologies, etc.). Ces variables sont décrites en Annexe 2. Les données permettant de décrire la prise en charge médicale des cas avant le décès ont également été recueillies. Le questionnaire complet pour les cas est présenté en Annexe 3.

Les données relatives aux bâtiments ont été communiquées par la Direction Générale des Impôts à partir du fichier des propriétés bâties, et celles relatives à l'environnement des adresses ont été fournies par l'IAURIF pour l'ensemble de la zone d'étude. L'autorisation de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés a été demandée pour l'enquête 2003. Pour la présente étude, un renouvellement de cette autorisation n'était pas nécessaire dans la mesure où il s'agissait des mêmes données utilisées dans la même finalité, et où l'accord initial prévoyait une durée de conservation des données illimitée. Les détails de l'enquête 2003 sont fournis en Annexe 4.

4.3.3. Analyse statistique cas-témoins

L'analyse a été réalisée en prenant toutes les causes de décès retenues dans la définition des cas, avec 1 témoin par cas. Ceci permet d'intégrer le plus grand nombre de cas et de témoins. Par ailleurs un appariement a été réalisé: il a consisté à regrouper les individus cas (décédés) et témoins (non décédés) en groupes homogènes en fonction de la zone géographique de décès, du sexe et de l'âge des individus.

Pour l'analyse toutes causes de décès, il a été décidé d'améliorer l'appariement sur l'âge, qui n'avait pu être réalisé parfaitement lors de la recherche des témoins. Pour cela, les zones d'appariement ont été élargies. Les 29 zones définies dans un premier temps ont été regroupées en 5 zones (A à E), ainsi que le montre la figure 21.

⁷ Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Île-de-France

⁸ Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

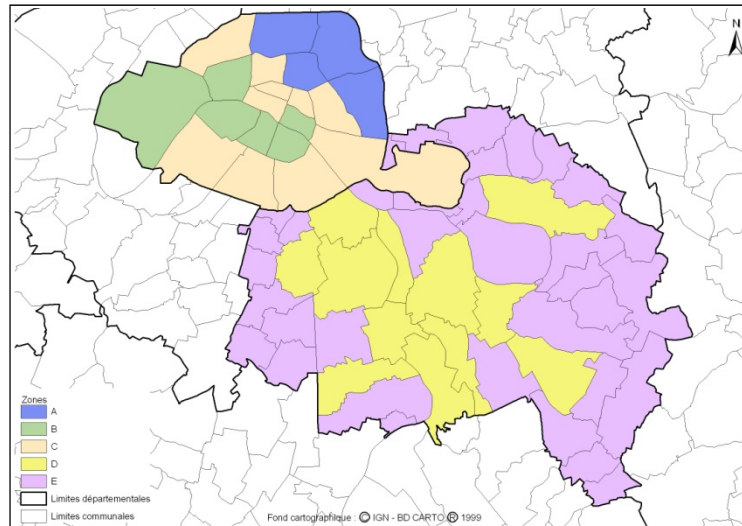


Figure 21. Carte des zones d'appariement pour l'Île de France

Une fois les cas et témoins appariés sur la zone géographique et le sexe, les paires cas-témoins ont été sélectionnées en se basant sur la différence d'âge minimale (moins de 12 ans). Les différences d'âge entre les paires sont présentées dans la figure 22. L'âge des cas restait en moyenne un peu plus élevé que celui des témoins (0,56 ans). Les analyses univariées et multivariées appariées ont donc été ajustées sur l'âge.

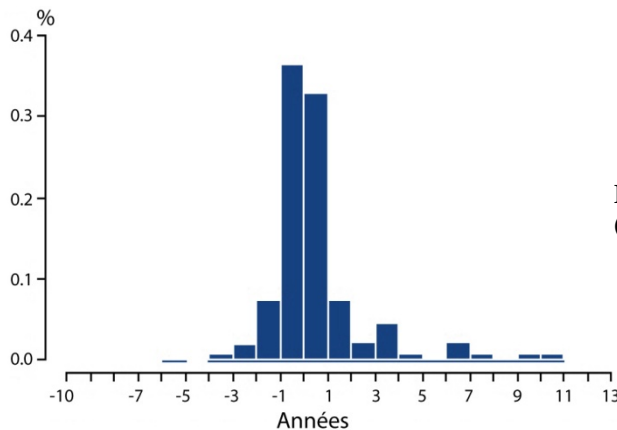


Figure 22. Distribution des différences d'âge (moins de 12 ans) entre cas et témoins appariés.

La méthode d'analyse statistique est un cas-témoins apparié, basé sur un modèle de régression logistique conditionnelle (Breslow et Day, 1980). Dans ce modèle, la vraisemblance pour un nombre N de paires cas-témoins s'écrit :

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^N \frac{\exp\left(\sum_{j=1}^p \beta_j (x_{ij}(1) - x_{ij}(2))\right)}{1 + \exp\left(\sum_{j=1}^p \beta_j (x_{ij}(1) - x_{ij}(2))\right)}$$

où i désigne la paire i, β_j , $j=1, \dots, p$ sont les paramètres à estimer quantifiant l'influence des variables explicatives (facteurs de risque) x_j , $j=1, \dots, p$ sur le risque de décès. $x_{ij}(1)$ représente la variable explicative j de la paire i pour le cas et $x_{ij}(2)$ représente la variable explicative j de la paire i pour le témoin.

Lors de la première étude, qui sert de base à celle-ci, l'identification des facteurs de risque associés à la mortalité a été effectuée en deux étapes. La première étape est basée sur une analyse univariée appariée. La seconde étape consiste en une analyse multivariée qui permet d'analyser plusieurs facteurs de risque simultanément et de prendre en compte leurs interactions. Seules les variables présentant une association avec la mortalité en analyse univariée ($p < 0,20$) ont été prises

en compte dans l'analyse multivariée appariée. Les variables dont le taux de remplissage était très faible n'ont pas été incluses dans le modèle multivarié. Seules les variables améliorant l'ajustement du modèle (réduction de la déviance, critère d'Akaike, ...) ont été retenues dans le modèle multivarié final. Ainsi certaines variables très corrélées entre elles sont représentées dans le modèle par une seule variable représentative de l'ensemble des variables décrivant le même phénomène. Les variables retenues dans le modèle multivarié final ont un seuil de significativité de 10 %. La procédure PHREG du logiciel SAS (SAS/STAT software 1999) a été utilisée pour l'estimation des odds ratios⁹ associés aux différents facteurs de risque.

Concernant les variables quantitatives, elles ont d'abord été traitées de façon non paramétrique pour explorer la forme de la relation, en utilisant la fonction GAM (Generalised Additive Model) du logiciel Splus (Math Soft Inc. Seattle. 2003). Elles ont ensuite été introduites de façon linéaire dans les modèles, car la forme de la relation pouvait être approchée par une fonction linéaire. Pour la présente étude, cette dernière étape a été reproduite, en conservant l'ensemble des variables à l'exception de l'indicateur thermique issu de l'image Landsat-TM, qui a été remplacé par les nouveaux indicateurs thermiques issus des 61 images NOAA-AVHRR. Les données de l'Île-de-France représentant 94% des données, il n'était pas nécessaire de refaire un nouveau modèle, qui par ailleurs n'aurait pas permis de comparaison avec les résultats de la première étude.

4.4. Production des indices thermiques à partir des données des satellites NOAA-AVHRR

4.4.1. Extraction des indices thermiques aux adresses géocodées

L'indice thermique utilisé dans l'enquête de 2003 avait été construit à partir d'une image thermique d'une résolution de 120 m prise le 9 août 2003 à 10:17 TU par le satellite Landsat-TM. Cet indice indique une température moyenne de surface sur 120 m autour du domicile des cas et des témoins. Le nouvel indice thermique a été construit à partir de 76 images thermiques NOAA-AVHRR (20 juillet - 21 août 2003) à une résolution spatiale de 1.1km. Les domiciles des cas et des témoins incluent 482 adresses géocodées: 241 décès advenus entre le 8 et le 13 août et 241 témoins. A chaque passage du satellite, la température de chaque pixel contenant une ou plusieurs adresses géocodées a été extraite, soit une production de plus de 28 400 indices thermiques. Ces indices représentent la température moyenne du pixel, quelle que soit la localisation du domicile des cas et des témoins dans ce pixel. La figure 23 représente la distribution spatiale des 482 adresses géocodées sur une image thermique NOAA-AVHRR, la nuit. 76 images NOAA-AVHRR ont été examinées individuellement, pour vérifier les valeurs déviant de la moyenne et enlever les pixels bruités ou contaminés, avant la production finale du fichier d'indicateurs thermiques.

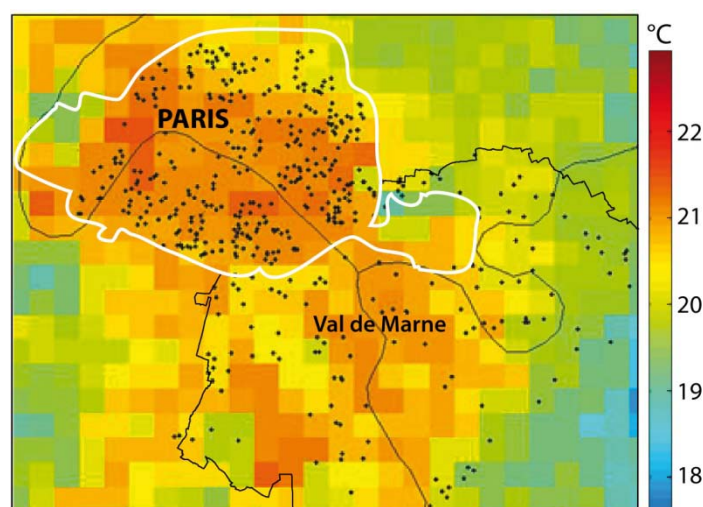


Figure 23. Distribution des 482 adresses géocodées sur une image thermique de nuit NOAA-AVHRR.

⁹ mesure statistique, utilisée en épidémiologie, permettant de mesurer le degré de dépendance entre des variables aléatoires qualitatives

4.4.2. Définition de nouveaux indicateurs thermiques

Différents indicateurs thermiques ont été construits à partir des températures de surface : les températures minimales, maximales et moyennes, ainsi que les écarts entre température maximale et minimale. Ces indicateurs ont été construits pour différents décalages avec le jour du décès et différents cumuls :

- aucun décalage (température du jour du décès),
- décalage d'1 jour (température de la veille du décès),
- moyenne sur trois jours (jour du décès et deux jours précédents),
- moyenne sur 7 jours (jour du décès et 6 jours précédents),
- moyenne sur toute la période d'étude (13 jours).

Le choix de ces décalages est issu des recherches bibliographiques sur le délai entre l'exposition à la chaleur et son impact sur la santé. En effet, l'impact d'une vague de chaleur a des effets immédiats sur les décès, c'est le coup de chaleur ou hyperthermie qui survient le jour même de l'exposition ou le lendemain. La vague de chaleur a également des effets retardés sur la mortalité, lorsque les fortes températures aggravent une maladie existante ou contribuent à la déclencher. Ainsi à Chicago en 1995, une vague de chaleur a entraîné un grand nombre de décès, dont le pic est survenu deux jours après l'observation de la température la plus élevée. Le taux de mortalité est revenu normal après quatre jours (2;25). Dans une étude conduite à Rome sur une cohorte des personnes âgées, Schifano *et al.*, (2009) ont décrit la probabilité de la mortalité liée à une vague de chaleur sur une période consécutive de trois jours. Si l'essentiel des effets se concentre sur une courte période suivant la vague de chaleur, on observe également des effets plus ou moins retardés en fonction de la pathologie impactée par la chaleur, entraînant des décompensations de maladies cardio-vasculaires ou respiratoires préexistantes. Dans l'étude de Ballester *et al.*, (1997) concernant les vagues de chaleur à Valence (Espagne), la mortalité la plus forte apparaît dans la semaine suivant l'événement, tandis que la mortalité liée aux maladies respiratoires, apparaît dans un délai de 7 à 14 jours.

4.3.3. Intégration des indicateurs thermiques dans le modèle de régression logistique

Les indices thermiques issus des données satellitaires ont été intégrés dans l'enquête cas témoin, qui a permis d'identifier les facteurs de risques de mortalité pendant la canicule 2003 (Bretin *et al.*, 2004; Vandertorren *et al.*, 2006). Les indices thermiques devenus ainsi "indicateurs" thermiques ont été intégrés dans le modèle de régression logistique conditionnelle (Breslow et Day, 1980) défini lors de l'enquête 2003 pour tester la pertinence de leur usage comme facteurs d'exposition à la chaleur. Le modèle est ajusté aux facteurs de risques significativement liés aux décès tels que la catégorie socio-professionnelle, l'autonomie de la personne, l'adaptation comportementale à la canicule, l'état de santé (maladie cardio-vasculaire, hypertension artérielle, maladie psychiatrique et maladie neurologique), l'isolation du logement et de la pièce de nuit située sous le toit.

5. Résultats

5.1. Le cycle diurne de température de surface

Les images thermiques NOAA-AVHRR ont été analysées séparément afin de détecter les réponses spécifiques ou les anomalies ponctuelles, puis statistiquement au moyen des images composites afin d'observer les phénomènes récurrents. La figure 24 montre les 6 images composites de la température moyennée, construites à partir des 50 images captées durant la vague de chaleur entre le 4 et le 13 août (cf. figure 18).

Ces images mettent en évidence la variabilité spatiale des anomalies thermiques durant le cycle diurne. Elles révèlent le contraste entre la distribution des îlots de chaleur de nuit et de jour, et les différents taux d'échauffement et de refroidissement renforcés par l'atmosphère stable qui a caractérisé l'épisode de canicule. Cette variabilité de la température de surface a été analysée en fonction des caractéristiques des sols urbains en fusionnant (1) les données thermiques à 1 km de résolution, (2) et la classification des sols à 20 m de résolution, suivant une méthodologie développée par Dousset et Gourmelon (2003).

La nuit, les images montrent un îlot de chaleur sur le centre ville, avec une magnitude d'environ 8°C dans les images composites de 20-23 TU et 01-03 TU (figure 24 a. b) et d'environ 6°C dans l'image composite de 04-07 TU (cf. figure 24 c). L'accroissement concentrique de l'intensité de température est bien corrélé avec celui de la densité du bâti (cf. figure 19.b). En banlieue et dans les zones rurales, en soirée (20-23 TU) au pic de la canicule, l'humidité relative (27% à 40% au Parc Montsouris) a produit une évapotranspiration inhabituelle, qui s'est ajoutée au refroidissement par rayonnement. Dans les zones rurales au nord de Paris, la température de surface décroît de 4°C et demeure constante le reste de la nuit. Le centre ville continue de produire de la chaleur anthropique, tandis que la restitution de l'énergie absorbée par les bâtiments dans la journée est ralentie par la structure urbaine qui piège et diffracte le rayonnement. Les températures les plus basses sont observées au lever du soleil, à la fois dans les banlieues (~19°C) et dans le centre ville (22°C).

Le jour, de nombreuses anomalies thermiques apparaissent dans les quartiers densément bâtis et / ou industriels de la banlieue, reflétant les variations de la balance énergétique entre les surfaces sèches et celles comparativement humides. Au pic de la vague de chaleur, dans le Parc Montsouris, l'humidité relative décroît de 38% à 18%, et le vent fluctue entre environ 0 et 2m/s. De 9 à 12 TU, la région nord-est de Paris s'échauffe rapidement, à cause de la faible inertie thermique des surfaces et de la chaleur anthropique produite par les industries et l'intensité du trafic. De 12 à 15 TU (figure 24 e), on observe des îlots de chaleur de plus de 10°C. Les températures de surface les plus élevées, de 38°C à 42°C, surviennent dans les banlieues :

- au nord dans les zones industrielles de St Ouen, Aubervilliers, St Denis, et dans les zones de fret du Bourget, de Garonord et à l'aéroport de Roissy;
- à l'ouest, dans la zone industrielle d'Argenteuil;
- dans le sud, dans les zones industrielles et la gare de triage d'Ivry sur Seine, les centrales thermiques et électriques de Vitry, les zones de fret de Rungis et à l'aéroport d'Orly.

Les températures de surface de trois sites distincts : le centre de Paris, Garonord (zone industrielle près de l'aéroport de Roissy) et le Bois de Boulogne, localisés sur la figure 25.a, ont été comparées. Figure 25.b représente la température moyennée du cycle diurne sur chacun des sites, sur la période du 1 au 14 août 2003, et la figure 25.c illustre les fluctuations des données en continue. En centre ville, les matériaux de couverture sont l'asphalte, la pierre et le béton. Les bâtiments ont généralement de 7 à 10 étages et leurs toits sont couverts de zinc ou d'ardoise. La zone industrielle est composée de parkings et de voies de circulations (asphalte ou de béton) et de larges entrepôts de 2 à 3 niveaux, avec des toits en acier, en tôle ou en fibre de verre. Le bois de Boulogne, couvert de pelouse, d'arbres et de bosquets, comprend un plan d'eau. Le cycle diurne de température de surface indique une différence quasi constante d'environ 1.5°C à 2.2°C entre la ville et le parc, mais une différence de + 3°C la nuit et -3.5°C à midi entre le centre ville et la zone

industrielle, et +4.5°C à midi entre cette dernière et le Bois de Boulogne.

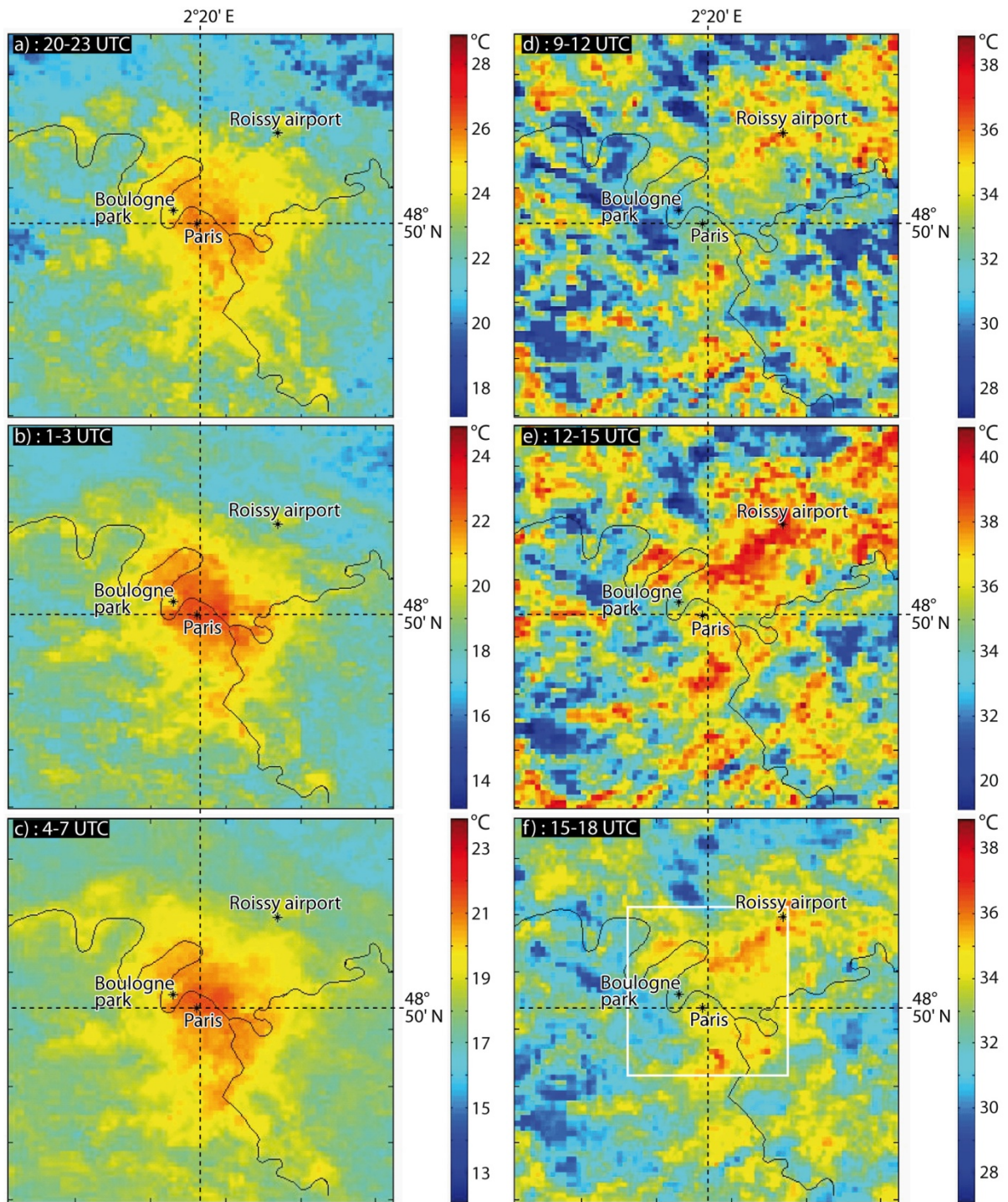


Figure 24. Images "composites" de la température de surface en région parisienne du 4 au 13 août 2003, pour les intervalles de temps présentés sur la figure 18. L' échelle des températures de 10°C a des valeurs de bornes différentes pour chaque image.

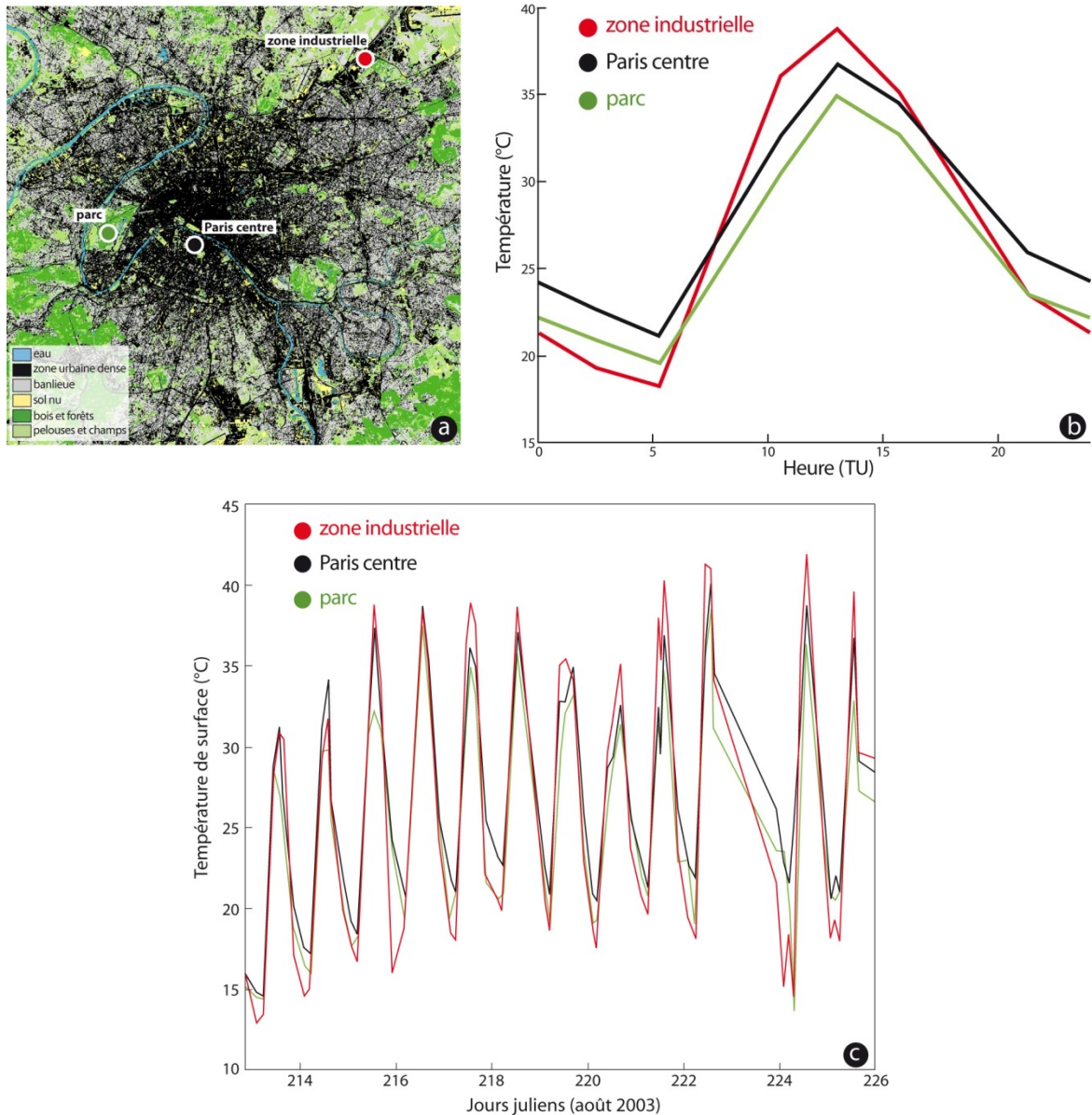


Figure 25. (a) Localisation sur la classification de l'image SPOT des 3 sites. A partir de 50 images NOAA-AVHRR du 1^{er} au 13 août 2003: (b) cycle diurne de la température de surface moyenné sur 24 heures (c) cycles diurnes en continu du 1^{er} au 13 août.

5.2. Variation de température et caractéristiques des surfaces

5.2.1. Végétation

La relation entre la végétation et la température de surface est très importante, puisque l'état de la végétation et l'humidité de surface définissent le potentiel d'évapotranspiration et donc de chaleur latente, par opposition à la chaleur sensible. De fait, la canicule de 2003 a été favorisée par une réduction de l'humidité de surface occasionnée par un déficit de précipitation et une radiation incidente plus importants que la normale durant les 6 mois précédant la canicule. Par exemple, la carte de surface foliaire en France indique un indice moyen de 2,5 en 1999 et 2000, 2,6 en 2001 et 2002 et seulement 2 en 2003, correspondant à une baisse de 20% de la végétation.

L'index de végétation d'août 2003, plus faible que celui des étés normaux, reflète l'importante sécheresse et la réduction de la productivité primaire (Ciais *et al.*, 2005 ; Zaitchik *et al.*, 2006). La

ville de Paris comprend une douzaine de petits parcs (0.1-0.6 km²) et deux grands (8-10 km²) respectivement à l'est (Bois de Vincennes) et à l'ouest (Bois de Boulogne). La figure 26 (a et b) représente l'histogramme bi-dimensionnel de l'image composite de température d'après-midi (12-15 TU) et du NDVI. Cette figure indique une forte corrélation négative avec une pente de -0.2°C par unité de NDVI qui démontre bien la relation entre la végétation et la répartition des flux d'énergie. Ce résultat suggère que les parcs ont probablement été arrosés pendant la période de canicule. L'analyse d'images individuelles, illustrée en figure 27, indique que par rapport aux quartiers environnants, la température de surface dans les petits et grands parcs est plus faible de 2°C à 3°C et de 4°C à 5°C respectivement.

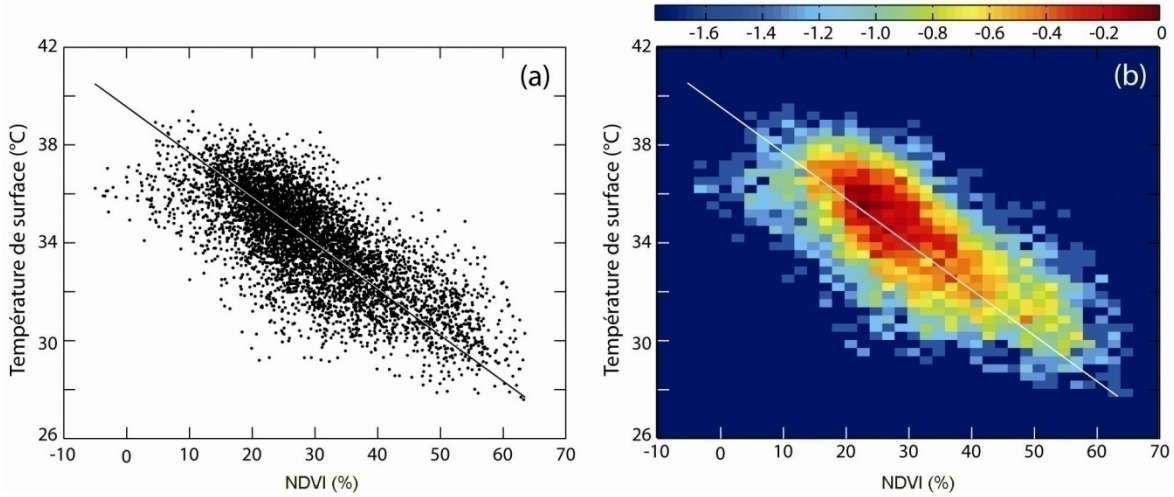


Figure 26. Graphique bivarié de la température de surface moyenne de l'après-midi (12-15 TU) et de l'Indice de végétation normalisé (NDVI %). La barre de couleur montre le \log_{10} de la distribution bivariée de la valeur la plus large.

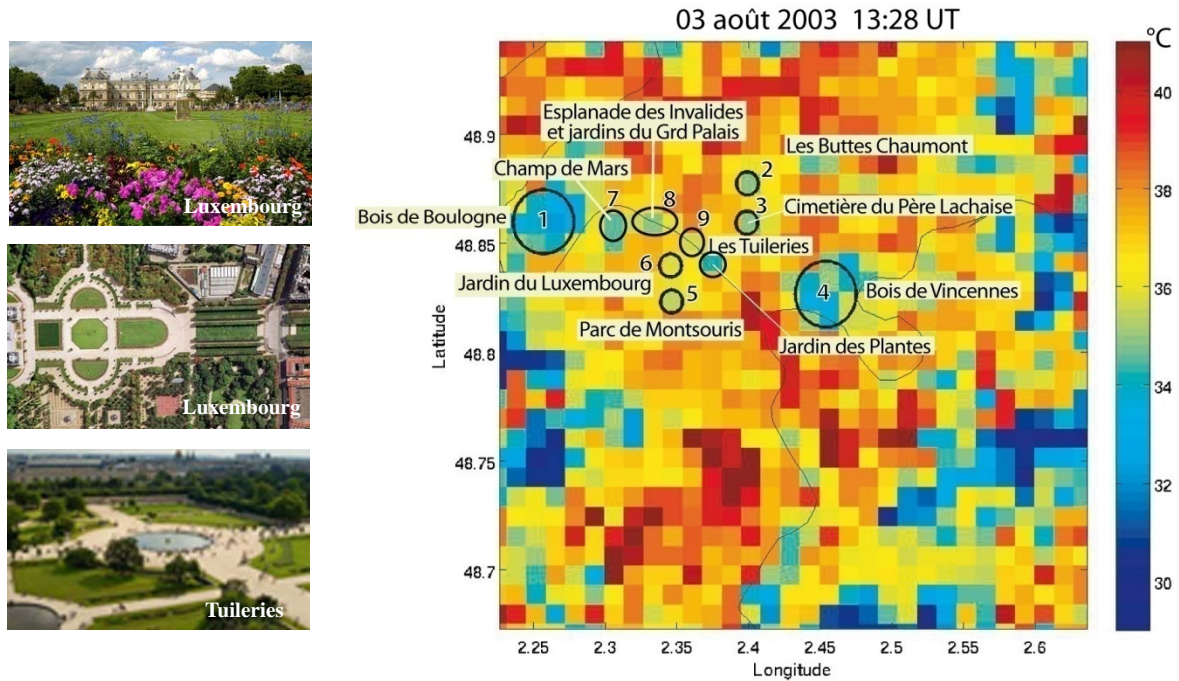


Figure 27. Température de surface le 3 août 2003 à 13:28 TU. Dans les parcs délimités par un cercle, la température est de 2 à 5°C plus basse que que dans les quartiers environnants

5.2.2. Caractéristiques physiques des matériaux de surface

Les propriétés physiques des matériaux de surfaces peuvent générer des anomalies thermiques importantes et influencer la valeur du pixel. L'albédo et l'émissivité de surface varient en fonction de la nature du sol (l'émissivité varie aussi en fonction de la longueur d'onde). La température d'une surface est inversement corrélée à son albédo. La capacité¹⁰ et la diffusion thermique¹¹ des matériaux de surface conditionnent leur niveau d'inertie thermique. Par exemple, les adresses situées entre la Seine et le Bois de Boulogne affichent des températures plus basses que la plupart des autres quartiers dans les images de jour: il s'avère que l'albédo et la capacité thermique des surfaces y sont plus élevées que dans les autres quartiers. La figure 28, ainsi que les figures 25.b et 25.c, démontrent que l'amplitude de température est plus importante dans les quartiers industriels qui sont caractérisés par des surfaces à faible inertie thermique (tel que le béton), que dans les quartiers du centre ville bâtis principalement en pierre blanche et que dans les parcs urbains.

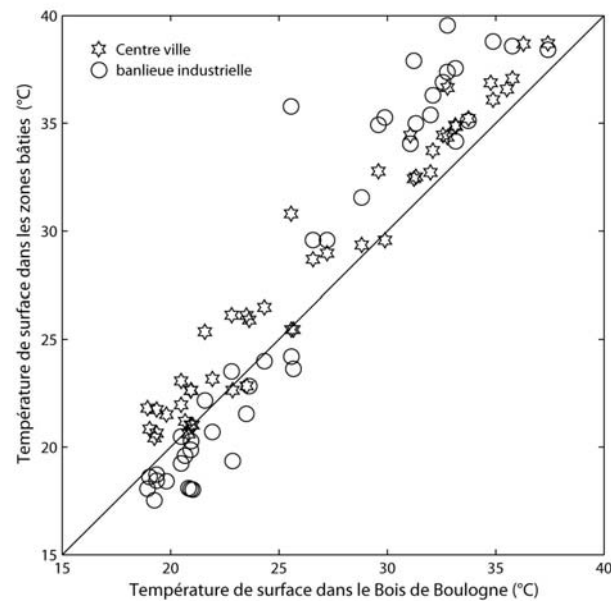


Figure 28. Températures de surface des zones bâties en centre ville et en banlieue industrielle, comparées aux températures de surface du Bois de Boulogne.

5.3. Comparaison des températures des mois d'août 1998 et 2003

Dans une étude précédente les auteurs ont analysé les températures de surface de Paris en août 1998 (Dousset et Gourmelon, 2003), ce qui a permis la comparaison des conditions estivales normales et caniculaires. Entre le 6 et le 11 août 1998, les températures maximales de surface étaient comprises entre 28°C et 36°C, mais les températures minimales ne dépassèrent pas 15°C. La comparaison entre l'amplitude jour / nuit des températures de surface en 1998 et en 2003 (figure 29) indique une différence de -5°C en 2003 (16°C vs. 21°C). En 2003, les températures minimales ont été de 8°C supérieures à celles de 1998. Ces écarts confirment l'importance de la température nocturne sur la formation des vagues de chaleur. Pendant 2 nuits consécutives le 10-11 et le 11-12 août 2003, les conditions météorologiques très stables et l'absence de vent (figure 19) ont empêché le mélange convectif vertical. A 05 TU (07 heure locale), les deux nuits, la température minimale de l'air a atteint 25,7°C. La nuit du 11 août, la température de surface atteignait 21,5°C au Parc Montsouris et 25-26°C dans le centre de Paris. Ces conditions extrêmes de chaleur nocturne peuvent avoir entraîné un manque de repos et de récupération nocturne du stress de chaleur diurne pour les personnes vulnérables. En effet 500 cas de surmortalité ont été observés dans la région parisienne les 12 et 13 août. A partir du 13 août, la température et la surmortalité ont commencé à baisser.

¹⁰ Grandeur physique permettant de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou restituer de l'énergie.

¹¹ Grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur

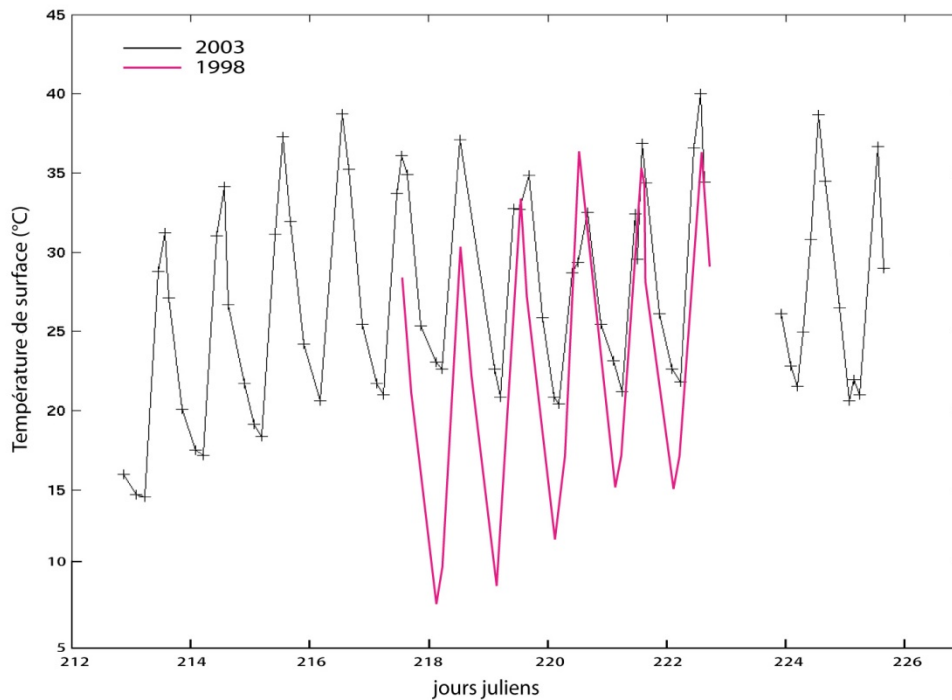


Figure 29. Comparaison des cycles diurnes de température de surface en région parisienne du 6 au 11 août 1998 et du 1^{er} au 13 août 2003. Notez que les températures minimales sont plus élevées en août 2003.

Note sur le graphique : l'absence d'image en mi-journée du 6 au 8 août fait apparaître à tort des températures de surface inférieures aux températures de l'air. L'absence d'image pour la période du 10 août à 15h jusqu'au 11 août à 22h explique la rupture de la courbe 2003.

5.4. Secteurs d'anomalies thermiques

Pour Paris, le seuil de l'indicateur bio-météorologique (I.3) qui sert de base au déclenchement d'une alerte dans le cadre du "Plan National Canicule", est de 21°C pour le seuil minimal et 31°C pour le seuil maximal. Le jour, en ville, une température de l'air de 31°C correspond approximativement à une température de surface d'environ 33°C à 35°C. Par exemple, entre 14 et 17h (locale) dans la région parisienne, excepté pour des zones forestières, les températures de surface sont comprises entre 34°C et 41°C. La nuit, la différence est moindre entre la température de l'air et celle de la surface (de 1°C à 2°C). Entre 22 et 01 heure locale dans la région parisienne, excepté pour les zones forestières, les températures de surface sont comprises entre 24°C et 29°C. Il peut donc y avoir jusqu'à environ 5°C d'écart entre certains secteurs.

Les couches d'information géographique ont été superposées sur les images thermiques pour identifier les secteurs et les heures du jour ou de la nuit pour lesquelles les températures atteignent des valeurs critiques. Ces couches d'information qui comprennent : l'albédo, le pourcentage de végétation, l'hydrologie, la densité de population, les zones industrielles et de transports permettent d'analyser la relation entre la température de surface, l'occupation du sol et les activités humaines. Les figures 30 à 35 présentent plusieurs couches d'information, superposées aux images thermiques composites. Bien que la résolution spatiale de 1km ne soit pas idéale pour l'analyse des climats urbains, on peut voir par exemple que la température du pixel croît ou décroît de 1°C selon qu'il couvre respectivement les cours du Palais du Louvre ou le Jardin des Plantes.

La nuit, les températures les plus élevées, 24 et 25,5°C dans les images de 20-22 TU et de 0-3 TU sont observées dans les arrondissements au sud de la Seine. Cette distribution correspond au pôle de surmortalité au sud de la ville, mise en évidence par les travaux de Cadot et Spira (2006) et Canoui-Poitrine (2006), d'après les sources du Centre d'Epidémiologie sur les Causes Médicales des décès (Institut National de Santé de la Recherche Médicale).

La localisation des secteurs où les températures atteignent des seuils critiques permet d'optimiser les mesures de prévention sanitaires. Ces informations climatiques locales peuvent aider aux décisions : (1) d'interruption du travail physique sur les chantiers de construction ou travaux de voirie et dans les ateliers générant de la chaleur ou qui n'ont pas de système d'air conditionné, particulièrement dans les zones industrielles au nord de Paris où la température de surface atteint 40°C dans l'après-midi ; (2) d'assistance aux personnes âgées qui vivent dans les arrondissement au sud de Paris, où la nuit les températures de surface atteignent 23-25°C, empêchant les personnes de récupérer du stress de chaleur éprouvé dans la journée ; (3) d'avertir les hôpitaux et les maisons de retraite situés à proximité des secteurs les plus chauds.

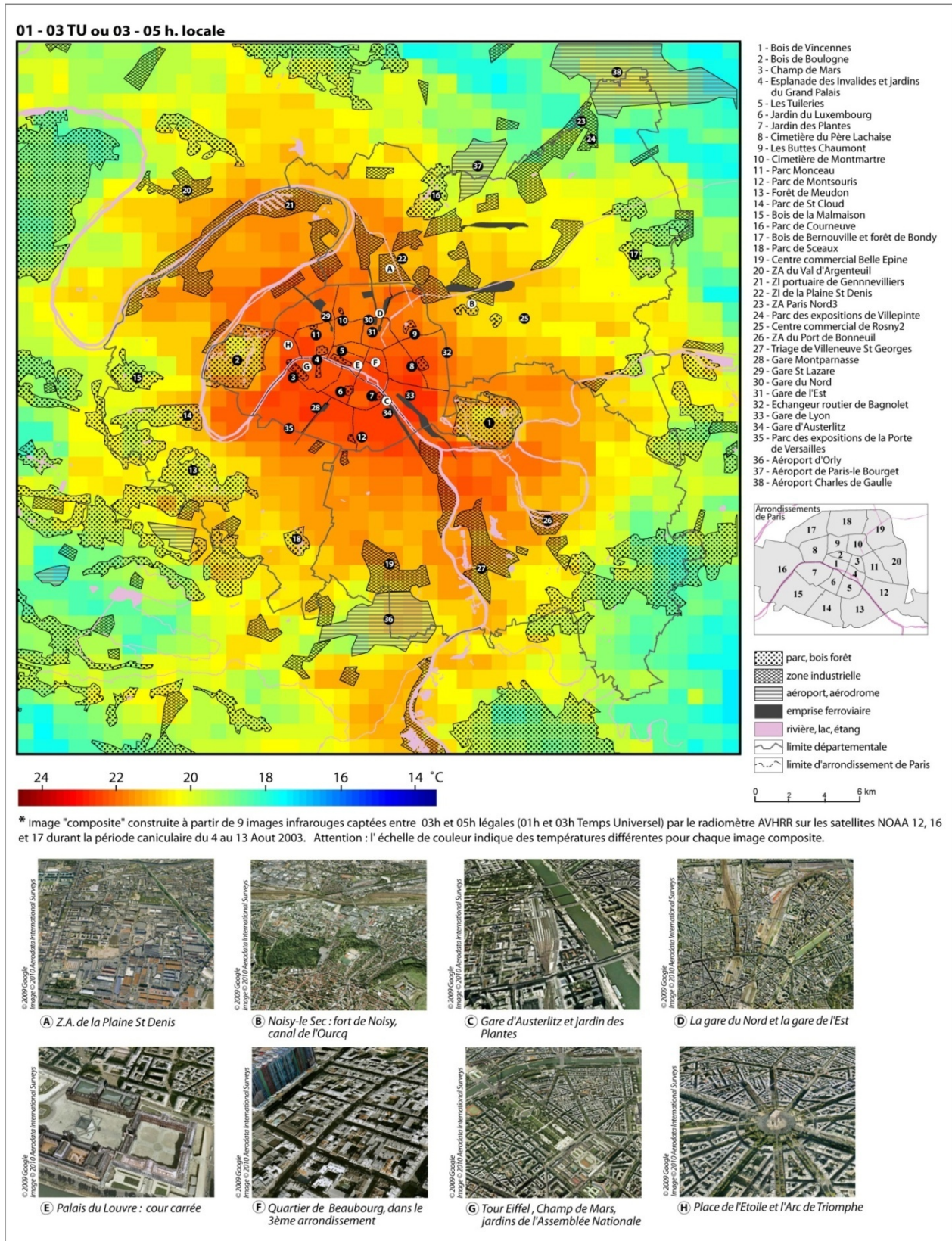


Figure 30. Image thermique de la région parisienne de 01 à 03 TU (03 à 05 heure locale). L'image est construite à partir de 9 images IR NOAA-AVHRR.

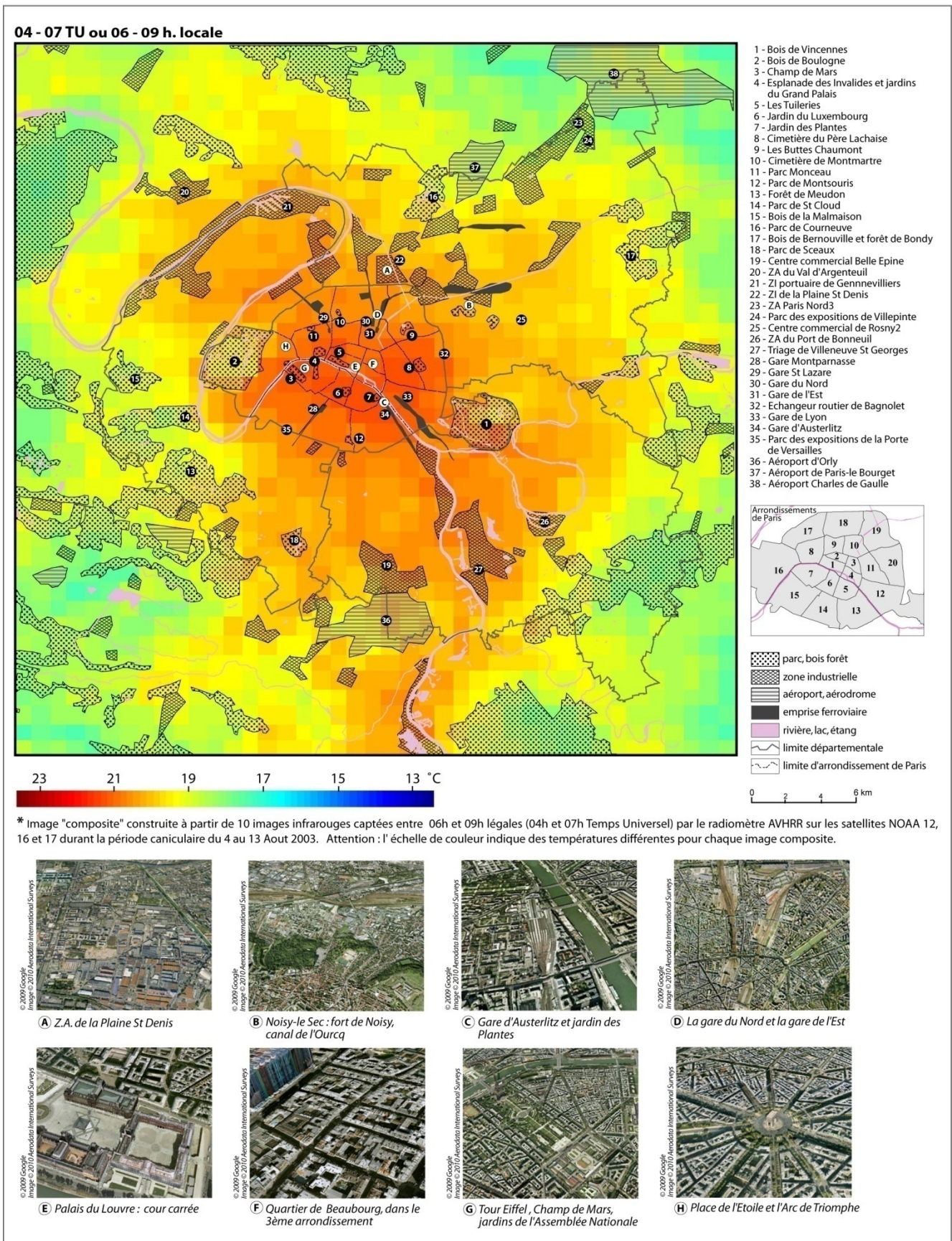


Figure 31. Image thermique de la région parisienne de 04 à 07 TU (06 à 09 heure locale). L'image est construite à partir de 10 images IR NOAA-AVHRR.

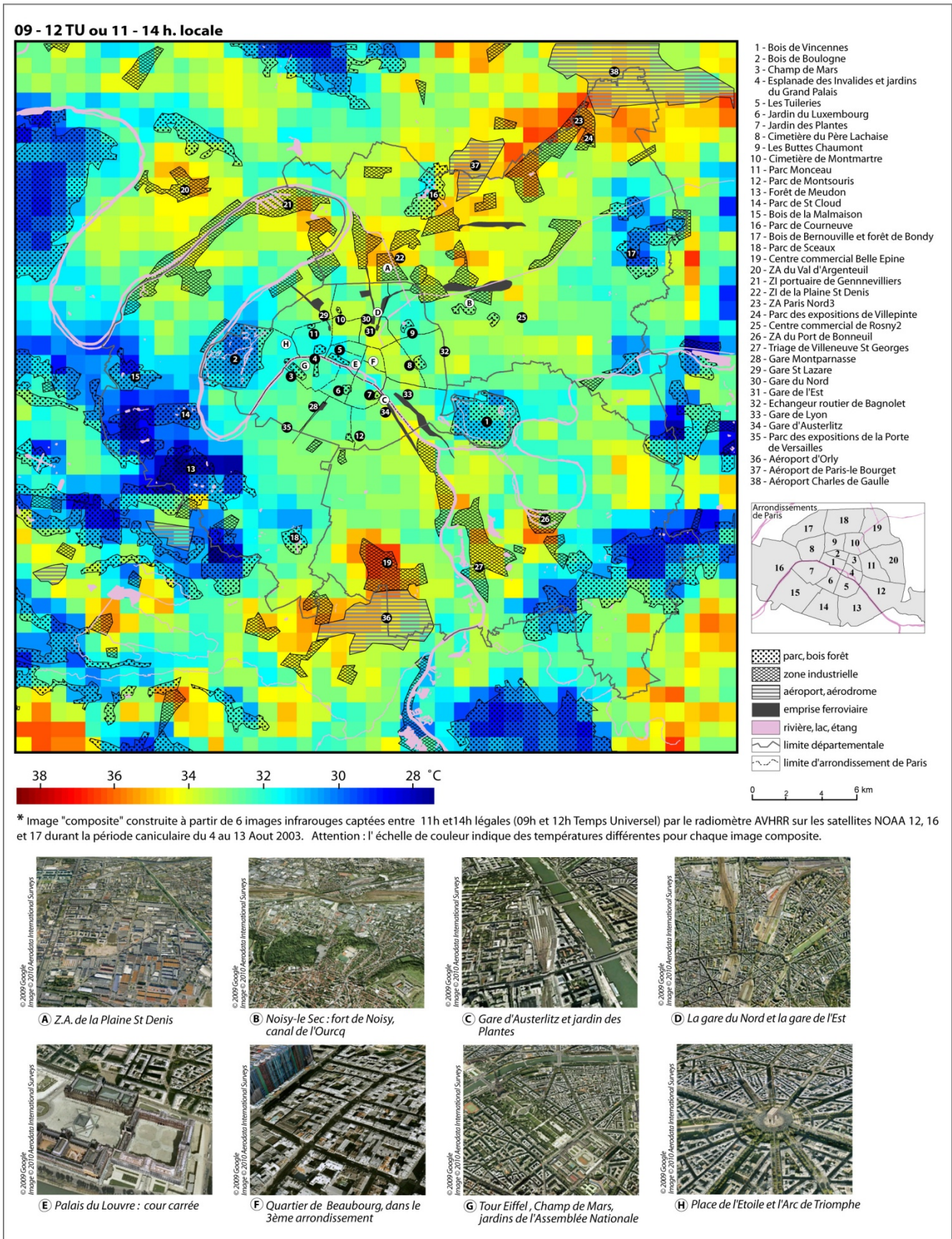


Figure 32. Image thermique de la région parisienne de 09 à 12 TU (11 à 14 heure locale). L'image est construite à partir de 6 images IR NOAA-AVHRR.

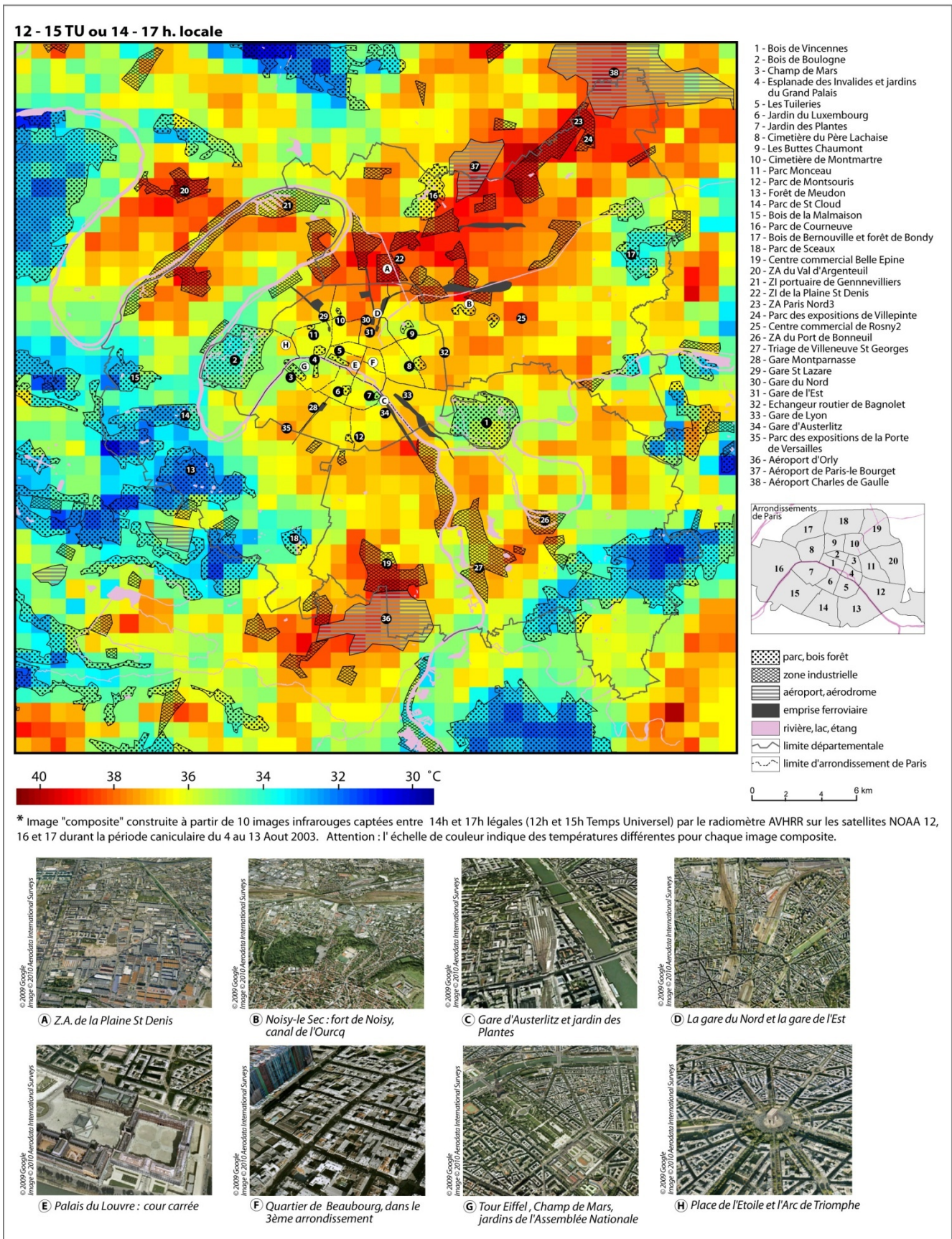


Figure 33. Image thermique de la région parisienne de 12 à 15 TU (14 à 17 heure locale). L'image est construite à partir de 10 images IR NOAA-AVHRR.

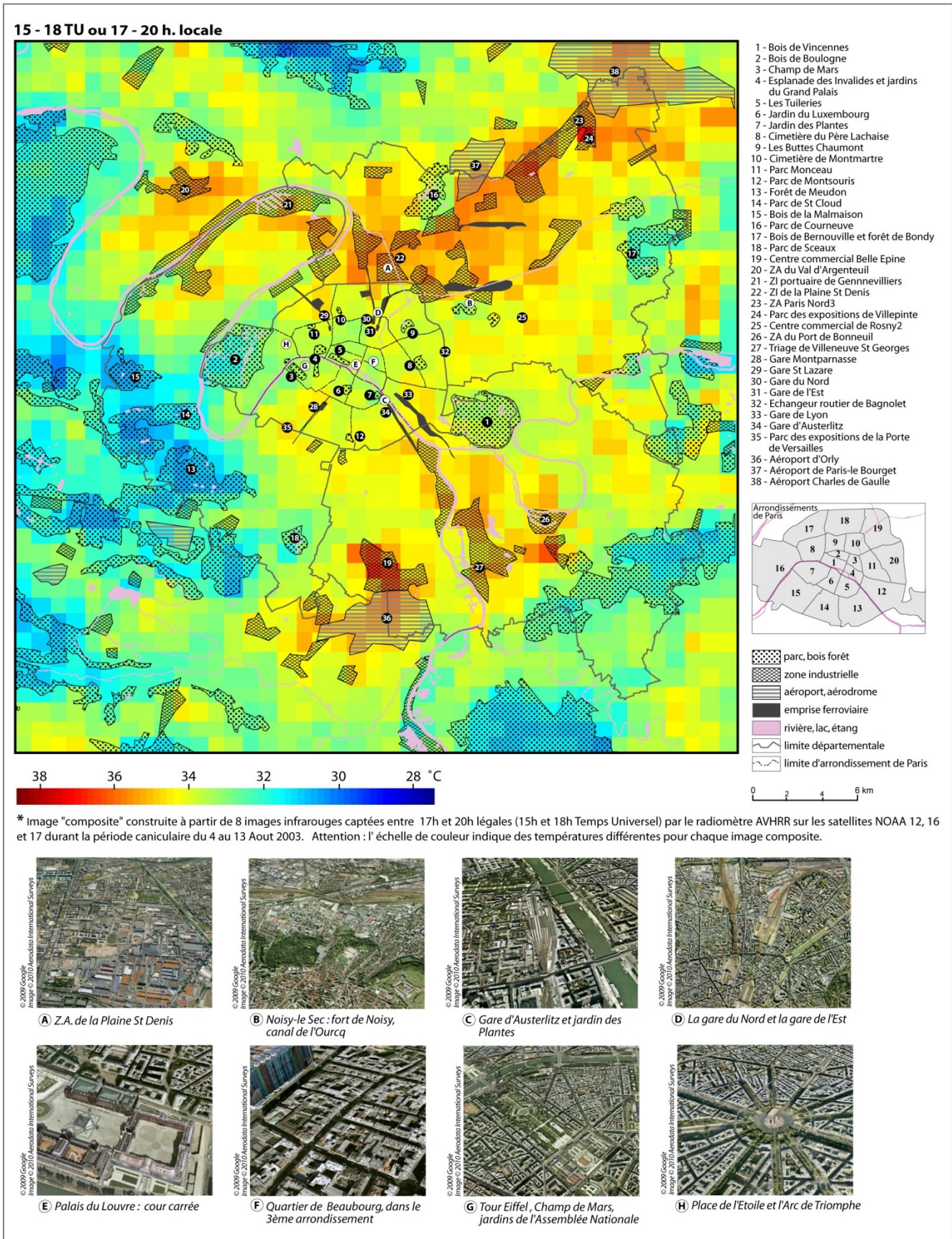


Figure 34. Image thermique de la région parisienne de 15 à 18 TU (17 à 20 heure locale). L'image est construite à partir de 8 images IR NOAA-AVHRR.

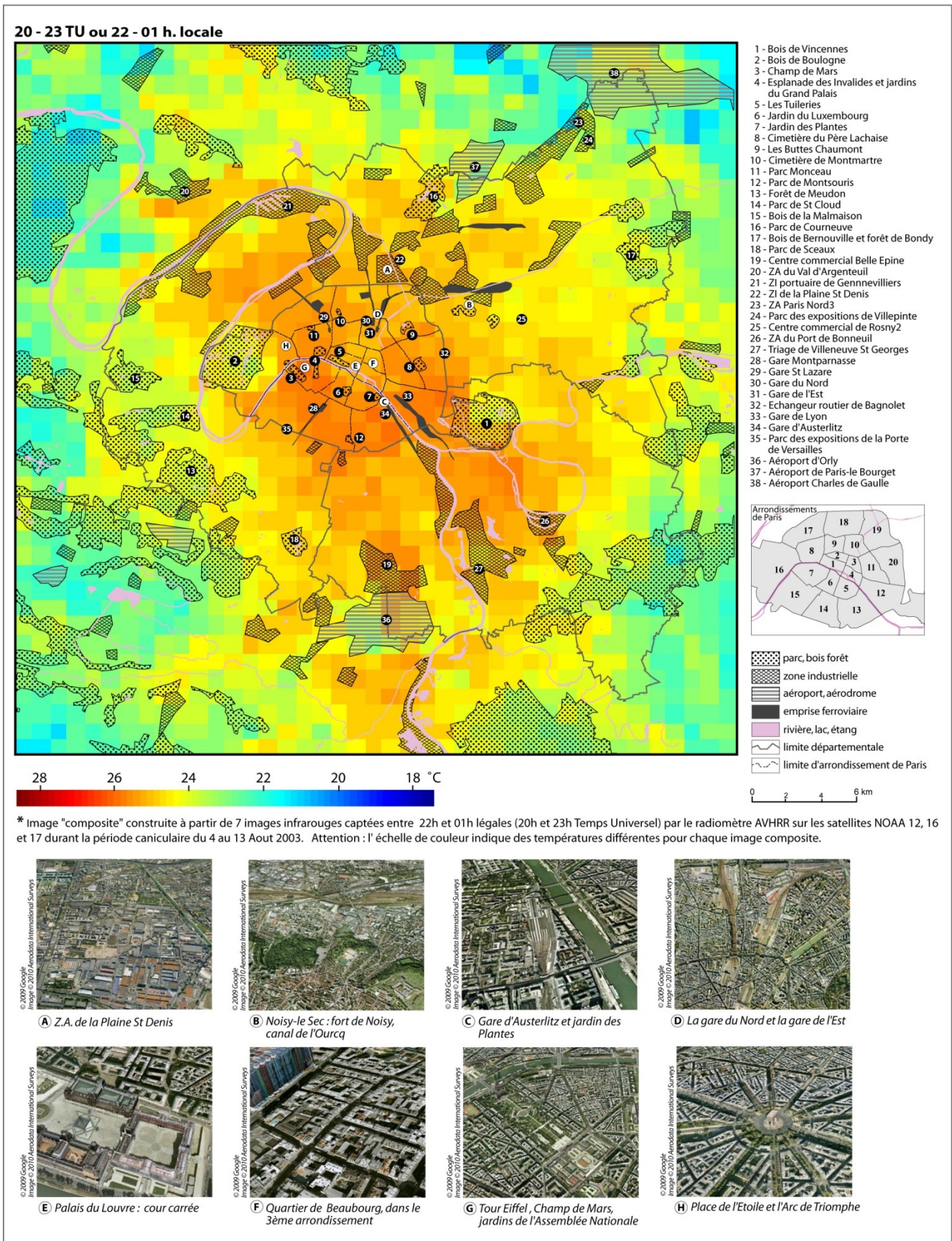


Figure 35. Image thermique de la région parisienne de 20 à 23 TU (22 à 01 heure locale). L'image est construite à partir de 7 images IR NOAA-AVHRR.

5.5. Nouvel indice thermique

Nombre d'observations	Nombre de données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
28838	3456	12,18	45,41	27,28	7,06
25e centile	50e centile	75e centile	90e centile	95e centile	
21,33	25,88	33,99	36,8	38,09	

Tableau 4. Statistiques descriptives de la distribution des températures de surface sur l'ensemble des individus (du 1 au 13 août 2003)

La distribution des températures de surface est présentée dans le tableau 4. Celle-ci varie de 12°C à 45,41°C, avec une médiane de 21,44°C la nuit (entre 20 et 7heures) et de 34,16°C le jour (entre 7 et 20 heures), figures 36a et 36b.

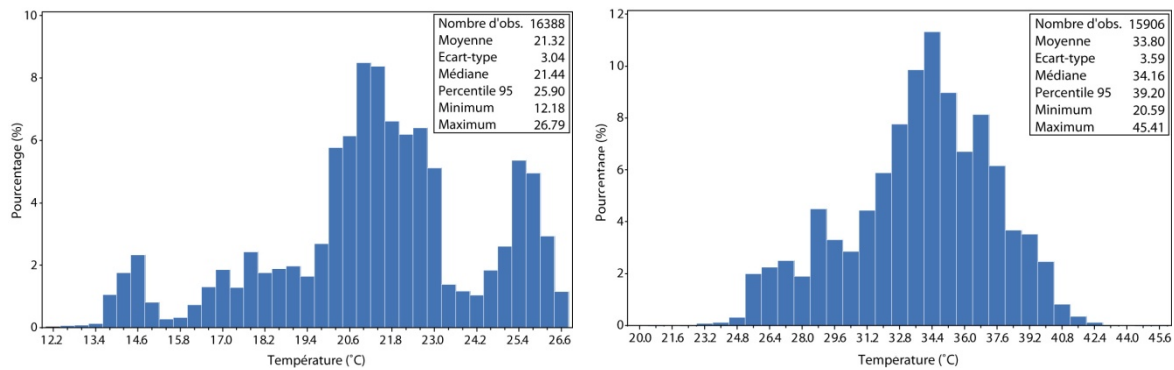


Figure 36. Températures de surface dans les pixels contenant les adresses des cas et des cas témoins; (a) la nuit entre 20h et 7h (b) le jour entre 7h et 20h.

Les figures 37 et 38 présentent les variations journalières de l'indice thermique basé sur les 61 images NOAA-AVHRR du 1er au 13 août (moyenne sur l'ensemble des cas et témoins). La température moyenne linéaire à 31°C est celle de l'image Landsat-TM, à 10:17 TU le 9 août (fig. 37). Les températures maximales et minimales les plus élevées sont observées le 10 août avec un deuxième pic presque aussi important le 4 août (fig. 38).

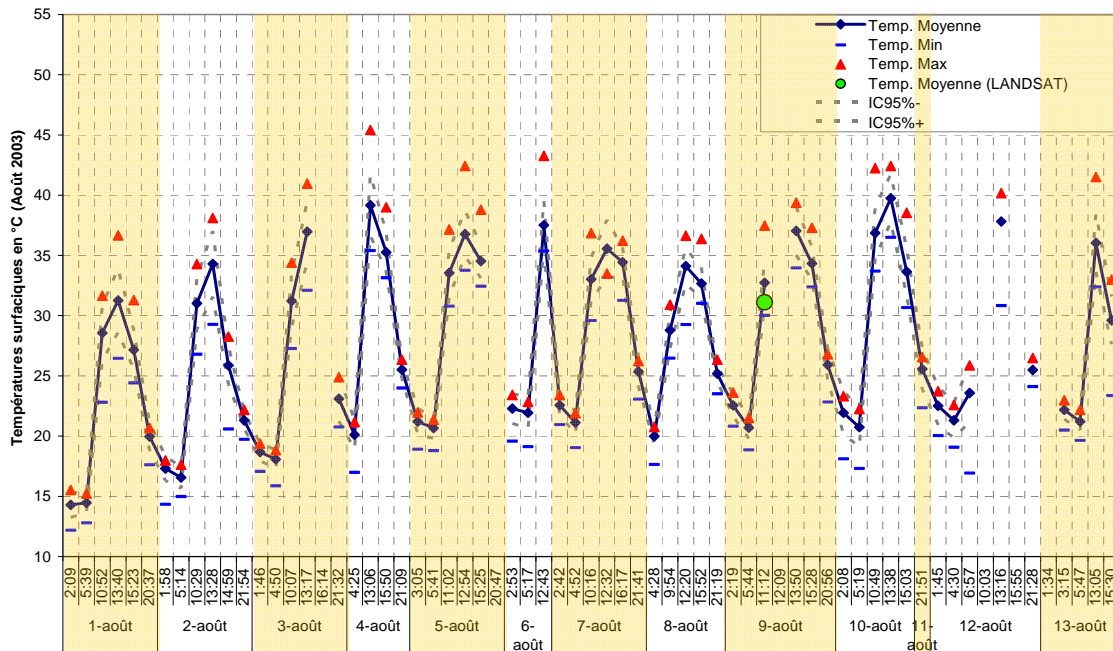


Figure 37. Cycle diurne de l'indice thermique moyenné sur l'ensemble des cas et des témoins (n=481), à partir des images NOAA (1^{er} au 13 août 2003). et d'une image Landsat-TM (9 août 2003, 10h17 TU).

Les données manquantes correspondent à des images nuageuses ou à des images captées avec un angle de visée trop large (fig. 37). Par exemple le creux du 11 août (fig. 38) correspond à un manque de données (une seule image de nuit).

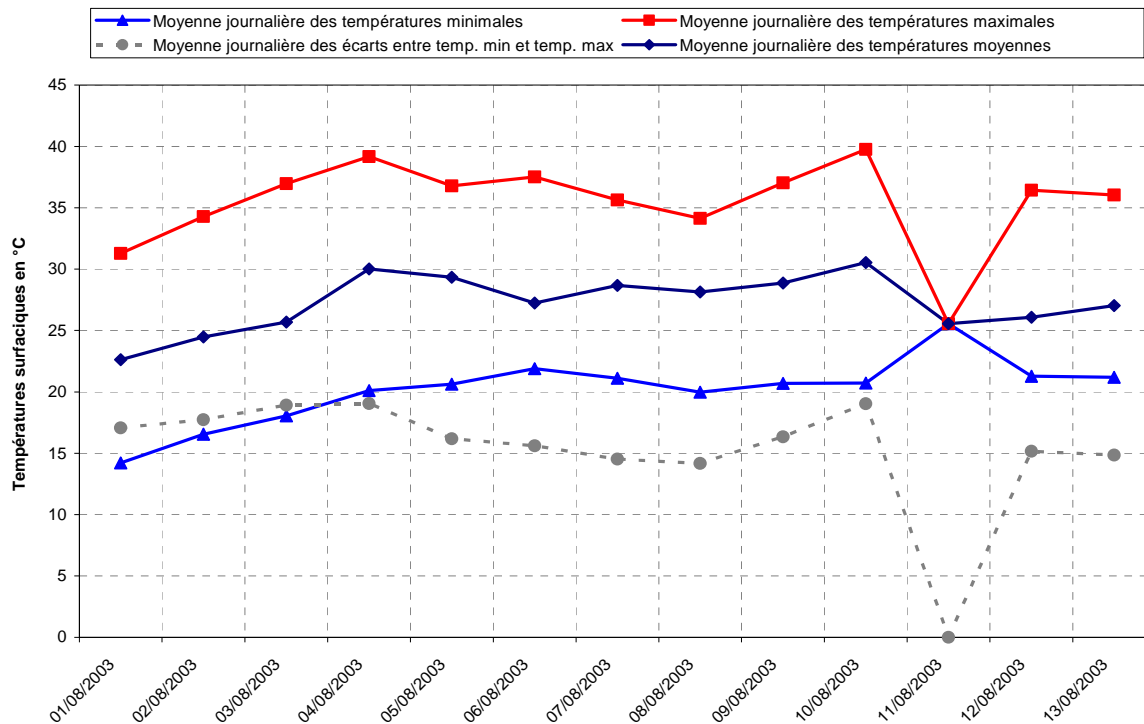


Figure 38. Variations journalières de l'indice thermique basé sur les images NOAAVHRR sur la période du 1er au 13 août 2003 (moyenne sur l'ensemble des cas et témoins).

5.6. Comparaison entre les images Landsat-TM et NOAA-AVHRR du 9 août 2003

Dans la première étude sanitaire l'indice thermique avait été défini par l'IAURIF à partir de l'image Landsat-TM enregistrée le 9 août 2003 à 10:17 TU. Pour estimer les températures moyennes de surface autour des domiciles, les températures de radiance avaient été calées sur les températures de l'air (co-localisées), enregistrées à 10 TU dans 66 stations météorologiques situées dans des parcs ou des aéroports de la région parisienne. La série d'images NOAA-AVHRR, comprend une image enregistrée à 11:20 TU (1 heure après l'image Landsat-TM). Les informations contenues dans l'image Landsat-TM (figure 39a) et dans l'image NOAA-AVHRR (figure 39b) sont complémentaires. Par contre leurs valeurs thermiques ne peuvent en aucun cas être corrélées. En effet, ces images se différencient par leurs résolutions spatiales, par l'heure à laquelle elles ont été enregistrées et par l'angle de visée auquel elles ont été captées.

La résolution spatiale de l'image de Landsat-TM est de 120 m, celle de NOAA-AVHRR de 1.1km. Par exemple la valeur mesurée par Landsat-TM au Parc Montsouris représente la température de surface de la pelouse, des arbres et d'une voie ferrée, tandis que la valeur mesurée par NOAA-AVHRR inclue la Cité universitaire et quelques quartiers d'habitation environnants.

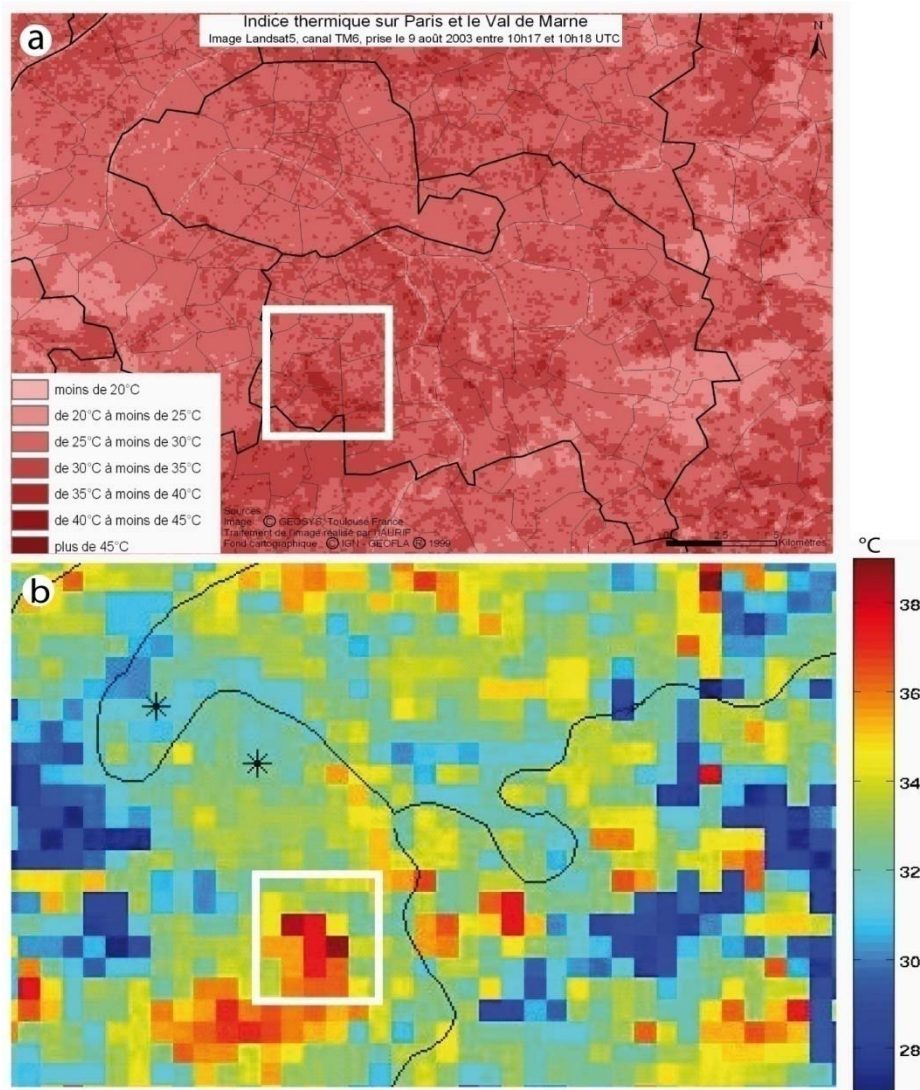


Figure 39. Indices thermiques sur Paris Ile de France et le Val de Marne: **a)** indices Landsat-TM à 200m de résolution à 10:17 TU; **b)** indices NOAA-AVHRR à 1.1 km de résolution à 11.12 TU.

Le carré blanc comprend: pour l'image Landsat-TM 125 pixels et 3 classes de températures comprises entre 25-30°C, 30-35°C, et 35-40°C; et pour l'image NOAA 25 pixels et 10 températures comprises entre 32-39°C. Les températures de l'image NOAA sont plus élevées car elles ne sont pas calées sur celles des stations météorologiques et qu'elles sont captées une heure plus tard.

L'image Landsat-TM a été captée à 10:17 TU, moment de la journée où les effets d'îlots de chaleur sont les plus faibles dans la ville de Paris et la "petite couronne" (températures de surface entre 20 et 30 °C). Cependant, en banlieue sud, les surfaces industrielles de Bonneuil, des gares de triage de Ivry et de Villeneuve St Georges et de l'aéroport d'Orly commencent à s'échauffer (30°C à 35°C).

La température de surface enregistrée au Parc Montsouris à 10:17 TU par Landsat-TM est similaire à la température de l'air dans la station météorologique (30°C). Celle enregistrée à 11:20 TU par le satellite NOAA-AVHRR est de 32.5° C (cf. figure 20). A cette heure de la journée la température s'élève très vite (figures 25b et 25c). Cette différence de 2°C en moyenne se retrouve logiquement entre les indices thermiques basés sur les images Landsat-TM (10h:17) et ceux basés sur les images NOAA-AVHRR (figure 40).

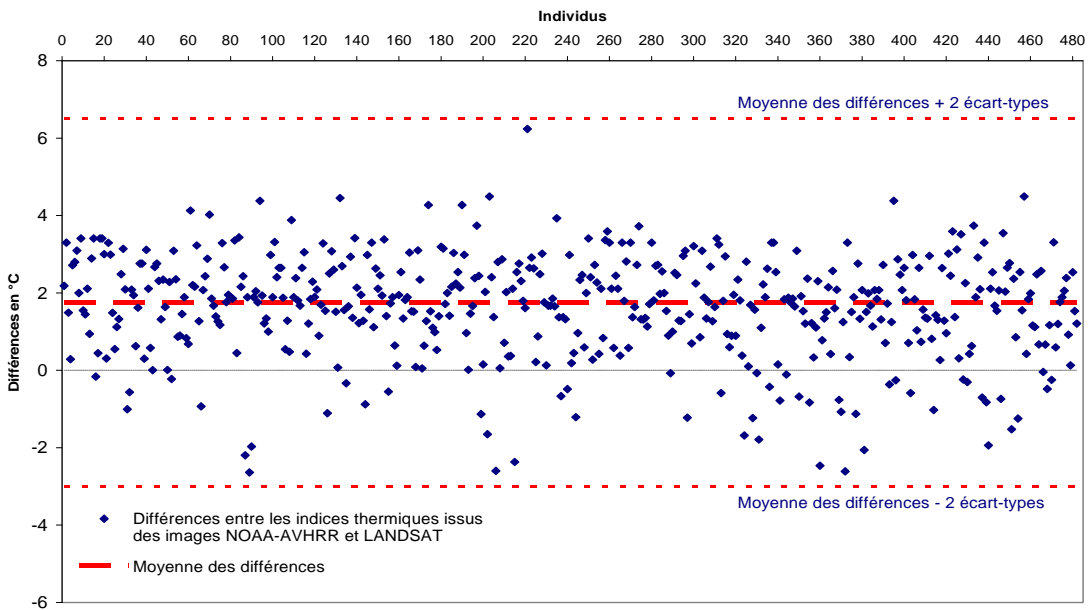


Figure 40. Différences entre les indices thermiques basés sur les images NOAA-AVHRR du 9 août 2003 à 11h12 TU et Landsat-TM du 9 août 2003 à 10h17 TU.

5.7. Différences entre les indices thermiques des cas et des témoins

La figure 41 présente les différences entre les indices thermiques des cas et témoins appariés issus des 61 images NOAA-AVHRR et le tableau 5 présente la distribution de ces différences. Ces différences ont été calculées sur la période du 1^{er} au 13 août 2003 aux plages horaires pour lesquelles les températures de surface sont disponibles (n =14220 paires cas-témoins-jours-heures): ces différences vont de -6,09 à 8,4°C.

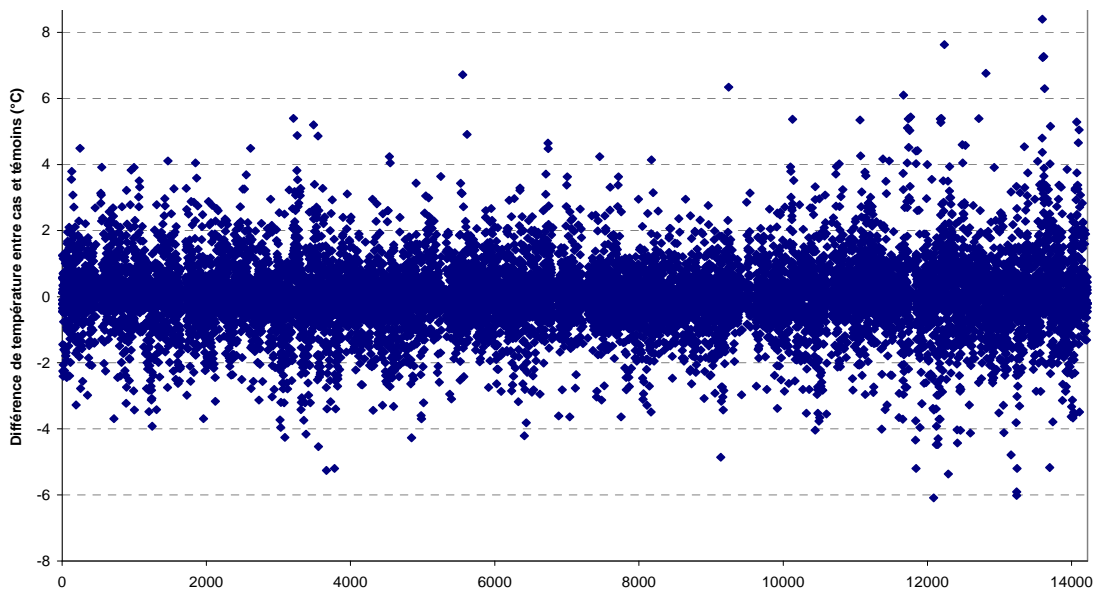


Figure 41. Différences entre les indices thermiques des cas et des témoins appariés issus des images NOAA-AVHRR (période du 1er au 13 août). n=14220

	n	Minimum	p25	p50	p75	p90	p95	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Différences	14220	-6,09	-0,43	0	0,48	1,17	1,7	8,4	0,03	1,03

Tableau 5. Distribution des différences entre les indices thermiques des cas et des témoins appariés, issus des images NOAA-AVHRR.

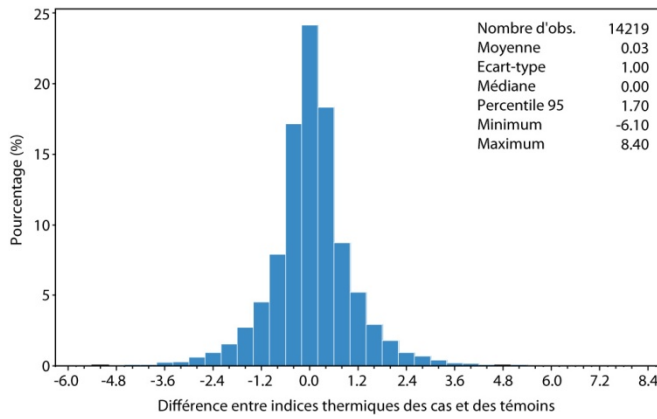


Figure 42. Distribution des différences entre les indices thermiques des cas et des témoins appariés issus des images NOAA-AVHRR (résolution 1 km), période du 1^{er} au 13 août.

Les indices des 21 paires cas-témoins pour lesquelles les différences entre les indices thermiques sont supérieures à 5°C ou inférieures à -5°C ont été vérifiés.

5.8. Assimilation des indices thermiques dans le modèle de Breslow et Day

Le tableau 6 présente les statistiques descriptives des indicateurs d'exposition à la température de surface, construit en utilisant les 61 images NOAA-AVHRR (du 1^{er} au 13 août). La première ligne du tableau concerne l'indice thermique de l'image Landsat-TM, (première étude InVS) les lignes 2 à 21 concernent les indices thermiques des images AVHRR (étude actuelle). Les températures correspondent aux périodes suivantes : jour du décès (0), de la veille (1), des 2 ou 6 jours précédents (02, 06) et du 1^{er} au 13 (1-13). Les indicateurs construits concernent les températures minimales, maximales et moyennes, ainsi que l'écart entre les maximales et les minimales (cf 4.4.2.).

Variable	Nb	Moy.	Écart-type	Min	25e centile	50e centile	75e centile	90e centile	95e centile	Max	Description de la variable
IndTh200	480	31,11	1,28	28,03	30,05	30,65	31,85	33,02	33,98	35,47	indice thermique (9/8/2003)
mean113_temp_max	482	35,43	0,61	33,17	35,16	35,49	35,79	36,10	36,44	37,05	Moyenne des températures maximales du 1-13 août
mean113_temp_min	482	20,15	0,41	18,41	19,96	20,23	20,46	20,59	20,62	20,74	Moyenne des températures minimales du 1-13 août
mean113_max - min	482	15,28	0,69	13,43	14,87	15,16	15,74	16,33	16,52	17,71	Moyenne des températures moyennes du 1-13 août
mean113_temp_mean	482	27,25	0,31	25,85	27,13	27,33	27,46	27,57	27,61	28,00	Moyenne des écarts de températures maxi-mini du 1-13 août
temp_max0	482	34,83	4,73	22,35	34,33	36,17	37,79	39,18	39,79	42,24	Moyenne des températures maximales jours 0 à 2 à partir de la date de décès
temp_min0	482	21,78	1,86	18,07	20,80	21,23	21,83	25,77	25,99	26,56	Moyenne des températures minimales 0-2 jours
ecart_maxmin0	482	13,05	6,27	0,00	13,59	14,93	16,66	18,20	19,36	24,17	Moyenne des températures moyennes 0-2 jours
temp_mean0	482	27,15	1,65	21,64	26,17	26,96	27,95	29,49	30,61	31,83	Moyenne des écarts de températures maxi-mini 0-2 jours
temp_max1	482	33,84	5,83	22,51	26,11	36,59	38,49	39,60	40,29	42,24	Moyenne des températures maximales 0-6 jours
temp_min1	482	22,16	2,28	16,92	20,54	21,30	24,18	25,99	26,22	26,56	Moyenne des températures minimales 0-6 jours
ecart_maxmin1	482	11,68	7,63	0,00	0,00	15,31	17,36	18,63	19,41	23,97	Moyenne des températures moyennes 0-6 jours
temp_mean1	482	27,26	2,10	21,56	25,99	26,89	28,82	30,41	30,83	31,26	Moyenne des écarts de températures maxi-mini 0-6 jours
mean02_temp_max	482	34,08	1,95	28,07	33,22	34,15	35,23	36,52	37,22	38,35	Température maximale de la veille du décès
mean02_temp_min	482	22,10	1,01	19,13	21,25	22,47	22,93	23,12	23,21	23,47	Température minimale de la veille
mean02_max - min	482	11,98	2,56	6,07	10,41	11,51	13,29	15,86	16,91	19,06	Température moyenne de la veille
mean02_temp_mean	482	27,47	1,18	24,37	26,51	27,70	28,40	28,83	29,26	29,89	Ecart de température maxi-mini de la veille
mean06_temp_max	482	35,49	1,09	32,50	34,93	35,36	35,98	37,06	37,54	38,65	Température maximale du jour du décès
mean06_temp_min	482	21,25	0,74	18,63	20,83	21,50	21,83	22,01	22,07	22,21	Température minimale du jour
mean06_max - min	482	14,24	1,54	11,37	13,21	13,71	15,01	16,76	17,29	19,63	Température moyenne du jour
mean06_temp_mean	482	28,06	0,51	26,35	27,79	28,07	28,30	28,69	29,00	29,39	Ecart de température maxi-mini du jour

Tableau 6. Statistiques descriptives des indicateurs d'exposition à la température de surface, construits à partir de 1 image Landsat-TM et 61 images NOAA-AVHRR. Nb = nombre d'adresses ; Mean, Min. et Max. = indices thermiques moyen, minimal et maximal ; max - min = écart entre maximal et minimal.

Les résultats du modèle multivarié pour les différents indicateurs thermiques sont présentés dans le tableau 7. La première ligne rappelle les résultats de 2003 pour l'indice thermique construit à partir de l'image Landsat-TM. Le reste des paramètres estimés concerne les différents indicateurs d'exposition à la température de surface construits à partir des images NOAA-AVHRR. Les lignes surlignées sont celles pour lesquelles les résultats sont significatifs (lignes jaunes, $p < 0,05$) ou à la limite de significativité (ligne orange, $p = 0,08$).

Variable	coefficient	Ecart-type	Khi2	$p > \text{Khi2}$	OR*	IC95%-	IC95%+	Description de la variable
indth200m	0,5128	0,187	7,52	0,01	1,29	1,08	1,55	indice thermique (9/8/2003)
mean113_temp_max	0,2587	0,393	0,43	0,51	1,14	0,77	1,67	Moyenne des températures maximales du 1-13 août
mean113_temp_min	1,88438	0,80324	5,5	0,02	2,57	1,17	5,64	Moyenne des températures minimales du 1-13 août
mean113_temp_mean	1,45899	0,83515	3,05	0,08	2,07	0,91	4,70	Moyenne des températures moyennes du 1-13 août
mean113_ecart_maxmin	-0,206	0,37552	0,3	0,58	0,90	0,62	1,30	Moyenne des écarts de températures maxi-mini du 1-13 août
mean02_temp_max	-0,0755	0,19714	0,15	0,70	0,96	0,79	1,17	Moyenne des températures maximales jours 0 à 2 à partir de la date de décès
mean02_temp_min	0,49378	0,54914	0,81	0,37	1,28	0,75	2,19	Moyenne des températures minimales 0-2 jours
mean02_temp_mean	0,08802	0,43753	0,04	0,84	1,04	0,68	1,60	Moyenne des températures moyennes 0-2 jours
mean02_ecart_maxmin	-0,14	0,19731	0,5	0,48	0,93	0,77	1,13	Moyenne des écarts de températures maxi-mini 0-2 jours
mean06_temp_max	-0,0807	0,33262	0,06	0,81	0,96	0,69	1,33	Moyenne des températures maximales 0-6 jours
mean06_temp_min	1,59913	0,78637	4,14	0,04	2,22	1,03	4,81	Moyenne des températures minimales 0-6 jours
mean06_temp_mean	0,63371	0,70082	0,82	0,37	1,37	0,69	2,73	Moyenne des températures moyennes 0-6 jours
mean06_ecart_maxmin	-0,3671	0,32301	1,29	0,26	0,83	0,61	1,14	Moyenne des écarts de températures maxi-mini 0-6 jours
temp_max1	0,03087	0,10218	0,09	0,76	1,02	0,92	1,12	Température maximale de la veille du décès
temp_min1	0,18519	0,31087	0,35	0,55	1,10	0,81	1,49	Température minimale de la veille
temp_mean1	0,36712	0,27979	1,72	0,19	1,20	0,91	1,58	Température moyenne de la veille
ecart_maxmin1	0,00987	0,10481	0,01	0,93	1,00	0,91	1,11	Ecart de température maxi-mini de la veille
temp_max0	-0,0845	0,10481	0,65	0,42	0,96	0,87	1,06	Température maximale du jour du décès
temp_min0	-0,2067	0,40893	0,26	0,61	0,90	0,60	1,35	Température minimale du jour
temp_mean0	-0,3686	0,24357	2,29	0,13	0,83	0,66	1,06	Température moyenne du jour
ecart_maxmin0	-0,0717	0,10503	0,47	0,49	0,96	0,87	1,07	Ecart de température maxi-mini du jour

* Odds ratio pour 0,5°C de différence entre cas et témoins

Tableau 7. Résultats du modèle multivarié

Les résultats concernent un écart de température de 0,5°C entre cas et témoins. Cet écart est déjà relativement élevé, dans la mesure où la distribution des différences est peu étendue, avec une moyenne à 0,03°C et un percentile 80 à 0,5°C. Ils sont significatifs pour les indicateurs d'exposition à la température minimale, et à la limite de significativité pour l'indicateur d'exposition à la moyenne des températures moyennes du 1^{er} au 13 août. Ainsi, l'odds ratio est de 2,22 avec un Intervalle de Confiance (IC) de 95% (1,03 - 4,81), pour la température minimale moyennée sur la période comprise entre le jour du décès et les 6 jours précédents avec un écart de 0,5°C entre cas et témoins. Ceci correspond à une mortalité multipliée par 2,22. Pour la température minimale

moyennée sur la période du 1^{er} au 13 août, le risque relatif est de 2,57 (IC 1,17-5,64), ce qui correspond à une mortalité multipliée par 2,57.

Les principaux biais susceptibles d'influencer les résultats dans cette étude sont essentiellement des biais de sélection. Ils sont décrits dans le rapport publié par l'InVS (Ledrans *et al.*, 2005). Ils concernent la définition des cas, peu spécifiques ; la non prise en compte des personnes résidant dans les communes de l'étude mais décédées en dehors de ces communes ; la sélection des témoins, dans la mesure où les personnes qui ont répondu au recrutement téléphonique et accepté de participer étaient les plus aptes à répondre et les plus motivées. Quelques biais d'information ont pu influencer dans une moindre mesure : le statut de cas et de témoin était connu de l'enquêté et de l'enquêteur, ce qui a pu influencer sur certaines réponses, de même que les modalités de l'interview ou le degré de parenté avec les cas. Les biais de confusion ont été minimisés par la qualité de l'appariement, notamment sur l'âge. Les cas étant malgré cela souvent plus âgés que les témoins, un ajustement supplémentaire sur l'âge dans les modèles a permis de tenir compte de l'effet résiduel de l'âge sur la mortalité.

Par ailleurs il est possible que pour certaines paires, le cas et le témoin soient situés dans le même pixel, et qu'il leur soit donc attribué la même température de surface. La solution pour réduire ce biais aurait été de désappairer les cas et les témoins sur la zone, mais le risque aurait alors été de comparer des personnes issues de zones socio-économiques très différentes.

6. Synthèse des résultats et discussion

La finalité du projet était de mieux comprendre l'incidence et l'intensité des canicules en milieux urbains et leur impact sanitaire pour mieux anticiper et gérer les risques face à la récurrence des événements de chaleur extrême engendrée par le réchauffement des étés en Europe occidentale. Les objectifs de cette étude étaient (i) de mieux appréhender la variation spatio-temporelle des températures de surface dans la région parisienne en fonction de l'occupation du sol et des caractéristiques physiques des surfaces ; (ii) de détecter les secteurs ayant des seuils critiques de température; (iii) de produire de nouveaux indices thermiques pour définir un indicateur plus représentatif des risques sanitaires; et (iiii) d'élaborer une méthodologie d'intégration des données satellitaires à l'étude et à la gestion de l'impact sanitaire des vagues de chaleur dans les grandes agglomérations urbaines.

Les observations satellitaires ont démontré : le contraste entre la distribution des îlots de chaleur de jour et de nuit, en relation avec l'occupation du sol et l'inertie thermique des surfaces; l'atténuation de la chaleur par la végétation; l'impact des températures nocturnes élevées sur l'intensité de la canicule; la variation spatio-temporelle des îlots de chaleur et des seuils critiques de température; l'importance des températures nocturnes et de la durée des canicules sur les risques sanitaires.

La continuité spatiale des images satellitaires révèle le contraste entre la distribution des îlots de chaleur de jour et de nuit, qui ne peut être perçue par quelques stations météorologiques situées dans des parcs ou des aéroports. La nuit, un îlot de chaleur d'une magnitude de 6°C à 8°C est centré sur la ville, le jour, de nombreuses anomalies thermiques sont dispersées dans les quartiers densément bâtis et/ou industriels de la banlieue. Les propriétés physiques des matériaux de surfaces génèrent des micro-climats distincts. Par exemple, les températures de surface sont toujours plus fraîches dans le 16^{ème} arrondissement où l'albédo et la capacité thermique des surfaces sont plus élevés que dans d'autres quartiers caractérisés par des surfaces à plus faible inertie thermique. Il est maintenant possible, lors de la réhabilitation d'un ancien quartier ou de la planification d'un nouveau, de prévoir des matériaux de surface réfléchissants et/ ou des surfaces végétales afin de réduire les îlots de chaleur. L'efficacité des différentes options et leur impact saisonnier étés / hivers, peuvent être modélisés en tenant compte de la morphologie urbaine, de l'occupation des sols, du climat régional, de la circulation atmosphérique locale et du changement climatique potentiel des prochaines décades.

L'indice de végétation d'août 2003, plus faible que celui des étés normaux, reflète la sécheresse et la réduction de la productivité primaire, occasionnée par un déficit de précipitation et une radiation incidente plus importants que la normale durant les 6 mois précédant la canicule. Cependant la corrélation inverse entre l'indice de végétation de la région parisienne et la température de surface de l'après-midi, montre que lorsque l'indice de végétation augmente de 5%, la température diminue de 1°C. Des résultats similaires ont été obtenus pour un scénario de développement du Grand Paris (Masson, 2010). Dans ce scénario, les flux d'énergie de surface en région parisienne ont été simulés avec un modèle de balance énergétique urbaine (Masson, 2000). Pour un accroissement de 30% des forêts autour de Paris, des retenues d'eau ainsi que des revêtements réfléchissants sur les toits et les routes, l'îlot de chaleur nocturne diminuerait de 1°C à 2°C dans Paris, et de plus de 3°C dans certaines zones péri-urbaines. Il faut noter ici que lorsque la température de l'air dépasse 35°C, la végétation relâche plus d'isoprène et agit comme catalyseur dans la réaction photochimique, augmentant la production d'ozone (Lewis et al, 2000). Cependant l'importance de ce phénomène temporaire est moindre comparé à l'atténuation de la chaleur sensible par évapo-transpiration due à la végétation.

La comparaison du cycle diurne de température de surface de la première quinzaine d'août 1998 avec celles de 2003, indique pour cette dernière une amplitude jour/nuit plus faible et des températures minimales plus élevées, confirmant le rôle des températures nocturnes sur la

formation des vagues de chaleur. De fait, les îlots de chaleur intensifient la canicule en absorbant progressivement la chaleur durant le jour, augmentant les températures nocturnes, cause de mortalité. Par exemple, les 500 cas de surmortalité en région parisienne les 11 et 12 août, furent probablement liés à la température minimale qui a atteint 25,7°C les nuits du 10 et 11 août, privant les personnes vulnérables d'un repos récupérateur, après la fatigue accumulée pendant les fortes chaleurs de la journée.

La localisation des secteurs où les températures atteignent des seuils critiques permet d'optimiser des mesures de prévention sanitaires, telles que l'interruption du travail dans les zones industrielles au nord de Paris et l'assistance aux personnes âgées qui vivent dans les arrondissements au sud de Paris, où les températures nocturnes élevées empêchent la récupération du stress de chaleur éprouvé dans la journée.

Les nouveaux indices thermiques, extraits des images satellitaires, sont significatifs pour les indicateurs d'exposition à la température minimale, et dans une moindre mesure pour l'indicateur d'exposition à la moyenne des températures moyennes du 1^{er} au 13 août. Ainsi, l'odds ratio est de 2,22 pour la température minimale moyennée sur la période comprise entre le jour du décès et les 6 jours précédents. Pour la température minimale moyennée sur la période du 1^{er} au 13 août, le risque relatif est de 2,57. Ces résultats démontrent la prédominance des températures minimales (nocturne) et le doublement du risque de mortalité pour une augmentation de 0.5°C (dans la marge de température de la canicule).

L'impact des îlots de chaleur sur le stress de chaleur est reconnu et la variabilité des taux de mortalité au sein d'une même ville en période caniculaire a été étudiée (Canoui-Poitrine et al., 2006). Quelques études (Vandentorren et al., 2006; Johnson et al., 2009) ont intégré les facteurs sociaux ou sanitaires aux données thermiques dérivées d'une image Landsat TM. Ici, l'originalité du projet tient dans un jeu de données exceptionnel permettant l'analyse conjointe et co-localisée d'une série de 61 images thermiques et d'une étude de cas de mortalité de personnes âgées, sur une période continue de 13 jours. Les statistiques (> 28000 données) ont permis d'estimer en un lieu donné, l'impact relatif d'exposition, ainsi que l'intervalle de temps entre l'exposition et le décès. Les résultats montrent qu'il est possible d'anticiper les risques sanitaires non seulement en termes de probabilité, mais aussi en termes de temps, lieu et magnitude de l'impact.

Le potentiel de la télédétection thermique en milieu urbain est encore sous-estimé : cela provient du fait que la haute résolution temporelle et spatiale des acquisitions est mutuellement exclusive. L'usage des multi-capteurs et la fusion d'images permet de résoudre certains problèmes de résolution spatiale. Les travaux de ces dernières années contribuent à la définition et au développement d'un capteur thermique à très haute résolution actuellement à l'étude, et qui serait placé sur plusieurs satellites améliorant la périodicité des acquisitions.

Comme nous l'avons vu dans ce projet, la télédétection est décisive pour la compréhension fine des phénomènes physiques et de leur impact sanitaire en milieu urbain, en période de canicule. Les données satellitaires peuvent être assimilées aux modèles énergétiques et aux modèles de couche limite urbaine. La méthodologie satellitaire utilisée dans cette étude peut être appliquée à d'autres métropoles en tenant compte de leur situation géographique et de la résolution des capteurs disponibles.

L'impact des événements de chaleur extrême, est un problème majeur en Europe compte tenu du réchauffement des étés, de l'augmentation de l'incidence, de la durée et de l'intensité des canicules, de l'accroissement et du vieillissement de la population urbaine (qui entraîne une plus grande vulnérabilité sociale et physiologique). En effet les décès dus à la chaleur sont plus fréquents dans les grandes agglomérations. En France en 2003 l'excès de mortalité fut de 40% dans les petites villes mais de 80% à Lyon et 141 % à Paris (Vandentorren et al., 2004). Une canicule analogue au nord est des Etats Unis, aurait abouti à un taux de mortalité de 150 % à New York city

(Kalstein et al., 2008). En juillet-août 2010 dans la région de Moscou, les températures extrêmes et la fumée âcre et nocive des feux de tourbières ont causé un excès de mortalité de 50% (Ministère russe de la Santé). Le degré de vulnérabilité des villes aux canicules est donc très élevé, tant sur le plan humain, qu'économique et environnemental.

Les mesures d'atténuation des changements climatiques ne seront pas effectives avant plusieurs décades, il faut dès à présent être capable de s'adapter à la récurrence des vagues de chaleur engendrées par le réchauffement des étés notamment en Europe. La gestion de la résilience urbaine aux vagues de chaleur repose sur la prédiction de leurs effets, prédiction qui nécessite la compréhension préalable de l'évolution du climat régional et des variations spatio-temporelles des températures extrêmes à l'échelle locale. Comme nous l'avons démontré ici, la surveillance satellitaire s'avère un outil extrêmement efficace pour analyser les variations de température à la surface urbaine et anticiper et gérer les risques sanitaires, permettant d'évaluer ceux-ci non seulement en termes de probabilité mais également, et pour la première fois, en termes de temps, lieu et magnitude.

7. Références bibliographiques

- Adelf. Déontologie et bonnes pratiques en épidémiologie. 2003. 32 p.
- Ballester F, Corella D, Perez-Hoyos S, Saez M, Hervas A. Mortality as a function of temperature. A study in Valencia, Spain, 1991-1993. *International Journal of Epidemiology* 1997;**26**(3):551-61.
- Becker F, Li ZL. 1995. Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurements and related problems. *Remote Sensing Reviews* **12**: 225-253.
- Beniston M, Stephenson DB, Christensen OB, Ferro CAT, Frei C, Goyette S, Halsnaes K, Holt T, Jylhä K, Koffi B, Palutikof J, Schöll R, Semmler T, Woth K. 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climate Change* **81**: 71-95.
- Besancenot JP. 2002. Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement, risques et santé*; **1**(4):229-40.
- Breslow NE, Day NE. 1980. Statistical Methods in Cancer Research. Vol. 1 The Analysis of Case Control Studies. *IARC Scientific Publication* **32**.
- Bessemoulin P, Bourdetee N, Courtier P. 2004. La canicule d'août 2003 en France et en Europe. *La Météorologie*. **46**: 25-33.
- Bretin. P, Vandentorren S, Zeghnoun A, Ledrans M. 2004. Étude des facteurs de décès des personnes âgées résidant à domicile durant la vague de chaleur d'août 2003. Institut de veille sanitaire. 165 p.
- Cadot E, Spira A. 2006. Heat Wave and Excess Mortality in Paris in August 2003, the Impact of the Socio-economic Factors. *Space populations societies*, 2-3: 239-249
- Canoui-Poitrine F, Cadot E, Spira A, 2006. Excess deaths during the August 2003 heat wave in Paris, France. *Rev Epidemiol Sante Publique* **54** : 127-135
- Caselles V, Lopez Garcia MJ, Melia J, Perez Cueva AJ. 1991. Analysis of the heat-island effect of the city of Valencia, Spain through air temperature transects and NOAA satellite data. *Theoretical and Applied Climatology*, **43**, 195-203.
- Cheval S, Dumitrescu A, Bell A. 2009. The urban heat island of Bucharest during the extreme high temperatures of July 2007. *Theoretical and Applied Climatology*, **97**: (3-4) 391-401.
- Chysoulakis N, 2003. Estimation of the all-wave urban surface radiation balance by use of ASTER multispectral imagery and in situ spatial data, *Journal of Geophysical Research*, 108, D18, 4582.
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogée J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend AD, Friedlingstein P, Grünwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival JM, Papale D, Pilegard K, Rambal S, Seufert G, Soussana JF, Sanz MJ, Schulze ED, Vesala T, Valentini R, 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* **437**: 529-533.
- Dash P, Göttsche FM, Olesen FS, Fischer H. 2002. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice—current trends. *International Journal of Remote Sensing* **23** (13): 2563-2594.
- Dousset B, 1989. AVHRR-derived cloudiness and surface temperature patterns over the Los Angeles area and their relationship to land use", in *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium -1989*, pp. 2132-2137, I.E.E.E.

- Dousset B, Gourmelon F. 2003. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and land cover, *ISPRS Journal of Photogrammetry*. **58**: 43-54.
- Dousset B, Gourmelon F, Mauri E. 2007. Application of satellite Remote Sensing for Urban Risk Analysis: a case study of the 2003 extreme heat wave in Paris. *Urban Remote Sensing Joint Event*, 2007 Vol. Issue, 11-13 April 2007 pp1-5. doi:10.1109/URS.2007.371849.
- Dousset B, Flament P, Bernstein R. 1993. Los Angeles fires seen from space. *EOS, Transactions of American Geophysical Union* **74**: 33, 37-38.
- Dozier J. 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sensing of Environment* **11**: 221-229.
- Filleul L, Cassadou S, Medina S, Fabres P, Lefranc A, Eilstein D, Le Tertre A, Pascal L, Chardon B, Blanchard M, Declercq C, Jusot JF, Prouvost H, Ledrans M. 2006. The relation between temperature, ozone, and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003. *Environmental Health Perspectives* **114** (9):1344-7.
- Fischer EM, Seneviratne SI, Vidale PL, Lüthi D, Schär C. 2007. Soil Moisture—Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave. *Journal of Climate* **20**: 5081-5099.
- Gallo KP, Tarpley JD, McNab AL, Karl, TR. 1995. Assessment of urban heat island: A satellite perspective. *Atmospheric Research*, **37**, 37-43.
- Gustafson WT, Gillespie AR, Yamada GJ. 2006. Revisions to the ASTER temperature/emissivity separation algorithm, *2nd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing* Global Change Unit, Univ. of Valencia, Torrent, Spain.
- Hémon D, Jouglu E. 2003. Surmortalité liée à la canicule d'août 2003. Rapport d'étape. Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques. Inserm, 59 p.
- IAURIF, INSEE. Atlas des franciliens. tome 2, 81. 2001.
- IAURIF, INSEE. Atlas des franciliens. tome 1, 97. 2000.
- Institut de veille sanitaire. Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 en France. *Bilan et perspectives* Octobre 2003. 120 p.
- Johnson D, Wilson JS, Luber GC. 2009. Socioeconomic indicators of heat-related health risk supplemented with remotely sensed data. *International Journal of Health Geographics* **8**: 57
- Kalkstein, L.S., P.F. Jamason, J.S. Greene, J. Libby and L. Robinson. 1996. The Philadelphia Hot Weather-Health Watch/Warning System: Development and Application, Summer 1995. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**(7):1519-1528.
- Kalkstein LS, Green JS. 1997. An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S cities and the possible impacts of climate change. *Environmental Health Perspectives* **105**: 84-93.
- Kalkstein LS, Greene JS, Mills DM, Perrin AD, Samenow JP, Cohen JC. 2008. Analog European heat waves for U.S. cities to analyze impacts on heat-related mortality. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **89**: 75-85.
- Kalnay E, Cai M, Li H, Tobin J. 2006. Estimation of the impact of land-surface forcings on temperature trends in eastern United States, *Journal of Geophysical Research*, **111**.
- Kato S, Yamaguchi Y. 2005. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment* **99**: 44-54.
- Laaidi K, Pascal M, Ledrans M, Le Tertre A, Medina S, Caserio-Schonemann C, et al. Le système français d'alerte canicule et santé 2004 (Sacs 2004). Un dispositif intégré au Plan National Canicule. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire* 2004; 30-31:134-6.

- Laaidi K, Pascal M, Empereur-Bissonnet P, Bretin P, Vandentorren S, Zeghnoun A, Lorente C, Cassadou S, Le Tertre A, Medina S, Baffert E, Rudant J, Sérazin C, Lauzeille D, Tillaut H, Salines G, Lefranc A, Declercq C, Eilstein D, Pascal L, D'Helf M, Filleul L, Jusot JF, Chardon B, Fabre P, Prouvost H, Ledrans M. 2005. Canicule. Bilan des études réalisées par l'Institut de Veille Sanitaire et mise en place d'un système d'alerte. *La Presse Thermale et Climatique*; 142:55-67.
- Laaidi K, Pascal M, Bérat B, Strauss B, Ledrans M, Empereur-Bissonnet P. Système d'alerte canicule et santé 2006 (Sacs 2006) Rapport opérationnel. 2006. 46 p.
- Lagouarde JP, Moreau P, Irvine M, Bonnefond JM, Voogt JA, Sollicec F. 2004. Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseilles (France). *Remote Sensing of Environment* **93**: 443-462.
- Ledrans M, Vandentorren S, Bretin P, Croisier A, 2005. Etude des facteurs de risque de décès des personnes âgées résidant à domicile durant la vague de chaleur d'août 2003. *Rapport de l'Institut national de Veille Sanitaire*. pp.1-116, ISBN: 2-11-09, 4963-5.
- Lee HY, 1993. An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands. *Atmospheric Environment*, 27B, 1-13.
- Lorente C, Sérazin C, Salines G, Adonias G, Gourvellec G, Lauzeille D, et al. 2005. Étude des facteurs de risque de décès des personnes âgées résidant en établissement durant la vague de chaleur d'août 2003. Institut de veille sanitaire; 143 p.
- Lewis AC, Carslaw N, Marriott PJ, Russel M, Kinghorn M, Morrison P, Lee AL, Bartle KD, Pilling MJ. 2000. A Larger Pool of Ozone-Forming Carbon Compounds in Urban Atmosphere. *Nature* **405**: 778-781.
- Masson V. 2000. A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, **94**, 357-397.
- Masson V. 2010. Meteo Magazine no 9.
- McClain EP, Pichel WG, Walton CC. 1985. Comparative performance of AVHRR based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*; **90**(C6):11587-601.
- Meelh GA, Tebaldi C. 2004. More Intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, **305**: 5686, 994-997.
- Michelozzi P, de' Donato F, Accetta G, Forastiere F, D'Ovidio M, Perucci CA, Kalkstein L. 2004 May. Impact of heat waves on mortality – Rome, Italy, June-August 2003. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep.* 7;53(17):369-71
- Nichol, JE. 1996a. High resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study, *Journal of Applied Meteorology*, **35**(1):135–146.
- Nichol JE. 2005. Remote sensing of urban heat islands by day and night. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **71**: 613-623.
- Offerle B, Grimmond CSB, Fortuniak K. 2003. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology*, **25**, 10, 1405-1419.
- Owen TW, Carlson TN, Gillies RR. 1998. An assesment of satellite remote-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization. *International Journal of Remote Sensing* **19** 9, 1663-1681.
- Pascal M, Laaidi K, Ledrans M, Baffert E, Caserio-Schönemann C, Le Tertre A, Manach J, Medina S, Rudant J, Empereur-Bissonnet P. 2006: France's heat health watch warning system. *International Journal of Biometeorology* **50**:144-153.

- Rigo G, Parlow E. 2007. Modelling the ground heat flux of an urban area using remote sensing data. *Theoretical and Applied Climatology*, **90**, 3-4, pp. 185-199.
- Roujean, JL, Tanré D, Bréon FM, Deuzé JL. 1997. Retrieval of land surface parameters from airborne POLDER bidirectional reflectance distribution function during HAPEX-Sahel. *Journal of Geophysical Research* **102**:11201-11218.
- Robine JM, Cheung S, Le Roy S, Van Oyen H, Griffiths C, Michel JC, Herrmann F. 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* **331**: 171-178.
- Roujean JL. 2000. A parametric hot spot model for optical remote sensing applications. *Remote sensing Environment*, **71**, 197-206
- Schär C, Vidale PL, Luthi D, Frei C, Haberli C, Liniger MA, Appenzeller C. 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. *Nature* **427**: 332-336.
- Schär C, Jendritzky G. 2004. Climate change: Hot news from summer 2003. *Nature* **432**: 559-560.
- Schifano P, Cappai G, De SM, Michelozzi P, Marino C, Bargagli AM, et al. 2009. Susceptibility to heat wave-related mortality: a follow-up study of a cohort of elderly in Rome. *Environmental Health* 2009; **8**: 50.
- Semenza JC, Rubin CH, Falter KH, Selanikio JD, Flanders WD, Howe HL, et al. 1996. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *The New England Journal of Medicine*; **335**(2):84-90.
- Smargiassi A, Fournier M, Griot C, Baudouin Y, Kosatsky T. 2008. Prediction of the indoor temperatures of an urban area with an in-time regression mapping approach. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* ; **18** (3):282-8.
- Streutker DR. 2003. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment* **85**: 282-289.
- Stott PA, Stone DA, Allen MR. 2004. Human contribution to the European heat wave of 2003. *Nature* **432** : 610-613.
- Tan J, Zheng Y, Tang X, Guo C, Li L, Song G, et al. 2010. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*; **54** (1):75-84.
- Tebaldi, C, Hayhoe K, Arblaster JM, Meehl GA, 2006. Going to extreme. *Climate Change* **79**: 185-211.
- Tressol M, Ordonez C, Zbinden R, Brioude J, Thouret V, Mari C, Nedelec P, Cammas JP, Smit H, Patz HM, Volz-Thomas A. 2008. Air pollution during the 2003 European heat wave as seen by MOZAIC airliners. *Atmospheric Chemistry and Physics* **8** : 2133-2150.
- United States Environmental protection Agency. Heat island effect, [updated 2005; cited 2010 June 2010]
- United Nations 2007
- Vandentorren S., F. Suzan, S. Medina, S. Pascal, A. Maulpoix, J.C. Cohen, M. Ledrans. 2004. Mortality in 13 French Cities during the August 2003 Heat Wave. *American Journal of Public Health* **94**: 1518-1520.
- Vandentorren S, Bretin P, Zeghnoun A, Mandereau-Bruno L, Croisier A, Cochet C, Ribéron J, Siberan I, Declercq B, Ledrans M. 2006. August 2003 heat wave in France: risk factors for death of elderly people living at home. *European Journal of Public Health* **16**: 583-591.

- Vandentorren S, Empeur-Bissonnet P. 2005. Health impact of the 2003 heat-wave in France, in *Extreme Weather Events and Public Health Responses*, Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-24417-2 (Print) 978-3-540-28862-6, p. 81-87.
- Voogt JA, Oke TR. 1998. Effects of urban surface geometry on remotely sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing* **19**: 895-920.
- World Health Organization Europe. The health impacts of 2003 summer heat-waves. Briefing note for the delegations of the fifty-third session of the WHO regional committee for Europe. Vienna, Austria; 2003. 12 p.
- Zaitchik BF, Macalady AK, Bonneau LR, Smith RB. 2006. Europe's 2003 heat wave: a satellite view of impacts and land-atmosphere feedbacks, *International Journal of Climatology* **26**: 743-769.

Références Logiciels

- SAS/STAT software, release 8.02. 1999. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Math Soft Inc. Seattle. Splus 6.2. 2003. Washington.
- TeraScan® software package.
- MATLAB®
- Arc-Info®
- GEOimage© 4.1.1.

8. Actions de valorisation

8.1. Publications

a. Revues scientifiques à comité de lecture

- *International Journal of Climatology*, Vol. 31, p.313-323 February 2011.

"Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area"

Dousset B., F. Gourmelon, K. Laaidi, A. Zeghnoun, E. Giraudet, P. Bretin, E. Mauri, S. Vandentorren. 2011. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area.

- *Environmental Health Perspectives*, soumis le 7 février 2011.

"The impact of heat islands on human health in Paris during the August 2003 heatwave"

Laadi K., A. Zeghnoun, B. Dousset, P. Bretin, S. Vandentorren, E. Giraudet, P. Beaudeau. Heat islands impacts on human health in Paris during the August 2003 Heat wave.

b. Autres publications et citations

- *Cahiers de la solidarité*

Europe et risques climatiques. 2009, "Evolution climatique et canicule en milieu urbain: apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire". Laboratoire Géomer UMR 8554-LETG-CNRS / Institut Européen de la Mer-UBO, *Cahiers de la solidarité* n°18, p82-83, édité à l'occasion des 20 ans de la Fondation MAIF.

- *Vidéo : La recherche au service de la prévention*

B. Dousset, 2009. "La recherche au service de la prévention: Evolution climatique et canicule en milieu urbain", CD-ROM-Agence interne multimedia MAIF.

8.2. Conférences internationales

a. communications orales

- *The 89th American Meteorological Society annual meeting, Eight Symposium on the Urban Environment*

Phoenix.(USA), January 10-16 2009

Session 4 : Biometeorology and Public Health In Urban Area

B. Dousset, F. Gourmelon, E. Giraudet, K. Laaidi, K. Zeghnoun, and P. Bretin
Heat waves, urban heat stress and mortality: a satellite surveillance system

- *Seventh International Conference on Urban Climate ICUC-7*

Yokohama (Japan), June 29 - July 3 2009

Session Urban remote sensing

B. Dousset, F. Gourmelon, K. Laaidi, A. Zeghnoun, E. Giraudet, P. Bretin, S. Vandentorren

Satellite monitoring of summertime heat waves in the Paris metropolitan area

- *Séminaire Risques climatiques, quels enjeux pour l'Europe ?*

Bruxelles (Belgique), 28 octobre 2009

Comité Economique et Social Européen, *Fondation MAIF* et *Pour la Solidarité* : conférence et table ronde sur la dimension européenne des risques climatiques.

B. Dousset

Risques climatiques et vagues de chaleur dans les villes européennes

- American Geophysical Union Fall Meeting

San Francisco (USA), December 13-17, 2010

Biogeosciences : session B2, Urban Areas and Global Change

B. Dousset, F. Gourmelon, E. Giraudet, K. Laaidi, A. Zeghnoun, P. Bretin, S.

Vandentorren

Climate change and heat waves in Paris and London metropolitan areas

- AGU Conférence de presse : «New Views of Urban Heat Islands» Dec. 13 2010

b. communications posters

- Scientific International Congress on Climate Change

Global risks, Challenges and Decisions

Copenhagen (Denmark), March 10-12, 2009

Session 42 - Adaptation and Climate Risk Insurance

B. Dousset, F. Gourmelon, K. Laaidi, H. Oliviero, A. Zeghnoun, E. Giraudet, P.

Bretin, S. Vandentorren

A contribution of an insurance foundation to the study of urban heat waves and their societal impact

- Health Protection 2009

Warwick (England), September 14 -16, 2009

Session: Emergency preparedness and response

K.Laaidi, A. Zeghnoun, B. Dousset, P. Bretin, S. Vandentorren, E. Giraudet, F.

Gourmelon,

Health impact of heatwaves: the use of remote sensing in defining a new indicator of urban surface temperature

- Atelier européen "Workshop on Public Health Surveillance and Climate Change"

Institut de veille sanitaire (France). 25 – 26 mars 2010

K.Laaidi, A. Zeghnoun, B. Dousset, P. Bretin, S. Vandentorren, E. Giraudet, F.

Gourmelon

(même poster que pour le Health protection 2009)

- Joint Conference of International Society of Exposure Science & International Society for Environmental Epidemiology

Seoul (South Korea), August 28 –September 1, 2010

Theme : Technology, Environmental Sustainability and Health

K. Laaidi, A. Zeghnoun, B. Dousset, P. Bretin, S. Vandentorren, E. Giraudet, F.

Gourmelon

Health impact of heatwaves in urban heat islands: how to estimate the exposure of the population ?

c. communications à venir

- European Geosciences Union General Assembly

Vienna (Austria), April 03-08, 2011

Session CL2.16 Urban climate, urban heat island and urban biometeorology

B. Dousset, F. Gourmelon, K. Laaidi, A. Zeghnoun, E. Giraudet, P. Bretin, S.

Vandentorren.

Summer warming trends, heat waves and health impact in the Paris metropolitan area.

- 19th International Congress of Biometeorology

The University of Auckland (New Zealand), December 5 – 9, 2011,

K.Laaidi, A. Zeghnoun, B. Dousset, P. Bretin, S. Vandentorren, E. Giraudet, F. Gourmelon

8.3. Citations dans la presse à l'issue de l' "American Geophysical Union Conference" (San Francisco déc. 2010), quelques exemples :

- Discovery News : Nighttime Makes Urban Heat Waves Deadly. JD Cox, Dec 14, 2010
- NASA Earth Features : Heat Islands Sprawl, Dec 14, 2010
- EOS Transactions American Geophysical Union : Urban Areas and Climate Change. E Tretkoff, Vol. 91 N°51 page 503, Dec 21, 2010
- Urban Climate News : "In the News", Satellites Pinpoint Drivers of Urban Heat Islands, International Association For Urban Climate N°38, Dec 2010

Remerciements

Nous remercions : la Fondation MAIF pour avoir soutenu cette recherche; l'Atelier Parisien d'Urbanisme pour nous avoir fourni les couches d'occupation du sol de la région Parisienne. B. Dousset remercie également le "National Research Council of the US Sciences Academy of Washington DC" et le "Air Resources Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration" pour le financement de l'étude satellitaire initiale.

ANNEXES

Annexe 1. Description des cas et des témoins issue de l'enquête 2003

Les cas ont été définis comme les personnes :

- ayant un certificat de décès ne mentionnant pas une cause accidentelle, de suicide ou de complication chirurgicale aiguë,
- ayant 65 ans ou plus,
- décédées au cours du pic de mortalité lié à la chaleur (entre le 8 et le 13 août),
- qui vivaient habituellement dans un logement individuel (quel que soit le lieu du décès) et qui avaient passé au moins 24 heures chez eux avant leur prise en charge hospitalière ou leur décès,
- dont le domicile est situé à Paris ou dans le département du Val-de-Marne.

La notion de logement individuel a été définie de la façon suivante. Il s'agit de logements dans un immeuble collectif ou une maison individuelle ne faisant pas partie d'une structure de soins ou d'hébergement pour personnes âgées. Les foyers non médicalisés dans lesquels des personnes âgées occupent un logement individuel ont été inclus dans l'étude.

Concernant les causes de décès, il a été choisi de procéder par exclusion plutôt que par une sélection plus spécifique type « coup de chaleur », « déshydratation », « hyperthermie », afin de trouver le meilleur compromis entre la sensibilité et la spécificité, sachant qu'il a été constaté un excès de décès pour l'ensemble des causes de décès.

Les témoins ont été définis comme des personnes :

- ayant 65 ans et plus,
- domiciliées dans la zone d'étude,
- ayant vécu à leur domicile pendant la période du 8 au 13 août (comme pour les cas, il s'agit de logements dans un immeuble collectif ou une maison individuelle ne faisant pas partie d'une structure de soins ou d'hébergement pour personnes âgées).

Les témoins ont été appariés aux cas sur l'âge, le sexe et la zone d'habitation.

Les principes retenus pour le recrutement des témoins étaient les suivants :

- l'âge des témoins ne devait pas différer de celui des cas de plus de 5 ans,
- la zone d'habitation était définie comme une unité géographique regroupant environ 100 000 habitants, de même profil social. Ainsi pour Paris, 14 zones ont été définies selon le niveau moyen des loyers (20), et 11 zones pour le Val de Marne en fonction de la répartition de la population résidant dans les foyers à bas revenus (21).

Pour l'analyse appariée, les zones d'appariement ont été élargies pour privilégier un meilleur appariement des cas et des témoins sur l'âge (cf. chapitre sur l'analyse des données dans le corps du document).

En ce qui concerne le nombre de sujets nécessaire, il dépend principalement du nombre de témoins par cas, de la proportion de témoins exposés aux facteurs de risques supposés (et donc implicitement du nombre de cas) et du risque relatif que l'on veut mettre en évidence. Il a été décidé de ne retenir qu'un témoin par cas, car le gain d'une stratégie avec 2 témoins par cas apparaissait faible au regard de la difficulté de recherche et d'interview de personnes très âgées. En prenant 1 témoin par cas, une proportion des témoins exposés de 10% et un odds ratio de 2 (38), le nombre de sujets nécessaires est de 246 cas et 246 témoins.

Les cas potentiels ont été recrutés dans la base du CépiDc (Inserm). Leurs caractéristiques sociodémographiques ont été collectées à partir des certificats de décès. Les noms et adresses de domicile des personnes décédées, qui ne sont pas connus du CépiDc, ont été obtenus auprès des services d'état civil des communes de décès, à partir du numéro d'acte de décès enregistré sur le certificat. La connaissance de l'adresse de domicile a permis de sélectionner les personnes qui vivaient effectivement dans un logement individuel.

Les témoins quant à eux ont été recrutés à partir de listes téléphoniques incluant les listes rouges. Les personnes appelées ont été sélectionnées comme témoins si elles correspondaient aux critères d'inclusion (présence au domicile pendant la période étudiée) et aux critères d'appariement (même âge +/- 5 ans, même sexe et même zone géographique que le cas).

Annexe 2. Les variables de l'enquête cas-témoin

Les variables étudiées lors de la première enquête cas-témoin, et qui ont été à nouveau incluses dans le modèle de la présente étude, concernaient les caractéristiques individuelles (âge, mode de vie, comportement, pathologies, etc.)

- Les caractéristiques individuelles :
 - Les caractéristiques sociodémographiques
 - L'âge
 - La catégorie socio professionnelle
 - Le fait d'être financièrement autonome
 - Le mode de vie (lien familial et social)
 - Le fait de vivre seul
 - La fréquence des visites des proches
 - Les activités hors du domicile et contact avec d'autres personnes durant ces activités, la présence d'un animal domestique
 - Le comportement du sujet pendant la canicule
 - Les sorties du domicile pour rechercher une ambiance climatisée ou un autre lieu frais
 - La livraison des courses à domicile
 - La fréquence des bains ou douches
 - La quantité quotidienne de boissons non alcoolisées
 - La tendance à moins se vêtir
 - Les pratiques d'ouverture des fenêtres pendant la canicule connaissance des mesures de prévention
 - Les pathologies préexistantes et l'autonomie
 - L'hospitalisation à domicile
 - Le recours habituel aux intervenants sanitaires
 - L'autonomie (majeure partie de la journée au lit ou au fauteuil, s'habiller seul, faire sa toilette seul)
 - Les pathologies préexistantes : maladies respiratoires, cardiovasculaires, rénales, hépatiques, psychiatriques, neurologiques, cancer, diabète et hypertension artérielle état de santé sous jacent : obésité, escarres, consommation d'alcool, anxiété ou dépression
- L'habitat et le proche environnement.
 - L'environnement du domicile
 - Les facteurs pouvant favoriser ou diminuer localement le phénomène d'îlot de chaleur :
 - * Le mode d'occupation du sol autour du domicile (caractéristiques de l'urbanisme)
 - * La densité de population autour du domicile
 - * L'importance de la végétation autour du domicile
 - L'évaluation du phénomène local d'îlot de chaleur par la température moyenne autour du domicile mesurée par satellite.
 - Le bâtiment dans lequel est situé le domicile
 - Maison individuelle ou immeuble collectif
 - Nombre d'étages
 - Qualités d'isolation thermique du bâtiment pouvant être liées à :
 - * La période de construction,
 - * La qualité de la construction,
 - * Les matériaux de construction et de toiture,
 - * La réalisation de travaux d'amélioration de l'isolation,
 - * La qualité de l'entretien.
 - Le logement
 - Pour les logements dans des immeubles collectifs :
 - * L'étage du logement
 - * La situation au dernier étage ou pas du logement

- * La présence d'un ascenseur
- Pour les maisons individuelles :
 - * Le nombre de niveaux habitables,
 - * La présence d'une cave ou d'un sous-sol.
- Pour l'ensemble des logements :
 - * La qualité d'isolation thermique du logement,
 - * La taille du logement (surface, nombre de pièces),
 - * L'importance des surfaces vitrées,
 - * La possibilité de créer des courants d'air entre façades différentes,
 - * La présence d'un système de climatisation,
 - * Le type d'installation sanitaire.
- Les pièces de vie (pièce utilisée pour dormir et pièce principalement utilisée pendant la journée)
 - La situation de la pièce (sous les toits ou non)
 - La possibilité d'aérer sur l'extérieur
 - L'importance des surfaces vitrées
 - L'orientation des surfaces vitrées
 - La durée d'exposition de la pièce au soleil
 - La possibilité de protéger les fenêtres du soleil
 - Le type de protection des fenêtres

Pour les cas, des questions sur la prise en charge des personnes décédées ont été incorporées au questionnaire et les causes de décès ont été obtenues auprès du CépiDc.

Les données permettant de décrire la prise en charge médicale des cas avant le décès ont également été recueillies.

Annexe 3. Questionnaire des cas (personnes décédées pendant la vague de chaleur d'août 2003)

« Etude canicule domicile 2003 »

N° Etude : / 0 / 3 / 0 / 1 / 1 / 9 / 9 /

Code enquêteur : / / / / / / / / Nom enquêteur :

Introduction : Bonjour comme convenu lors de l'appel téléphonique je vous propose de participer à une étude dont l'objectif est d'améliorer les dispositifs de prévention suite aux événements du mois d'août . Vos réponses nous sont précieuses car vos renseignements nous permettront d'établir des plans d'action adaptés.

☛ ENQUÊTEUR NOTER LE NUMERO CATI (CSI) : | | | | | | | |

☛ ENQUÊTEUR NOTER LE NUMERO D'ORDRE (INVS) : | | | | | | | |

2- CARACTERISTIQUES SOCIO-DEMOGRAPHIQUES DU DEFUNT

Pour commencer je vais valider avec vous quelques informations concernant Monsieur/Madame X.....

Q2.1. Enquêteur valider Sexe : Homme.....1 Femme.....2

Q2.2. Quand Monsieur/Madame XX est -il/elle né(e) ?

| | | | | | | | | | | |
jour mois année

(Si NSP) **Quel âge avait Monsieur/Madame XX** | | | | (en années)

Q2.3. Concernant son statut matrimonial était-il/elle ?

- marié(e)..... 1
- vivant maritalement 2
- célibataire..... 3
- veuf(ve)..... 4
- divorcé(e) ou séparé(e). 5
- NSP (ne pas suggérer) ..6

Q2.4. Combien avait-il/elle d'enfants vivant au moment du décès

| | | | enfant(s) NSP (ne pas suggérer) ...99

Q2.5. A quel âge a-t-il/elle arrêté l'école ou les études ? | | | | ans NSP (ne pas suggérer) ...99

Q2.6. Quel est le diplôme ou le niveau de formation le plus élevé qu'il/elle ait obtenu ?

Enquêteur noter en clair: _____

Recoder :

Aucun diplôme	1
Certificat d'études primaires (CEP)	2
Brevet d'études du premier cycle (BEPC), brevet des collèges	3
Baccalauréat, Brevet professionnel ou autre de ce niveau	4
Diplôme 2 ^{ème} ou 3eme cycle universitaire, grandes écoles, école d'ingénieur	5
Autre (préciser : _____)	6

Q2.7. Monsieur/Madame avait-t-il/elle déjà exercé un emploi ?

Oui	1
Non	2 → Aller en Q2.9
NSP (ne pas suggérer).....	3 → Aller en Q2.9

Q2.8. Si oui, quel était son dernier emploi occupé ? (enquêteur noter en clair puis

recoder): _____

Agriculteur exploitant	1
Artisan, commerçant, chef d'entreprise	2
Cadre, profession intellectuelle supérieure	3
Profession intermédiaire	4
Employé	5
Ouvrier	6

Si pas de conjoint → Q2.11

Q2.9. Le conjoint de Monsieur/Madame XX avait-il/elle exercé un emploi ? (Si PI=conjoint) Avez-vous déjà exercé un emploi ?

Oui	1
Non	2 → Aller en Q2.11
NSP (ne pas suggérer).....	3 → Aller en Q2.11

Q2.10. (si oui) Quel est ou était le dernier emploi de son conjoint (enquêteur : poser même si conjoint décédé) : (Si PI=conjoint) Quel est le dernier emploi que vous avez occupé ?

(enquêteur : noter en clair puis coder) : _____

Agriculteur exploitant	1
Artisan, commerçant, chef d'entreprise	2
Cadre, profession intellectuelle supérieure	3
Profession intermédiaire	4
Employé	5
Ouvrier	6

Q2.11. En 2003, vivait-il/elle dans son logement à titre de :

Propriétaire.....	1
Locataire	2
Locataire à titre gratuit	3
Usufruitier	4
NSP (ne pas suggérer)	5

Q2.12. En 2003, Monsieur/Madame XX disposait-il/elle de suffisamment de revenus, avantages sociaux compris, pour assumer seul(e) tous ses frais de vie sans l'aide de ses proches?

oui.....	1	non.....	2	NSP (ne pas suggérer).....	3
----------	---	----------	---	----------------------------	---

Q2.13. Bénéficiait-il/elle de mesure de ? (enquêteur : si la personne ne comprend pas les termes coder NSP)

- Curatelle ou sauvegarde de justice.1
- Tutelle2
- Aucune mesure.....3
- NSP (ne pas suggérer).....4

3. Description de l'immeuble

Q3.1. Le logement de Monsieur/Madame XXX est-il situé dans ?

- Une maison individuelle1
- Un immeuble collectif d'habitation2
- Un foyer logement non médicalisé pour personnes âgées.....3
- NSP (ne pas suggérer).....4

Q3.2. Combien y a-t-il de niveaux habitables au dessus du rez-de-chaussée ?

RDC + étage(s) NSP (ne pas suggérer) ...99

Q3.3a. A quelle période a été achevée la construction du bâtiment ?

NSP (ne pas suggérer)9999

(Si NSP) Q3.3b. Quelle est la période approximative de construction ?

- Avant 18711
- De 1871 à 19142
- De 1915 à 19483
- De 1949 à 19614
- De 1962 à 19675
- De 1968 à 19746
- De 1975 à 19817
- De 1982 à 19898
- 1990 ou après9
- NSP (ne pas suggérer).....10

Si ne sait pas se positionner sur l'échelle mais donne une indication de période, noter réponse en clair (exemple : immeuble haussmannien, années folles, avant guerre (faire préciser laquelle)...)

Q3.4. L'ensemble du bâtiment a-t-il bénéficié de travaux généraux d'isolation thermique après construction ? (nous ne parlons pas de travaux individuels qui auraient pu être faits dans l'appartement)

oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3

4. Description du logement occupé à partir du 4 août

Nous allons à présent parler du logement qu'a occupé Monsieur/Madame XXX à partir du 4 août.

(Si Q3.1=2ou 3)

Q4.1. A quel étage est situé le logement ? (enquêteur : si duplex ou triplex noter l'étage du palier le plus bas)

NSP (ne pas suggérer)...99

(Si Q3.1=2ou 3)

Q4.2. S'agit-il du dernier étage habitable ?

oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3

(Si Q3.1=2ou 3)

Q4.3. Y a-t-il un ascenseur ?

oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q4.4. (si q3.1=1) S'il s'agit d'une maison individuelle combien a-t-elle de niveaux habitables ?

NSP (ne pas suggérer) ..99

Q4.5. (si q3.1=1) S'il s'agit d'une maison individuelle y'a-t-il une cave ou un sous sol ?

oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q4.6. Le logement a t'il bénéficié de travaux d'isolation thermique ?

Oui 1
Non 2 → Aller en Q4.8
NSP (ne pas suggérer) 3 → Aller en Q4.8

(Si oui)Q4.7. Quels éléments ont été isolés ? (plusieurs réponses possibles)

Fenêtres..... 1
Murs..... 2
Toiture..... 3
Plancher 4
NSP (ne pas suggérer)..... 5

Q4.8. En général, Monsieur/Madame XX considérait-il/elle que le logement était

Bien isolé de la chaleur oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3
Bien isolé du froid oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q4.9. Combien ce logement a t-il de pièces principales (chambre et séjour) ? (ne pas compter la cuisine, la salle de bains, l'entrée et les WC) NSP (ne pas suggérer) ..99

Q4.10. Quelle est la surface habitable du logement (en mètres carrés) ?

____m² NSP (ne pas suggérer)999

Q4.11. De combien de fenêtres ou portes vitrées le logement dispose-t-il ?

____ NSP (ne pas suggérer) ..99

Q4.12. Est-il possible de créer un courant d'air dans le logement en ouvrant des fenêtres situées sur des façades différentes ?

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q4.13. Le logement dispose-t-il d'un système de climatisation (hors ventilateur)?

oui un système de climatisation fixe 1
 oui un système de climatisation mobile 2
 non 3
 NSP (ne pas suggérer)..... 4

Q4.14. De quel type d'installation sanitaire le logement est-il équipé ? (plusieurs réponses possibles)

Douche 1
 Baignoire..... 2
 Lavabo 3

Q4.15. En août, les fenêtres du logement restaient-elles ouvertes ou entre-ouvertes ?

Le matin 1
 L'après-midi 2
 Le soir 3
 La nuit 4
 Jamais..... 5
 NSP (ne pas suggérer)..... 6

Nous allons parler de la pièce qu'utilisait principalement Monsieur/Madame XXX pour dormir la nuit en août

Q4.16. Quelle pièce a été principalement utilisée en août pour dormir la nuit?

Chambre habituelle 1
 Salon, salle à manger autre chambre 2
 Autre pièce en sous-sol (cave...)préciser : _____ 3
 A dormi à l'extérieur (balcon, terrasse, jardin) préciser : _____ 4 →
 Q4.28
 A dormi hors de son domicile 5 →
 Q4.28
 Autre préciser : _____ 6 →
 Q4.28
 NSP (ne pas suggérer)..... 7 →
 Q4.28

Q4.17. La pièce la plus utilisée début août pour dormir la nuit est-elle située sous les toits ?

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q4.18. Je vais vous citer des types de surfaces vitrées. Pour chacune vous me direz combien donnent sur l'extérieur dans la pièce où Monsieur/Madame XXX à dormi la nuit début août.

Combien y a-t-il de dans cette pièce ?

	Aucune	1	2	3	4 et +	NSP
Porte fenêtre.....	.....0.....	...1...	...2...	...3...	...4...	...9...
Fenêtre.....	.....0.....	...1...	...2...	...3...	...4...	...9...
Fenêtre de toit (Velux).....	.....0.....	...1...	...2...	...3...	...4...	...9...
Lucarne (petite fenêtre).....	.....0.....	...1...	...2...	...3...	...4...	...9...
Autre surface vitrée préciser : _____	.....0.....	...1...	...2...	...3...	...4...	...9...

Q4.19. Y a-t-il au moins 1 fenêtre ou porte pouvant s'ouvrir directement à l'air libre et permettant d'aérer la pièce la plus utilisée pour dormir la nuit?

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q4.20. Comment sont principalement orientées les surfaces vitrées de cette pièce? (plusieurs réponses possibles si plusieurs façades – Cf consignes)

Sud 1
 Est 2
 Ouest..... 3
 Nord 4
 NSP (Ne pas suggérer) 5
 (Si NSP et si entretien face à face, regarder boussole)

En août, le soleil rentre-t-il directement dans la pièce...

Q4.21. Avant midi ? oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

(Si oui) **Q4.22.** Pendant combien d'heures environ? |_| NSP (ne pas suggérer).....9

Q4.23. Après midi ? oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

(Si oui) **Q4.24.** Pendant combien d'heures environ? |_| NSP (ne pas suggérer).....9

Q4.25. Y-a-t-il possibilité de protéger TOUTES les fenêtres du soleil (que ce soit par des protections intérieures ou extérieures, des rideaux ou des volets)?

Oui 1
 Non 2 → Aller en Q4.28
 NSP (ne pas suggérer) 3 → Aller en Q4.28

Q4.26. De quel type de protection solaire extérieure les fenêtres sont elles pourvues ?

Volets en bois 1
 Volets métalliques 2
 Stores extérieurs..... 3
 Aucune protection extérieure 4
 Autres Préciser : _____ 5
 NSP (ne pas suggérer)..... 6

Q4.27. De quel type de protection solaire intérieure les fenêtres sont elles pourvues ?

Stores intérieurs 1
 Doubles rideaux , rideaux épais 2
 Rideaux simples, voilages..... 3

Aucune protection intérieure.....4
 Autres Préciser : _____5
 NSP (ne pas suggérer).....6

(Q4.28)Nous allons parler de la pièce qu'utilisait principalement Monsieur/Madame XXX pour passer sa journée début août

Q4.28. Début août pendant la journée est-ce que Monsieur/Madame XXX passait la majeure partie de ses journées dans la pièce où il dormait la nuit ?

oui.....1 → aller en q5.1
 non.....2
 NSP (ne pas suggérer).....3 → aller en q5.1

Q4.29. (si non) Dans quelle pièce Monsieur/Madame XXX passait-elle la majeure partie de son temps pendant la journée début août?

Chambre habituelle 1
 Salon, salle à manger autre chambre 2
 Autre pièce en sous-sol (cave...) préciser : _____ 3 → q5.1
 Autre préciser : _____ 6
 NSP (ne pas suggérer)..... 7 → q5.1

Q4.30. Cette pièce utilisée début août est-elle située sous les toits ?

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q4.31. Comme tout à l'heure, je vais vous citer des types de surfaces vitrées. Pour chacune vous me direz combien donnent sur l'extérieur dans la pièce où Monsieur/Madame XXX passait ses journées début août?

Q4.32. Combien y a-t-il de dans cette pièce ?

	Aucune	1	2	3	4 et +	NSP
Porte fenêtre.....	.....0.....	...1	...2	...3	...4	...9
Fenêtre.....	.....0.....	...1	...2	...3	...4	...9
Fenêtre de toit (Velux).....	.....0.....	...1	...2	...3	...4	...9
Lucarne (petite fenêtre).....	.....0.....	...1	...2	...3	...4	...9
Autre surface vitrée préciser : _____ —	.....0.....	...1	...2	...3	...4	...9

Q4.33. Y a-t-il au moins 1 fenêtre ou porte pouvant s'ouvrir directement à l'air libre et permettant d'aérer la pièce la plus utilisée pendant la journée?

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q4.34. Comment sont principalement orientées les surfaces vitrées de cette pièce? (plusieurs réponses possibles si plusieurs façades – Cf consignes)

- Sud 1
- Est 2
- Ouest 3
- Nord 4
- NSP (Ne pas suggérer) 5
- (Si NSP et si entretien face à face, regarder boussole)

En août, le soleil rentre-t-il directement dans cette pièce...

Q4.35. a1 Avant midi ? oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

(Si oui) **Q4.35. a2** Pendant combien d’heures environ? |_| NSP (ne pas suggérer).....9

Q4.35.b1 Après midi ? oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

(Si oui) **Q4.35. b2** Pendant combien d’heures environ? |_| NSP (ne pas suggérer).....9

Q4.36. Y-a-t-il possibilité de protéger TOUTES les fenêtres du soleil dans cette pièce (que ce soit par des protections intérieures ou extérieures, des rideaux ou des volets)?

oui.....1 → aller en q5.1

non.....2

NSP (ne pas suggérer).....3 → aller en q5.1

Q4.37. De quel type de protection solaire extérieure les fenêtres sont elles pourvues ?

Volets en bois 1

Volets métalliques 2

Stores extérieurs..... 3

Aucune protection extérieure 4

Autres Préciser : 5

NSP (ne pas suggérer) 6

Q4.38. De quel type de protection solaire intérieure les fenêtres sont elles pourvues ?

Stores intérieurs 1

Doubles rideaux , rideaux épais 2

Rideaux simples, voilages..... 3

Aucune protection intérieure 4

Autres Préciser : 5

NSP (ne pas suggérer) 6

5- VIE QUOTIDIENNE ET AUTONOMIE

Nous allons à présent parler de la vie quotidienne de Monsieur/Madame XXX

Q5.1. Etait-il/elle en Hospitalisation à domicile (HAD) ?

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q5.2. A quelle fréquence Monsieur/Madame XXX faisait-il/elle appel aux intervenants suivants pour venir le/la voir à domicile?

	Tous les jours	Nombre d’heures	Au moins une fois par semaine	Au moins une fois par mois	A la demande	Jamais	NSP (ne pas suggérer)
Infirmière	1 →	|_|	2	3	4	5	6
Garde malade ou							

assistante de vie	1 →	<input type="checkbox"/>	2	3	4	5	6
Kinésithérapeute	1 →	<input type="checkbox"/>	2	3	4	5	6
Aide ménagère, employé de maison	1 →	<input type="checkbox"/>	2	3	4	5	6
Organisme qui livre les repas à domicile	1 →	<input type="checkbox"/>	2	3	4	5	6
Autres : précisez _____ _____ _____	1 →	<input type="checkbox"/>	2	3	4	5	6
précisez _____ _____ _____	1 →	<input type="checkbox"/>	2	3	4	5	6
précisez _____ _____ _____	1 →	<input type="checkbox"/>	2	3	4	5	6

(Pour chaque item si Q5.2=1)

Q5.3. Combien d'heures chacune de ces visites prenaient elles par jour ?

Q5.4. Monsieur/Madame X s'habillait-il/elle seul(e) ?

- Oui complètement 1
- Oui partiellement 2
- Non..... 3
- NSP (Ne pas suggérer) 4

Q5.5. Pouvait-il/elle faire sa toilette seul(e)?

- Oui complètement 1
- Oui partiellement 2
- Non..... 3
- NSP (Ne pas suggérer) 4

Q5.6. En général, se faisait-elle livrer ses courses à domicile (que ce soit par un supermarché ou par un proche) ?

- oui..... 1 non.... 2 NSP (ne pas suggérer)..... 3

Q5.7. Monsieur-Madame XXX était-il/elle obligé(e) de passer la majeure partie de la journée au lit ou au fauteuil ?

- oui..... 1
- non..... 2 → aller en q6.1
- NSP (ne pas suggérer)..... 3 → aller en q6.1

(Si oui) **Q5.8. Etait-ce dû ?**

- A un état habituel oui..... 1 non.... 2 NSP (ne pas suggérer)..... 3

A la chaleur oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3
 A une autre cause oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3
 (Si autre cause) préciser : _____

6. ADAPTATION A LA CANICULE

Q6.1. Pendant la canicule, Monsieur/Madame est-il/elle sorti de son domicile ?

Tous les jours ou presque 1
 2 à 4 fois par semaine..... 2
 Moins souvent..... 3
 Jamais..... 4 → aller en q6.4.
 NSP (Ne pas suggérer) 5 → aller en q6.4.

Q6.2.(Si codes 1 à 3) **En août, combien d’heures en moyenne par jour, la personne s’absentait-elle de son domicile ?**

Moins d’1 heure 1
 De 2 à 5 heures..... 2
 Plus de 5 heures 3
 NSP (Ne pas suggérer) 4

Q6.3. (Si codes 1 à 3 en q6.1.) **Quand il/elle sortait est-ce que Monsieur-Madame XX recherchait...**

Une ambiance climatisée hors de son logement ? oui.....1 non....2 (NSP).....3
 Autre lieu frais : préciser _____ ? oui.....1 non....2 (NSP).....3

Q6.4. Pendant la canicule, se faisait-elle livrer ses courses à domicile (que ce soit par un supermarché ou par un proche) ?

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q6.5. Début août, combien de douche(s) ou bain(s) prenait Monsieur/ Madame XX?

Plus d’1 par jour..... 1
 1 par jour 2
 1 tous les 2 jours 3
 1 par semaine 4
 jamais 5
 NSP (ne pas suggérer)..... 6

Q6.6. Début août, par rapport à son habitude, la fréquence des douches ou bains était ?

Identique 1
 Augmentée 2
 Diminuée..... 3
 NSP (ne pas suggérer)..... 4

Q6.7. Début août, combien buvait-elle d’eau ou de boisson non alcoolisée en moyenne par jour ?

1 à 3 verres..... 1
 ½ litre à 1 litres 2
 1 à 2 litres..... 3
 Plus de 2 litres 4
 NSP (ne pas suggérer)..... 5

Q6.8. Début août, par rapport à son habitude, avait-t-il/elle eu tendance à se vêtir ?

Moins 1
 Comme d'habitude 2
 NSP (ne pas suggérer) 3

Q6.9. Toujours début août, pour se rafraîchir, Monsieur/Madame XXX utilisait elle ?

un brumisateur	oui.....1	non....2	NSP (ne pas suggérer).....3
bain ou douche froide	oui.....1	non....2	NSP (ne pas suggérer).....3
du linge humide sur le corps	oui.....1	non....2	NSP (ne pas suggérer).....3
un ventilateur mobile	oui.....1	non....2	NSP (ne pas suggérer).....3
la climatisation	oui.....1	non....2	NSP (ne pas suggérer).....3
Autre précisez :	_____		

Q6.10. Etait-il/elle sensibilisée aux mesures de prévention à prendre durant la canicule ?

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q6.11. Quelles autres dispositions Monsieur/Madame XXX a-t-il/elle prises pour se protéger de la chaleur ?

.....

Q6.12. Toujours début août

Regardait-il/elle la télévision	oui.....1	non....2	NSP (ne pas suggérer).....3
Ecoutait-il/elle la radio	oui.....1	non....2	NSP (ne pas suggérer).....3
Lisait-il/elle les journaux	oui.....1	non....2	NSP (ne pas suggérer).....3

7. ENVIRONNEMENT SOCIAL ET FAMILIAL
--

Q7.1. Depuis quand Monsieur/Madame XX vivait-il/elle dans son logement ?

Moins d'1 an 1
 1 à 5 ans 2
 Plus de 5 ans 3
 NSP (ne pas suggérer) 4

Q7.2. Combien de personnes partageaient le logement avec lui/avec elle (en général)?

□□□ NSP (ne pas suggérer) ...99

Q7.3. (Si 0 personne c'est à dire vivait seul) Depuis quand vivait-il/elle seul(e)?

□□□ ans □□□ mois NSP (ne pas suggérer) ...99

Q7.4. D'habitude, à quelle fréquence Monsieur/Madame XXX recevait-il/elle des visites d'un ou de plusieurs proches (familles, amis, voisins) ? (enquêteur : nous ne comptons pas ici les visites de personnel soignant, d'aide ménagère...)

Tous les jours ou presque 1
 2 à 4 fois par semaine 2
 Moins souvent 3
 Jamais 4
 NSP (Ne pas suggérer) 5

Q7.5. Début août combien de fois a-t-elle été visitée par ses proches(familles, amis, voisins) ?

- Tous les jours ou presque 1
- 2 à 4 fois par semaine.....2
- Moins souvent.....3
- Jamais.....4
- NSP (Ne pas suggérer)5

Q7.6. D'habitude, pour quelle(s) activité(s) quittait-il/elle son domicile ?

- Promenades oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3
- Achats, courses oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3
- Culte religieux oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3
- Activités sociales oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3
- Rencontres d'amis, de proches oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3
- Activités culturelle ou loisir oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3
- Autres activités préciser _____

Si Q7.6 = 2 ou 3 partout et pas d'autres activités → aller en Q7.10

Q7.7. Les activités de Monsieur/Madame XX l'amenaient-il/elle à rencontrer d'autres personnes ?

- au moins 1 fois par semaine 1
- 2 à 3 fois par mois 2
- plus rarement..... 3
- Jamais..... 4
- NSP (ne pas suggérer)..... 5

Q7.8. En août, Monsieur/Madame XX a-t-il/elle dû interrompre des activités qu'il/elle avait d'habitude?

- Oui 1
- Non 2 → aller en Q7.10.
- NSP (ne pas suggérer)..... 3 → aller en Q7.10.

(Si non) Q7.9. Quelles activités ont été interrompues et pourquoi? (enquêteur ne pas citer)

- Promenades 1... Pourquoi ?.....
.....
.....
- Achats, courses 2... Pourquoi ?.....
.....
.....
- Culte religieux 3... Pourquoi ?.....
.....
.....
- Activités sociales 4... Pourquoi ?.....
.....
.....
- Rencontres d'amis, de proches 5... Pourquoi ?.....
.....
.....

Activités culturelle ou loisir 6... Pourquoi ?.....

Autres activités _____ 7 ... Pourquoi ?.....

Q7.10. La personne possédait elle un animal de compagnie ?

- oui.....1
- non.....2 → aller en q8.1
- NSP (ne pas suggérer).....3 → aller en q8.1

Q7.11. Lequel ?

Chien..... 1 Chat 2 Autre préciser (_____).....3

Q7.12. S'en occupait-elle seule?

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

8- ETAT GENERAL ET SANTE

Q8.1. Monsieur/Madame XX était-il/elle :

- d'un poids normal par rapport à sa taille..... 1
- plutôt maigre 2
- plutôt en surcharge pondérale (excès de poids)..... 3
- NSP (ne pas suggérer)..... 4

Q8.2. Avait-il/elle des problèmes d'audition ?

- Oui 1
- Non 2 → aller en Q8.4
- NSP (ne pas suggérer)..... 3 → aller en Q8.4.

(Si oui) **Q8.3. Portait-il/elle un appareil pour mieux entendre ?**

oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q8.4. Quels étaient le nom et les coordonnées de son médecin traitant (adresse, téléphone) (enquêteur : privilégier le nom du médecin généraliste)

NOM : / _____ / PRENOM : / _____ /
Adresse : _____
CP : / _ / _ / _ / _ / Ville : _____
☎ : / _ / _ // _ / _ // _ / _ // _ / _ // _ / _

Si la personne interrogée ne répond pas à la question précédente, pourquoi ?

- Ne connaît pas le médecin..... 1
- Ne se souvient pas du nom du médecin 2
- Ne veut pas nous le donner 3 → Pourquoi ? _____

9. ETAT DE SANTE PRECIS

Q9.1. Monsieur/Madame XX souffrait-elle des pathologies suivantes et si oui, prenait elle un traitement :

	Pathologie			Traitement ?		
	Si oui →			Oui	Non	NSP
	Oui	Non	NSP	Oui	Non	NSP
Maladie respiratoire	1	2	3	1	2	3
Diabète	1	2	3	1	2	3
Hypertension artérielle	1	2	3	1	2	3
Maladie de cœur ou des vaisseaux	1	2	3	1	2	3
Maladie du foie	1	2	3	1	2	3
Insuffisance rénale	1	2	3	1	2	3
Dénutrition	1	2	3	1	2	3
Escarres	1	2	3	1	2	3
Troubles du sommeil	1	2	3	1	2	3
Anxiété, angoisse, dépression	1	2	3	1	2	3
Séquelles d'attaque cérébrale	1	2	3	1	2	3
Altération de la santé mentale	1	2	3	1	2	3
Cancer	1	2	3	1	2	3
Autres maladies chroniques (préciser : _____)	1	2	3	1	2	3
Autres maladies chroniques (préciser : _____)	1	2	3	1	2	3
Autres maladies chroniques (préciser : _____)	1	2	3	1	2	3

Q9.2. Combien de verres d'alcool la personne consommait-elle par jour ?

- Jamais d'alcool..... 1
- Moins d'un verre par jour 2
- 1 à 2 verre(s) par jour..... 3
- 3 à 4 verres par jour 4
- 5 verres et plus par jour..... 5
- NSP (ne pas suggérer)..... 6
- Ne souhaite pas répondre 7

Q9.3. Avait-elle des d'antécédents de dépendance à l'alcool ?

- oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3 Ne veut pas répondre.....4

10. PRISE EN CHARGE

Q10.1. Monsieur/Madame XX a-t-il/elle pu se rendre compte de l'aggravation de son état de santé en août ?

- oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q10.2. Son entourage a-t-il pu s'en rendre compte ?

oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q10.3. A-t-il/elle consulté un médecin entre la mi-juillet et la mi-août ?

Oui 1
 Non 2 → aller en q10.6
 NSP (ne pas suggérer)..... 3 → aller en q10.6

(Si oui) **Q10.4. Pour quel(s) motif(s) ? (plusieurs réponses possibles)**

A cause de la chaleur..... 1
 Pour un problème indépendant de la chaleur 2
 NSP (ne pas suggérer)..... 4

(Si oui) **Q10.5. Quel(s) médecin(s) a-t-il/elle consulté à cette occasion ? (plusieurs réponses possibles)**

Médecin habituel..... 1
 Médecin hospitalier..... 2
 Autre médecin de ville 3
 SOS médecin..... 4
 SAMU/Pompiers 5
 NSP (ne pas suggérer) 6

Q10.6. Pendant la canicule Monsieur/Madame XX a-t-il/elle été transférée vers un hôpital ?

Oui 1
 Non 2 → aller en Q10.9
 NSP (ne pas suggérer)..... 3 → aller en Q10.9

(Si oui) **Q10.7. Par quel moyen a t-il/elle été transféré vers l'hôpital ?** (enquêteur : si plusieurs transferts à l'hôpital ne considérer que le dernier)

Ambulance 1
 SAMU 2
 Pompiers 3
 Véhicule personnel..... 4
 Taxi 5
 Autre (préciser : _____)6
 NSP (ne pas suggérer)..... 7

(Si oui) **Q10.8. A quelle date ?** NSP (ne pas suggérer) ...9999
 jour mois

Q10.9. Monsieur/Madame XX disposait-il/elle d'un système d'alerte des secours (bracelet, pendentif) ?

Oui 1
 Non 2 → aller en Q10.11
 NSP (ne pas suggérer)..... 3 → aller en Q10.11

(Si oui) **Q10.10 En a-t-il/elle fait usage pour appeler les secours ?**

Oui.....1 non.....2 NSP (ne pas suggérer).....3

Q10.11. Et personnellement pensez-vous que Monsieur/Madame XX ait été pris(e) en charge de façon satisfaisante ?

Oui 1 → aller en Q10.13
 Non 2

NSP (ne pas suggérer)..... 3 →aller en Q10.13

(si non) **Q10.12. Pourquoi ?**.....

.....
.....

Q10.13. A votre avis, quelles mesures auraient dû être prises pour prévenir la dégradation de son état de santé ?

.....
.....
.....

Q10.14. A votre avis, quelles mesures auraient dû être prises pour améliorer sa prise en charge médicale?

.....
.....
.....

Q10.15. Avez-vous d'autres commentaires dont vous désirez nous faire part?

.....
.....

1-CARACTERISTIQUES DE L'INTERVIEWE

Q1.1. Pour finir je vais vous redemander quel était votre lien de parenté avec Monsieur/Madame XXX :

- Conjoint 1
- Enfant 2
- Autre parent : précisez : _____ 3
- Voisin 4
- Autre : précisez : _____ 5

Q1.2. Quelle est la date de votre dernière rencontre avec Monsieur/Madame XXX ?

jour

Q1.3. Quelle est la date de votre dernier entretien téléphonique avec Monsieur/Madame XXX ?

jour

Q1.4. Quel est votre âge ? ans

CARACTERISTIQUES DE L'ENQUETE (à remplir en fin d'entretien)

C1. Durée totale de l'entretien hors prise de rendez-vous : minutes

C2. Y a-t-il plusieurs bâtiments à la même adresse ?

Oui.....1 non....2 NSP (ne pas suggérer).....3

C3. (si oui) Où est localisé le bâtiment ? (exemple : Bâtiment sur rue, Bâtiment de gauche, Bâtiment de droite, Bâtiment du fond....) _____
(laissez l'enquêteur décrire la situation)

C4. (si oui) Quel est le numéro/la lettre du bâtiment ? / _____ /

Fin du questionnaire

Enquêteur : n'hésitez pas à dire à l'interviewé que les principaux résultats de l'étude lui seront communiqués par courrier. A cet effet revalider le nom et l'adresse de la personne a la page suivante

C5. Coopération de l'interviewé:

Bonne	1	
Moyenne	2	
Mauvaise	3	raison.....

Commentaires

.....

.....

.....

.....

FICHE PHOTOGRAPHE

Description du quartier

C6. Caractéristiques du quartier

Logements individuels	1
Continu bas (RDC+ 1 à 3 étages).....	2
Continu haut (RDC+ 4 à 7 étages).....	3
Collectif discontinu bas RDC+ 1 à 3 étages)	4
Collectif discontinu haut (RDC d'au moins 4 étages	5
Autre (préciser : _____)	6

C7. Présence de surfaces plantées à moins de 100 mètres ? (plusieurs réponses possibles)

Arbres en bordure de route.....	1
Quelques petits jardins privatifs ou squares	2

Parc, bois, forêt, champs, nombreux jardins privés3
Autres espace(s) vert(s) (préciser : _____)4

NOM DE L'INTERVIEWE : _____

PRENOM DE L'INTERVIEWE : _____

ADRESSE DE L'INTERVIEWE : _____

CODE POSTAL : / ___ / ___ / ___ / ___ / ___ /

VILLE : _____

Reporter N°CATI (CSI):

Code enquêteur : / ___ / ___ / ___ / ___ / ___ /

Nom enquêteur :

Annexe 4. Préparation et réalisation de l'enquête 2003

Organisation de l'enquête.

Le bureau d'étude sélectionné pour l'enquête de terrain était CSA. Un partenariat a été mis en place avec l'association « Vivre son deuil » en cas de besoin. Les enquêteurs ont ainsi reçu des conseils d'un psychiatre pour aborder les personnes en situation de deuil et appréhender les réactions les plus courantes (colère, sidération, etc.).

Pour l'obtention de données relatives aux bâtiments, la Direction Générale des Impôts a communiqué des informations extraites du fichier des propriétés bâties.

Pour caractériser l'environnement des adresses, une collaboration a été mise en place avec l'Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France (Iaurif). L'Iaurif a participé à la définition d'indicateurs et a communiqué des données d'occupation du sol concernant la région Ile-de-France. Il a par ailleurs réalisé le traitement de cartes issues d'images satellites, pour l'ensemble de la zone d'étude.

Aspects éthiques et déontologiques.

L'enquête a fait l'objet d'une autorisation de la CNIL donnée à l'InVS en date du 24 septembre 2003.

Les personnes sollicitées pour répondre au questionnaire ont été informées des objectifs de l'enquête et leur consentement pour participer à l'enquête a été formellement sollicité. Elles ont été informées de leur droit d'accès et de rectification des données les concernant. Une lettre de présentation de l'enquête leur a été transmise.

Toutes les personnes participant à l'enquête ont été soumises au respect du secret professionnel permettant de garantir la confidentialité des données individuelles recueillies. Les données saisies n'étaient pas directement nominatives.

L'étude a été conduite en respectant les recommandations en matière de déontologie et de bonnes pratiques en épidémiologie (39).

Réalisation de l'enquête.

- Les cas : Un courrier présentant l'étude a été envoyé aux proches des cas pour leur annoncer la prise de contact téléphonique prochaine par des enquêteurs. Un entretien en face à face au domicile du cas était proposé pour répondre au questionnaire. En cas d'impossibilité ou de refus, l'entretien était mené par téléphone. Les personnes interrogées étaient en priorité un membre de la famille (conjoint, personne vivant au domicile, enfant connaissant les habitudes de vie), mais parfois un proche (aide à domicile, voisin immédiat, ami visiteur régulier) ou un intervenant social. L'enquête s'est déroulée du 05 novembre 2003 au 06 décembre 2003.
- Les témoins : Les questionnaires témoins ont été renseignés de la même façon, mais directement avec les personnes concernées ou par un proche en cas d'impossibilité due à un handicap de la personne. L'enquête s'est déroulée du 05 novembre 2003 au 22 décembre 2003.
- Les médecins traitants : Une enquête parallèle auprès des médecins traitants a été réalisée par téléphone de novembre 2003 à janvier 2004 par le personnel médical de l'InVS afin d'obtenir une précision plus importante sur les pathologies et les traitements médicamenteux.
- Extraction de données du fichier des propriétés bâties. Afin d'obtenir des indications concernant les bâtiments, il a été demandé à la Direction Générale des Impôts (DGI) d'extraire des informations du fichier des propriétés bâties, qui sert pour le calcul de la taxe foncière. La DGI a fourni les informations suivantes :
 - Année d'achèvement du bâtiment
 - Nombre d'étages
 - Nombre de logements
 - Matériaux de construction du bâtiment :
 - matériaux des murs
 - matériaux de la toiture
 - Catégorie cadastrale (critère utilisé pour le calcul de l'impôt foncier),
 - Eléments de confort de l'immeuble :
 - présence d'un ascenseur
 - proportion de logements avec WC intérieur

- proportion de logements avec baignoire ou douche
 - Etat d'entretien de l'immeuble
- Caractérisation des îlots de chaleur. Ces informations ont été fournies l'aurif. Le principe retenu a été de caractériser l'environnement de chaque sujet dans une zone circulaire autour de son habitation. Chaque adresse de cas et de témoin a été géocodée (obtention des coordonnées géographiques), puis des informations ont été recueillies sur l'environnement de ces adresses jusqu'à des distances respectives de 50, 100 et 200 m.
- Pour chaque adresse ont été établies les variables suivantes décrivant l'environnement du domicile :
- la densité de population et la densité de logements (50, 100 et 200 m),
 - un indice estimant la proportion de surface bâtie (50, 100 et 200 m),
 - un indice calculé à partir du mode d'occupation du sol et destiné à évaluer la capacité des surfaces à emmagasiner la chaleur : « indice thermique MOS » (50, 100 et 200 m),
 - un indice de végétation calculé à partir d'images satellites prises le 9 août 2003 et représentant la proportion de la surface autour du domicile ayant une activité significative de photosynthèse (50, 100 et 200 m),
 - un indice de végétation « brut » calculé à partir de la même image satellite, avec un mode de calcul différent du précédent (calculé seulement pour une distance de 100 m),
 - un indice thermique calculé à partir d'images satellites prises le 9 août 2003 et représentant la température moyenne des surfaces autour du domicile (50 m, 100 m et 200 m).
- Saisie et qualité des données
- L'ensemble des questionnaires ont été relus et validés au fur et à mesure de leur réception. Les questions semi-ouvertes ont été recodées. La saisie a été réalisée sur le logiciel EPIINFO. La saisie de chaque questionnaire a ensuite été validée dans un second temps. Le remplissage et la cohérence des variables ont été analysés. Certaines questions très mal renseignées n'ont pas été prises en compte dans l'analyse.