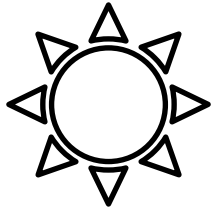


Villes, changement climatique et chaleur extrême

Bénédicte Dousset

Hawaii Institute of Geophysics and Planetology
University of Hawaii, Honolulu, USA

Effet synergique : climat, ville, santé



Réchauffement climatique

accroît la fréquence, l'intensité et la durée des canicules
accroît l'exposition à la chaleur extrême



Urbanisation

Villes > 50% de la population mondiale et 70% en 2050
Les villes produisent ~70% des gaz à effet de serre et intensifient les canicules



Vieillesse de la population

Population mondiale > 60 ans doublera d'ici 2050
Les personnes âgées sont très vulnérables aux canicules

« L'augmentation des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes a entraîné des **impacts irréversibles alors que les systèmes naturels et humains excèdent leur capacité d'adaptation.** »

(GIEC, 2023 : Résumé à l'intention des décideurs politiques. Rapport de synthèse. Sixième rapport d'évaluation)

Quel pourcentage de population mondiale pourrait être exposé à une chaleur mortelle d'ici 2100 ?

nature
climate change

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 19 JUNE 2017 | DOI: 10.1038/NCLIMATE3322

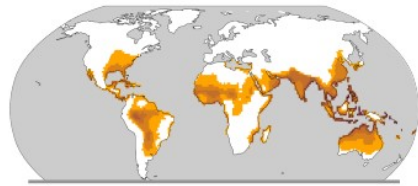
Global risk of deadly heat

Camilo Mora^{1*}, Bénédicte Dousset², Iain R. Caldwell³, Farrah E. Powell¹, Rollan C. Geronimo¹, Coral R. Bielecki⁴, Chelsie W. W. Counsell³, Bonnie S. Dietrich⁵, Emily T. Johnston⁴, Leo V. Louis⁴, Matthew P. Lucas⁶, Marie M. McKenzie¹, Alessandra G. Shea¹, Han Tseng¹, Thomas W. Giambelluca¹, Lisa R. Leon⁷, Ed Hawkins⁸ and Clay Trauernicht⁶

Canicule, température de l'air anormalement élevée par rapport aux conditions attendues à une période de l'année dans une région donnée. Durée minimum 3 jours consécutifs.

Seuil de température de confort, e.g. Paris 31°C le jour, 21°C la nuit, Lyon 34°C le jour, 20°C la nuit.

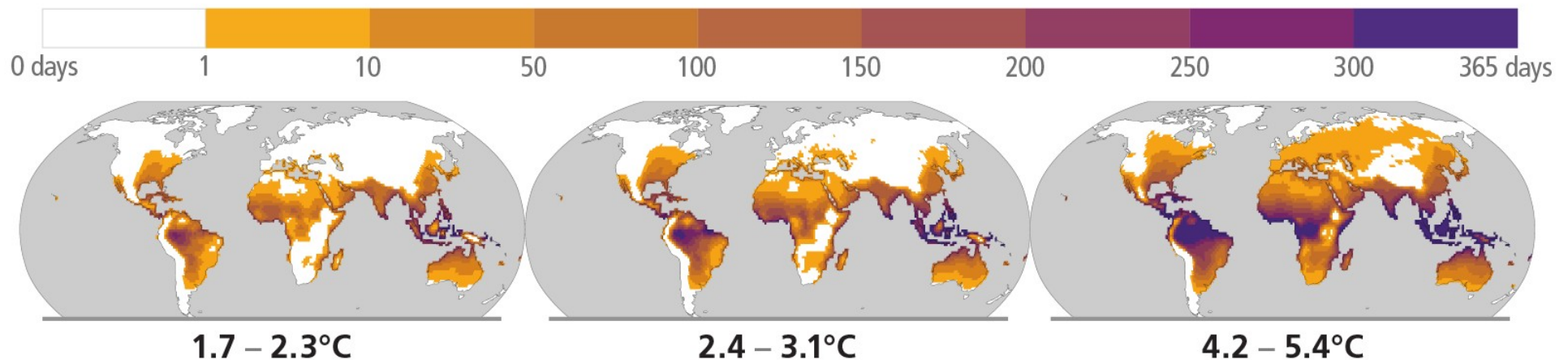
Projection des risques de chaleur et d'humidité sur la santé humaine à différents niveaux de réchauffement planétaire



Historical 1991–2005

Rapport de synthèse du GIEC pour les décideurs politiques (2023). **Exemples d'impacts sans adaptation.**

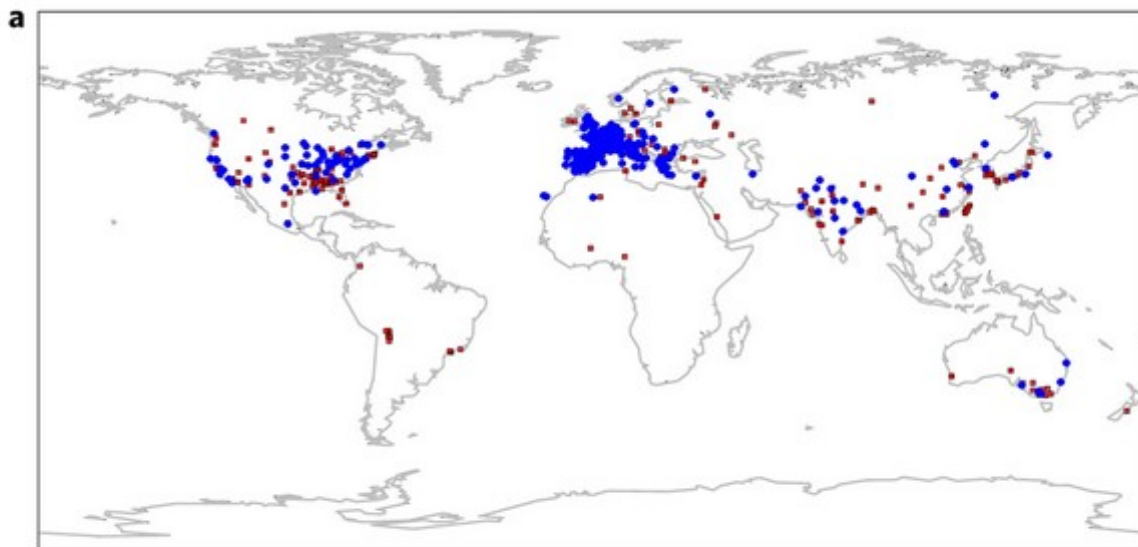
Fig. SPM3b : Risques de chaleur et d'humidité pour la santé humaine



- Les impacts régionaux projetés utilisent un seuil mondial au-delà duquel la moyenne quotidienne de température et d'humidité relative peut induire une hyperthermie qui présente un risque de mortalité.
- **Le seuil utilisé dans ces cartes est basé sur une étude qui a synthétisé les données de 783 cas pour déterminer la relation entre les conditions chaleur - humidité et la mortalité**, tirées en grande partie d'observations dans les climats tempérés. (cf. Mora, Dousset et al., 2017)

Distribution géographique globale des vagues de chaleur mortelle de 1980 à 2014

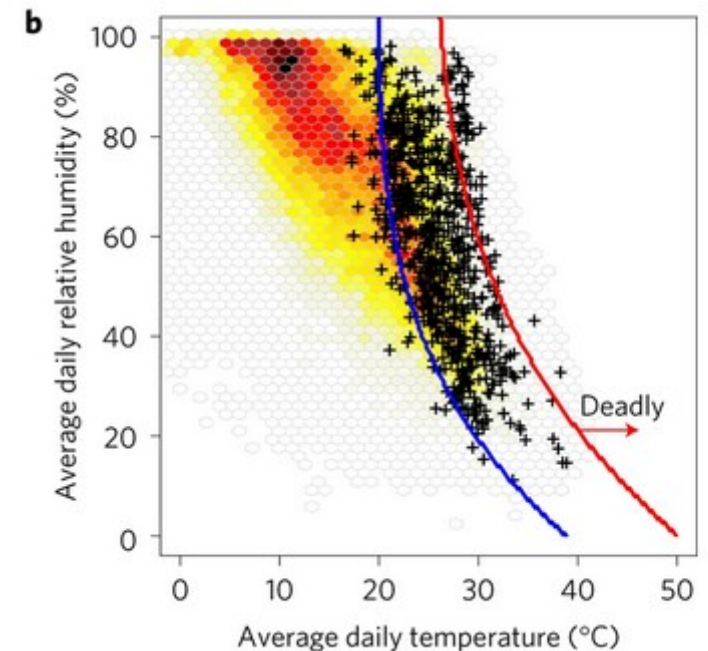
- Examen de ~ 900 articles publiés entre 1980 et 2014
 - 783 cas de surmortalité humaine dans 164 villes et 36 pays
 - les conditions climatiques ont été utilisées pour identifier le seuil létal de température et d'humidité



Vagues de chaleur documentées et étudiées

<https://maps.esri.com/globalriskofdeadlyheat>

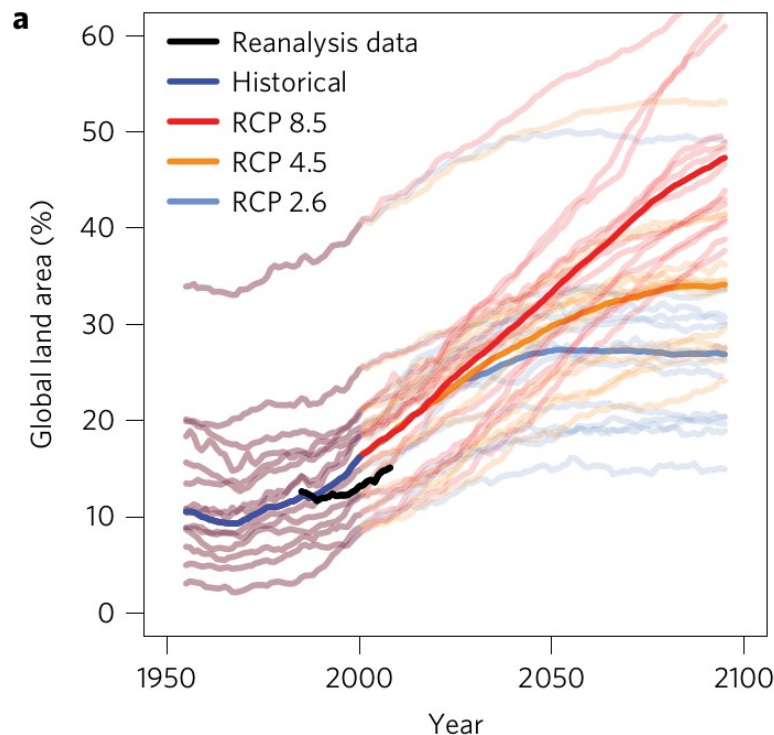
(Mora, Dousset et al., 2017)



- + Moyenne journalière Tair, H rel. lors d'épisodes de chaleur mortelle
- Évènements thermiques non-mortels
 - Seuil SVM: létal/ non-létal
 - 95% probabilité seuil SVM

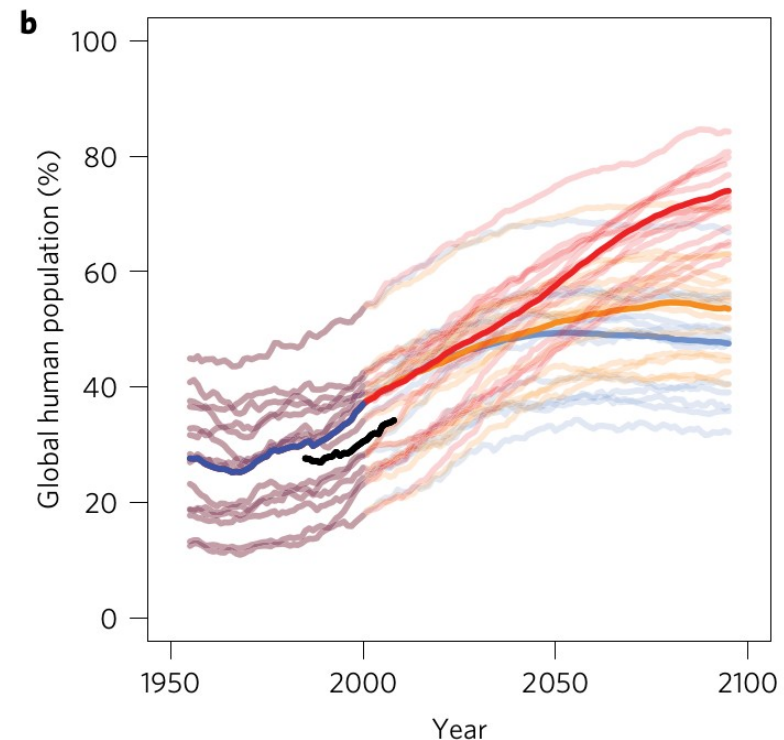
Conditions climatiques mortelles, courantes et projetées

Exposition à la chaleur mortelle ≥ 20 jours /an, projetée à partir du seuil de 95% probabilité des canicules mortelles passées, 4 scénarios CMI-P5 et 20 modèles Système Terre



2017 16% de la planète

2100	RCP 2.6	27%
	RCP 8.5	47%



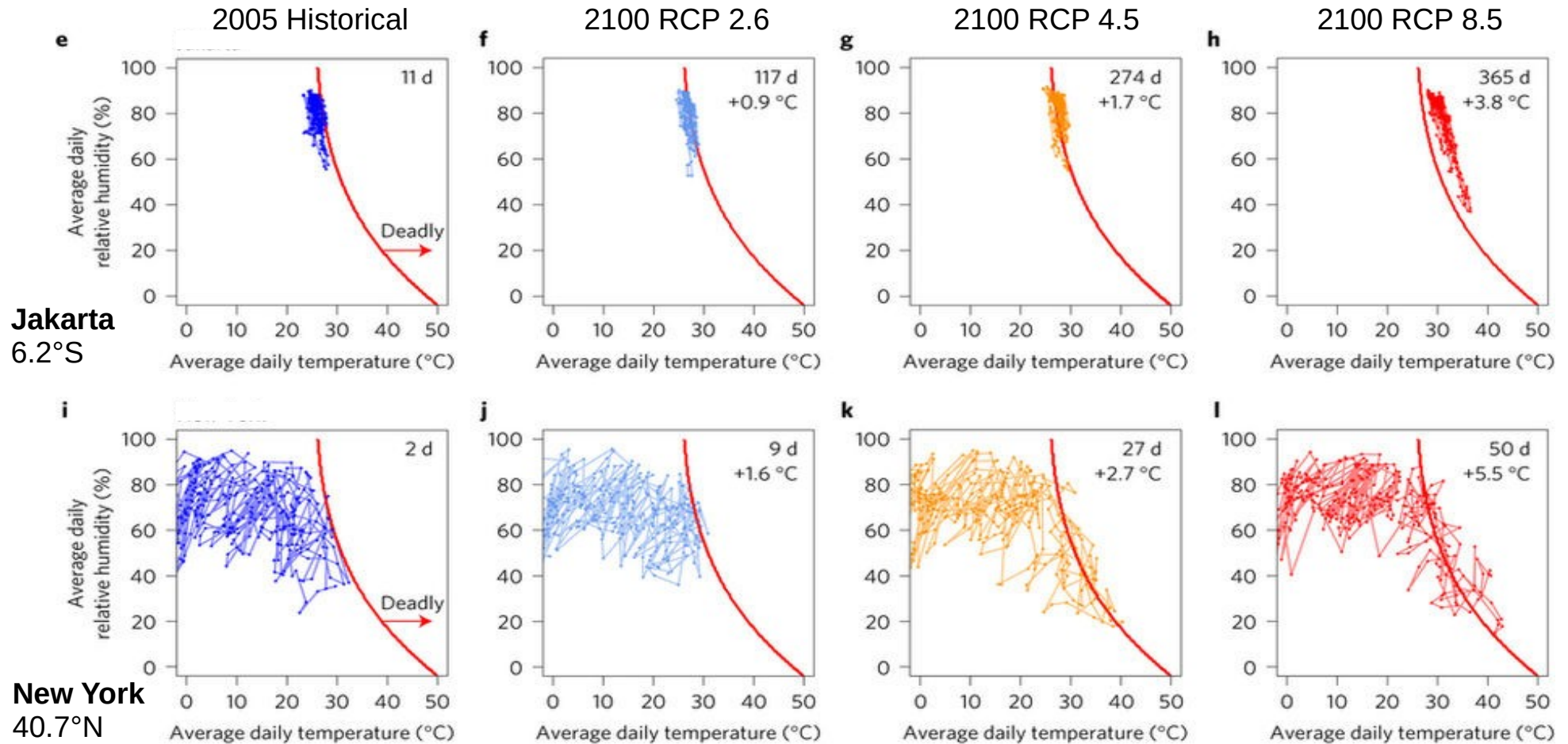
37% de la population mondiale

48 %
74%



(Mora, Dousset et al., 2017)

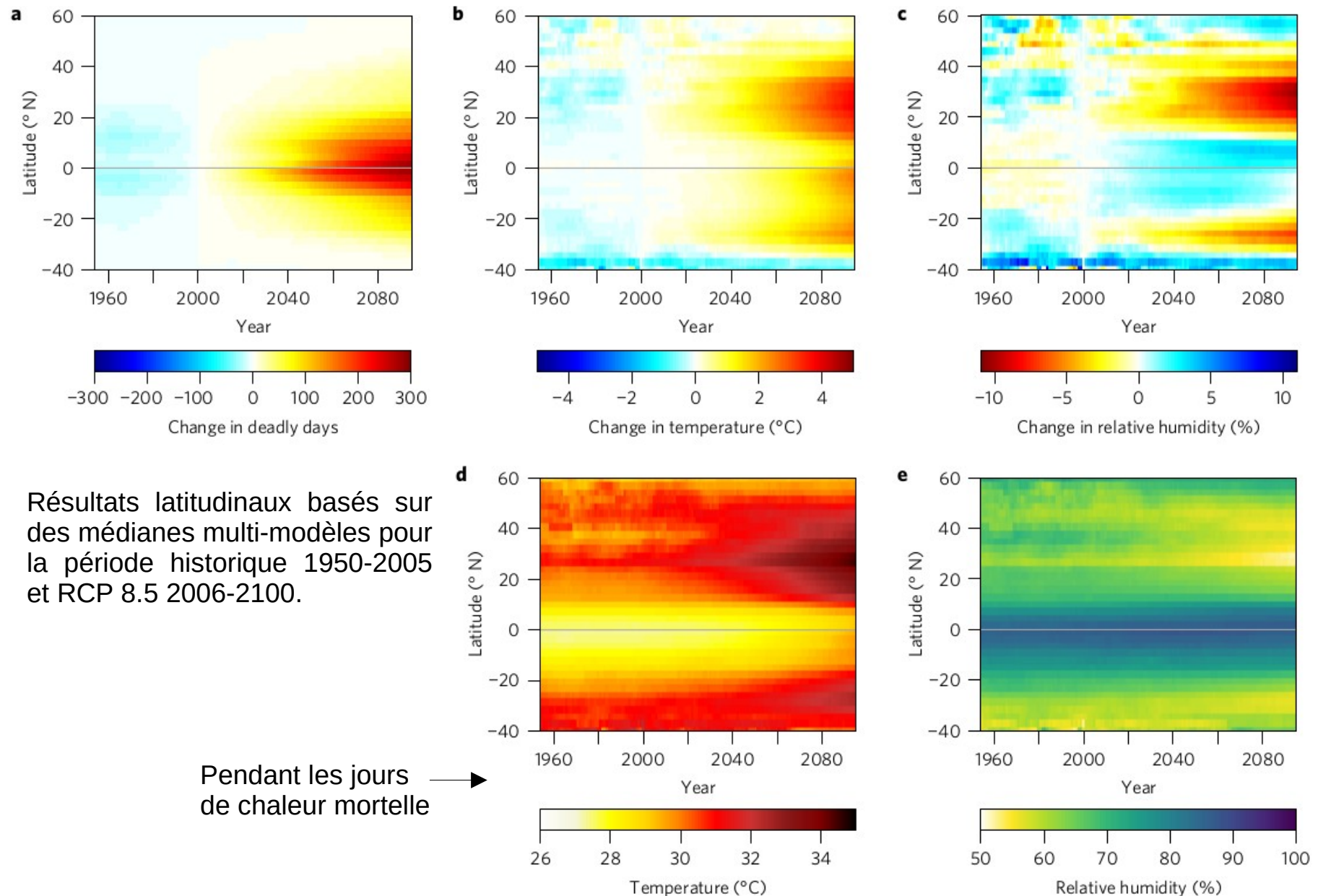
Risque climatique mortel selon la latitude



T.air & H.rel chaque jour de l'année, 2005 & 2100 (RCP 2.6, 4.5, 8.5). N^{bre} de jours > seuil mortel, (CSIRO-Mk3-6 modèle climatique), ΔT 2100 -2005.

Chaleur mortelle 2100, RCP 8.5 : Jakarta toute l'année, New York ~ 50 jours
Zones tropicales humides : moins de réchauffement mais plus de jours mortels

Simulation de changements spatio-temporels des conditions climatiques mortelles dans les modèles du système terrestre

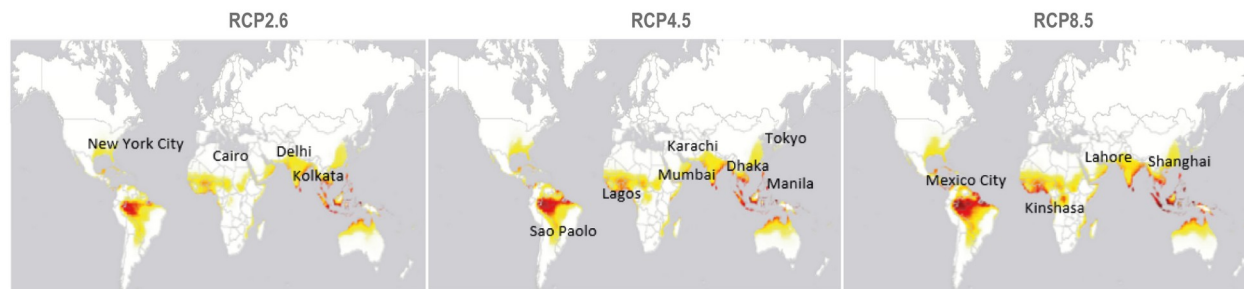


Répartition mondiale de la population exposée à l'hyperthermie due à la chaleur extrême et à l'humidité

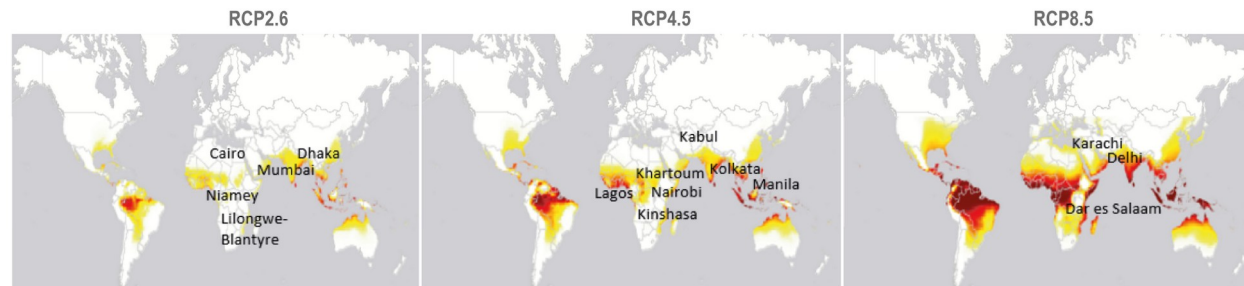
2020



2050



2100



Rapport de synthèse du GIEC destiné aux décideurs politiques, 2023. Fig. 6003

- 2020, et projections pour 2050 et 2100. Couleur : n^{bre} jours /an où Temp. et Hum. dépassent le seuil de conditions climatiques mortelles (*Mora, Dousset et al., 2017*).
- 15 agglomérations les + peuplées en 2020, 2050, 2100 (*Hoornweg et Pope, 2017*).

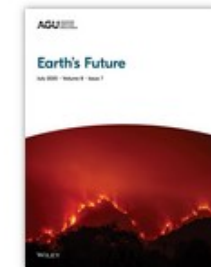
La fréquence, l'intensité et la durée des canicules ont-elles augmentées ? Quels en sont les dynamiques et les facteurs déterminants ?

Earth's Future

Research Article | [Open Access](#) | 

Rising Trends in Heatwave Metrics Across Southern California

Glynn C. Hulley  Benedicte Dousset, Brian H. Kahn

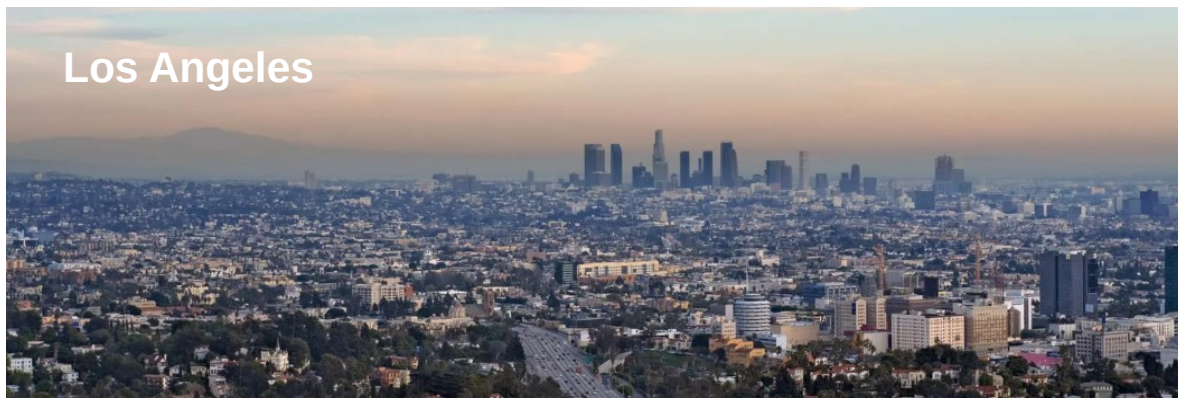


Volume 8, Issue 7
July 2020
e2020EF001480

Californie Sud : population ~24 millions

- Los Angeles 9.7 millions, San Diego 3.2 millions

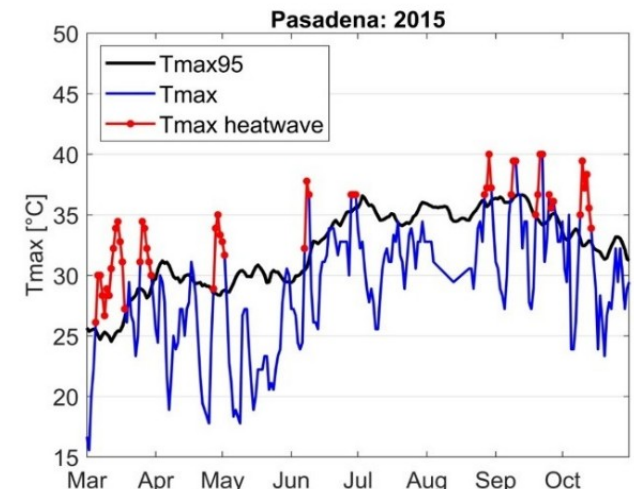
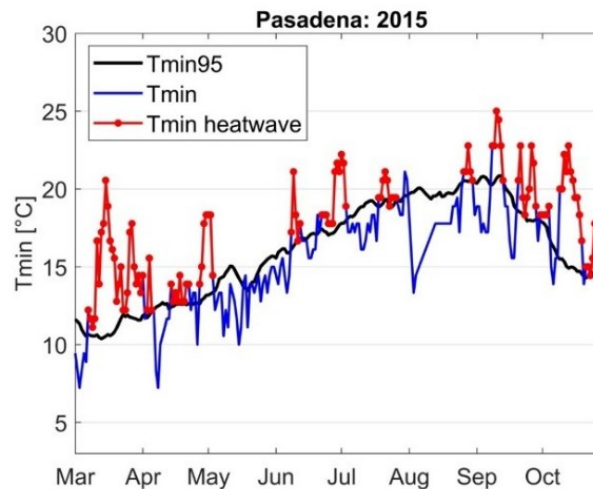
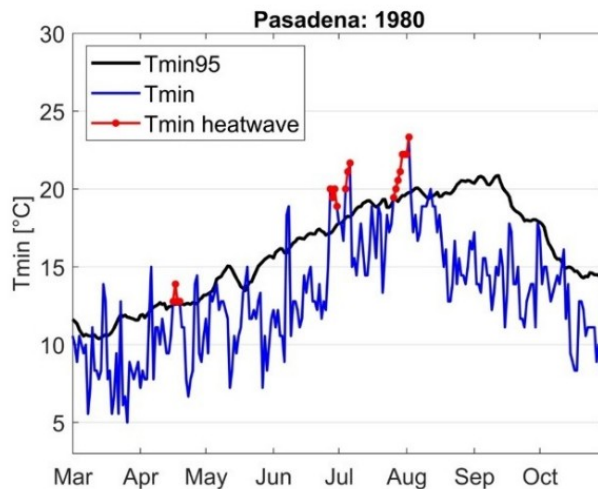
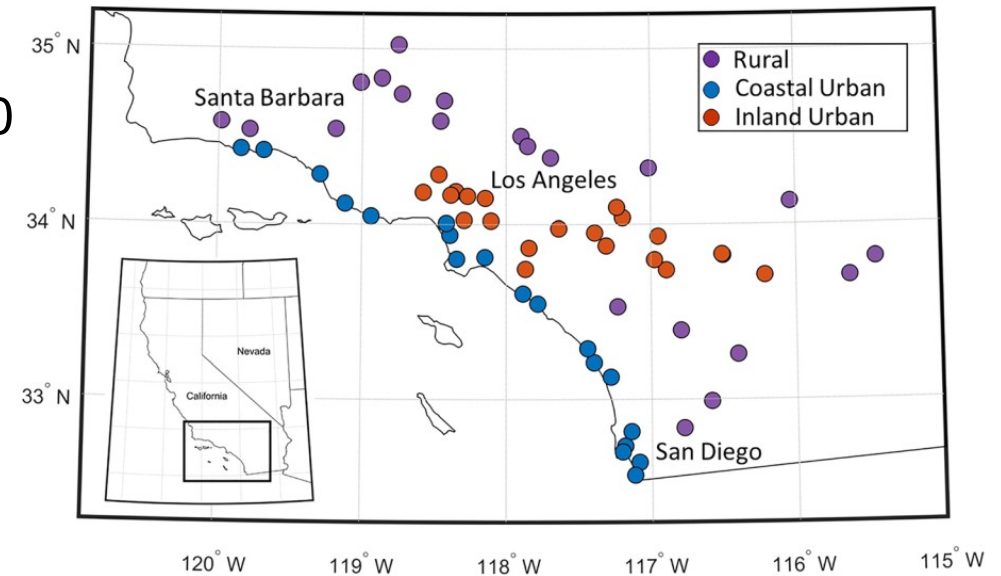
Topographie complexe, influences côtières → différents microclimats



Détection des vagues de chaleur en Californie Sud

Données climatiques :

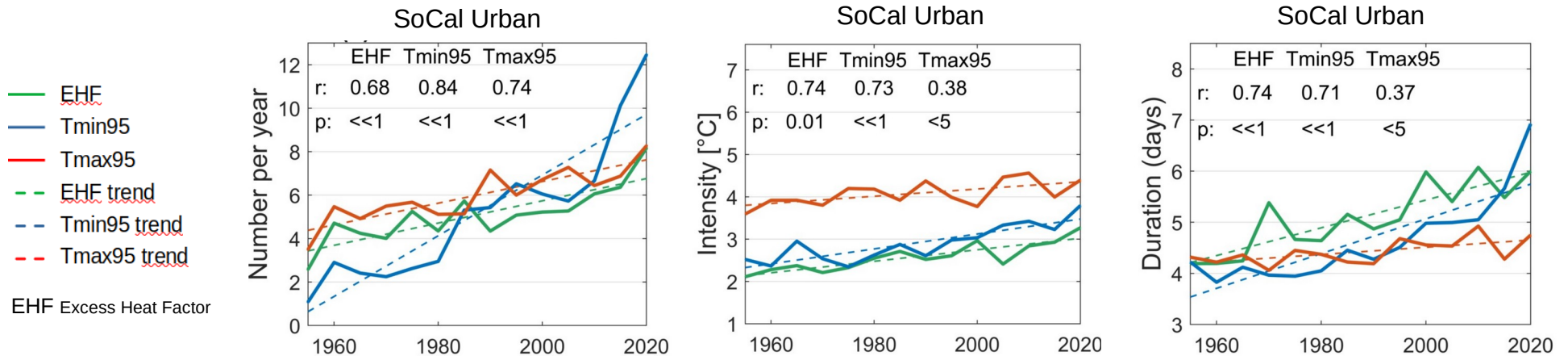
- 60 stations météo NOAA 1950-2020
- données de réanalyse
- indices de sécheresse
- Téléconnexion
 - Pacifique Nord SST anomalies
 - Pacific Decadal Oscillation (PDO)
 - El Niño-Southern Oscillation (ENSO)



Séries temporelles de températures : seuil de vague de chaleur Tmin95 et valeurs de **Tmin** et **Tmax** pour les vagues de chaleur détectées en 1980 & 2015 à Pasadena.

Tendances et saisonnalité 1950-2020

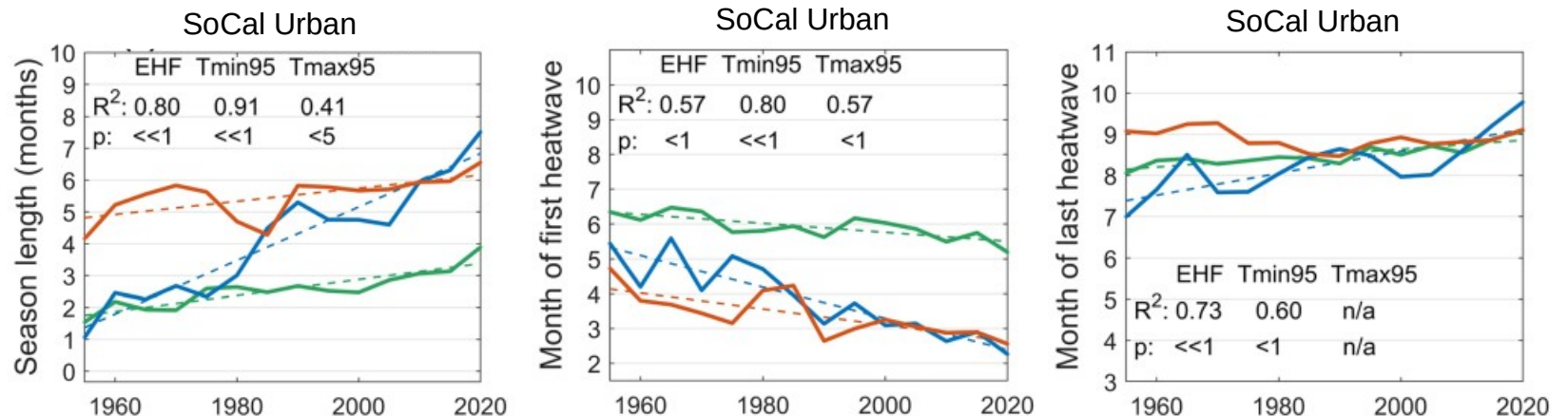
Dans les villes de Californie Sud (SoCal) la fréquence, l'intensité et la durée des canicules augmentent



Tendances : fréquence + 11

intensité + 1°C

durée + 3 jours



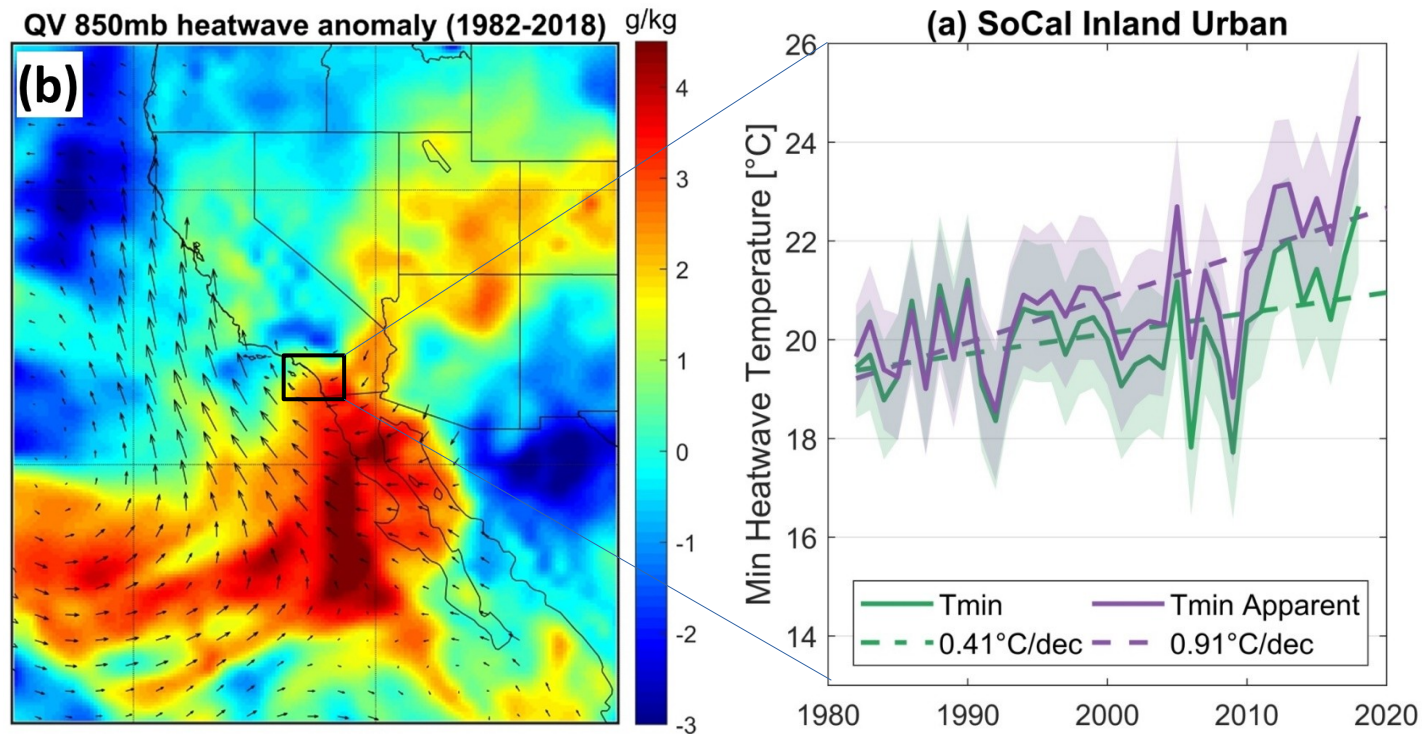
Durée de la saison : + 6 mois

3 mois plus tôt

~ 3 mois plus tard
+ risques d'incendie

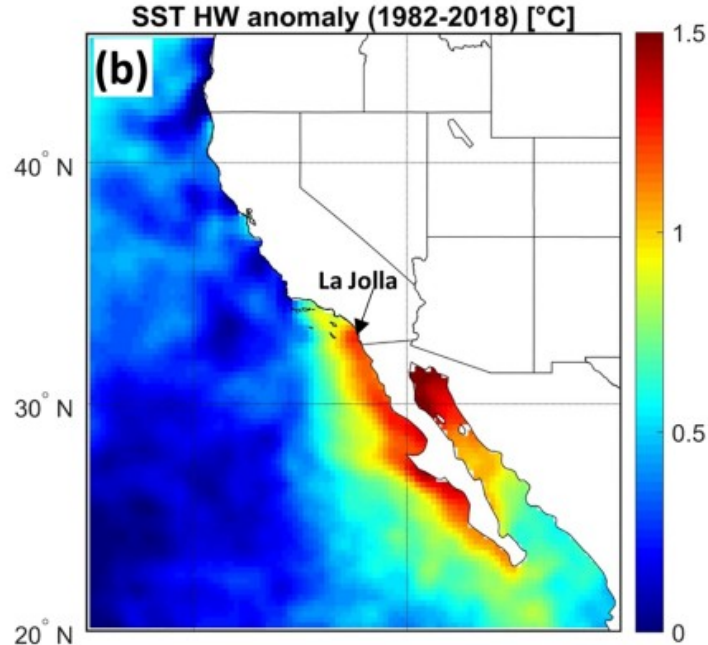
Impact de l'atmosphère océanique sur les canicules urbaines

- Au 21e siècle, forte tendance vers des épisodes de canicule nocturnes plus humides
- Tendance associée à une source d'humidité anormale au large des côtes de Basse-Californie.



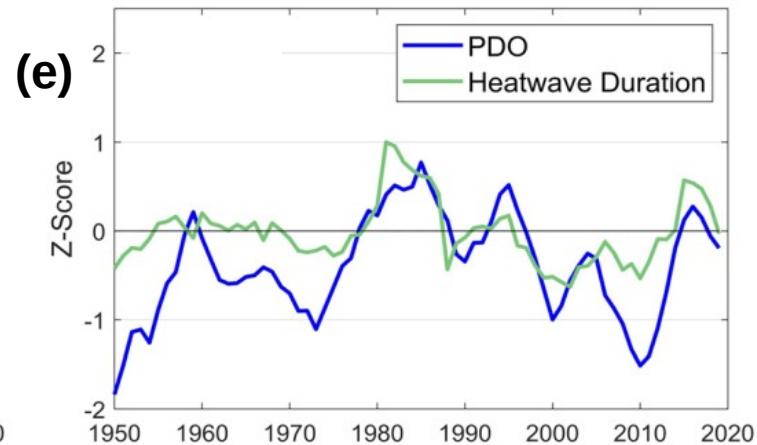
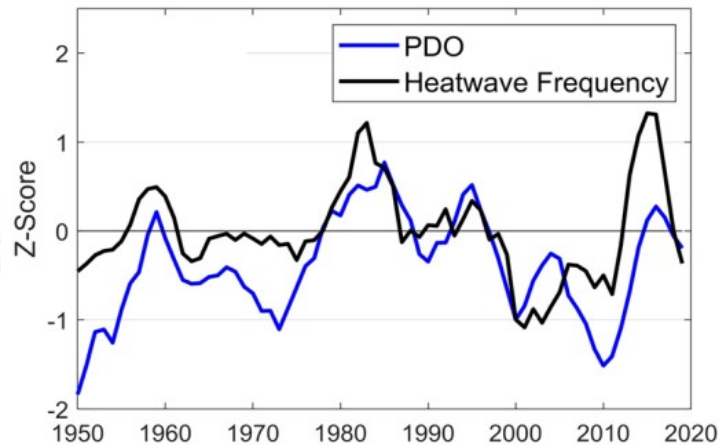
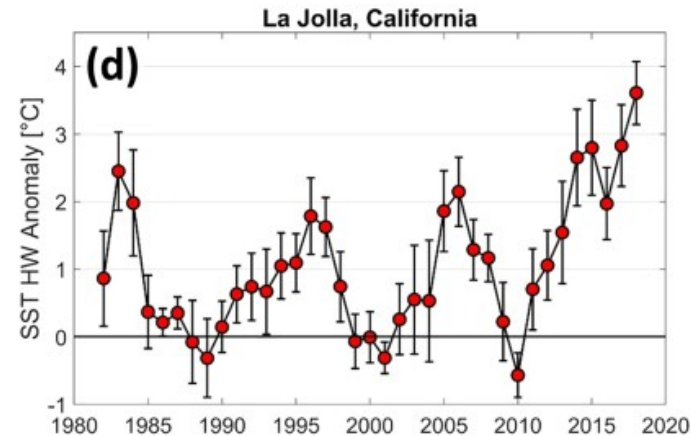
Anomalies d'humidité caniculaires 1982-2018 : **(b)** Anomalie d'humidité spécifique QV 850mb, **(a)** $T_{\min} + 0.41^{\circ}\text{C /décennie}$ et $T_{\min} \text{ ressentie} + 0.91^{\circ}\text{C /décennie}$

Impact des canicules marines sur les canicules urbaines



b. Anomalies de température de surface de l'océan (SST) durant les canicules de J-J-A 1982-2020.

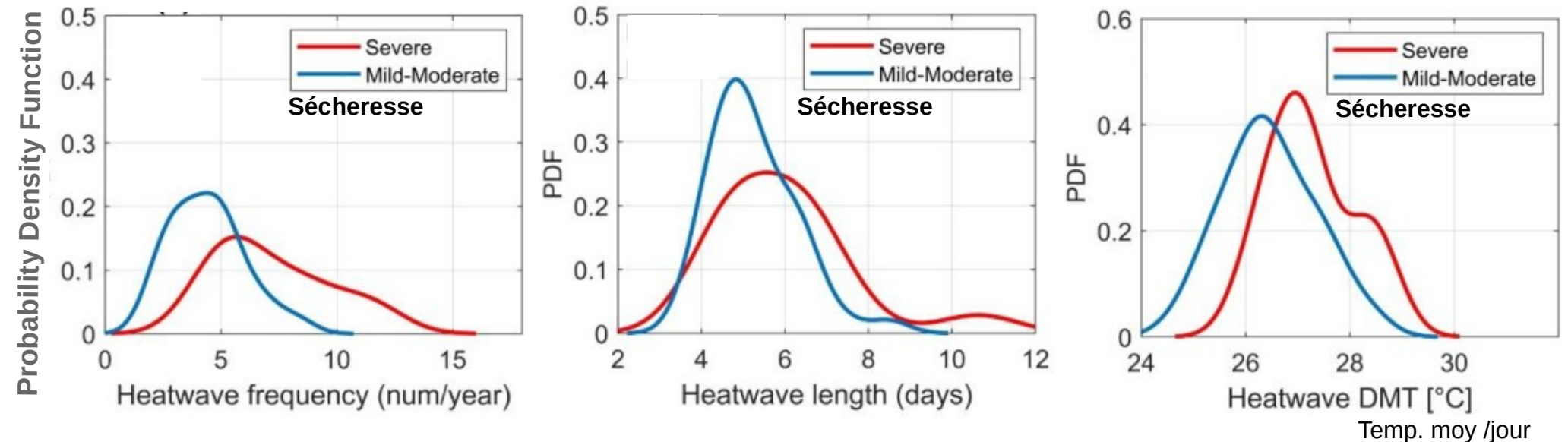
d. SST anomalies 1982-2020 au large de La Jolla



e. Téléconnexion. Fréquence & durée des canicules vs. Pacific Decadal Oscillation, région urbaine côtière 1950-2020. Fréquence et durée + élevées durant la phase chaude du PDO, **quelles que soient les phases ENSO**. Temp. élevée J.J.A. sur la côte, prévisible à partir des phases printanières du PDO.

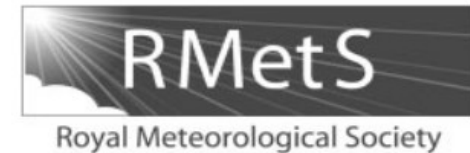
Mémoire du sol, sécheresse et canicules

- Le déficit pluviométrique, le fort rayonnement incident et l'aridification augmentent la chaleur sensible → **persistance de la canicule**.
- **Sécheresse sévère**: probabilité des canicules + 42 % en fréquence et + 26 % en durée → **risques d'incendie**.
- 2008-18: la pollution des feux de forêt a tué > 52.000 personnes en Californie



Peut-on mesurer la variabilité spatio-temporelle des climats urbains lors des canicules pour instaurer des stratégies de résilience et d'atténuation appropriées ?

INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY
Int. J. Climatol. **31**: 313–323 (2011)
Published online 13 September 2010 in Wiley Online Library
(wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.2222



Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area

Bénédicte Dousset,^{a,b*} Françoise Gourmelon,^b Karine Laaidi,^c Abdelkrim Zeghnoun,^c
Emmanuel Giraudet,^b Philippe Bretin,^c Elena Mauri^d and Stéphanie Vandentorren,^c



Research

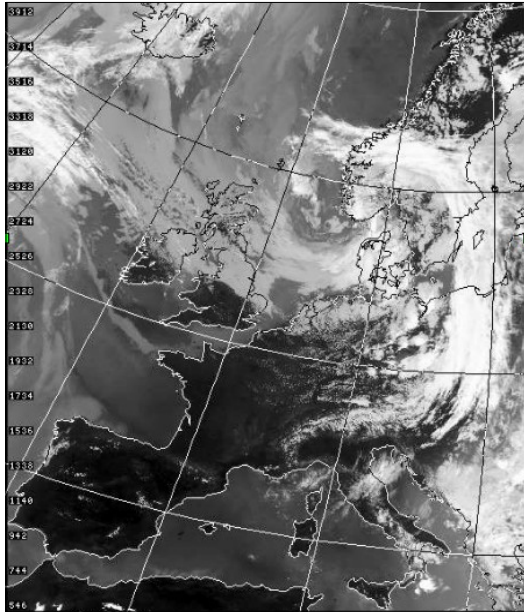
Volume 120 | number 2 | February 2012 - **Environmental Health Perspectives**

The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave

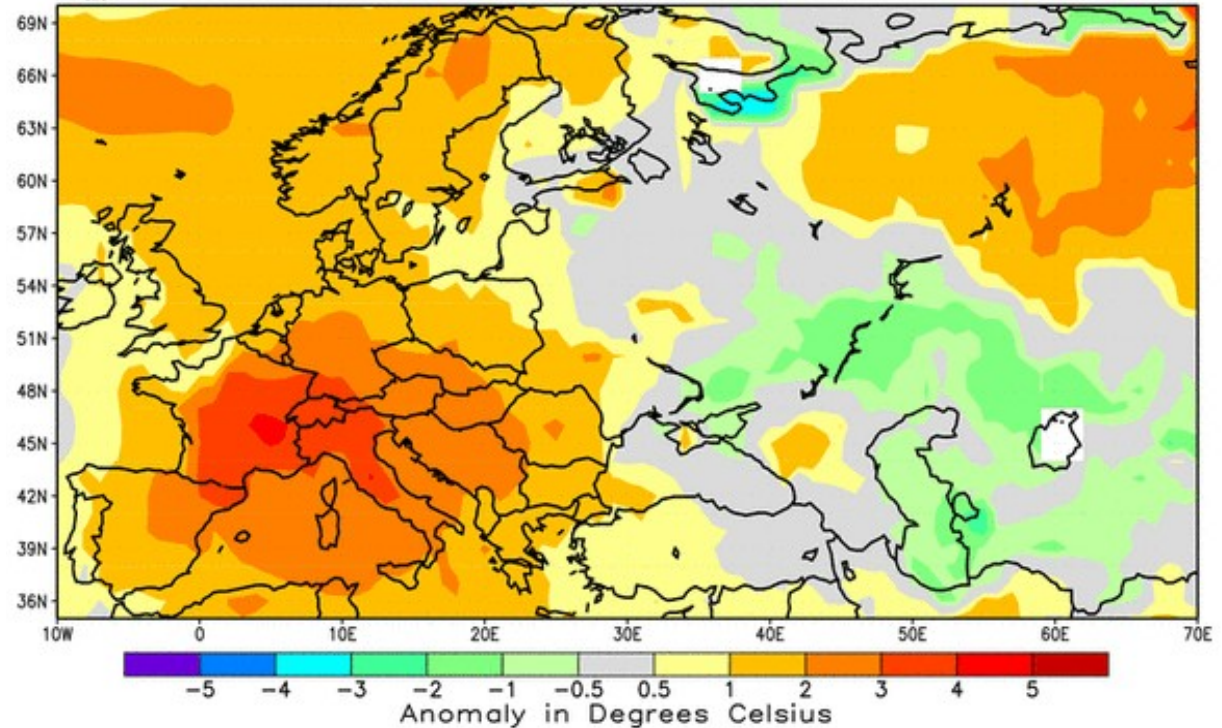
Karine Laaidi,¹ Abdelkrim Zeghnoun,¹ Bénédicte Dousset,^{2,3} Philippe Bretin,¹ Stéphanie Vandentorren,¹
Emmanuel Giraudet,³ and Pascal Beaudeau¹

Canicule de l'été 2003 en Europe

NOAA-AVHRR CH-4 AUG. 10 2003



JUN - AUG 2003 SURFACE TEMPERATURE ANOMALIES
VALUES ARE A BLEND OF SATELLITE AND IN SITU OBSERVATIONS
CLIMATOLOGICAL BASE PERIOD IS 1988 - 2003



- Anticyclone persistant > 4°C anomalie

Printemps 2003 : déficit pluviométrique, fort rayonnement incident,
→ activation précoce de la végétation → réduction de l'humidité du sol
→ persistance de la canicule

- 70 000 décès en Europe dont 15 000 en France

Risques de santé liés aux températures extrêmes

- **Exposition :**

longue exposition > 35°C → **hyperthermie**

les températures extrêmes excèdent la thermorégulation humaine

- température > 37°C empêche la dissipation de la chaleur métabolique
- forte humidité décroît l'efficacité de la transpiration

- **Vulnérabilité :**

Physiologique

- maladies chroniques, obésité, médicaments, âge : jeunes enfants (déshydratation) ; personnes âgées (dérèglement de la thermorégulation et de la perception de la chaleur)

→ **épuisement, décès**

Sociale et économique

- isolation, dépendance, faibles revenus

Professionnelle

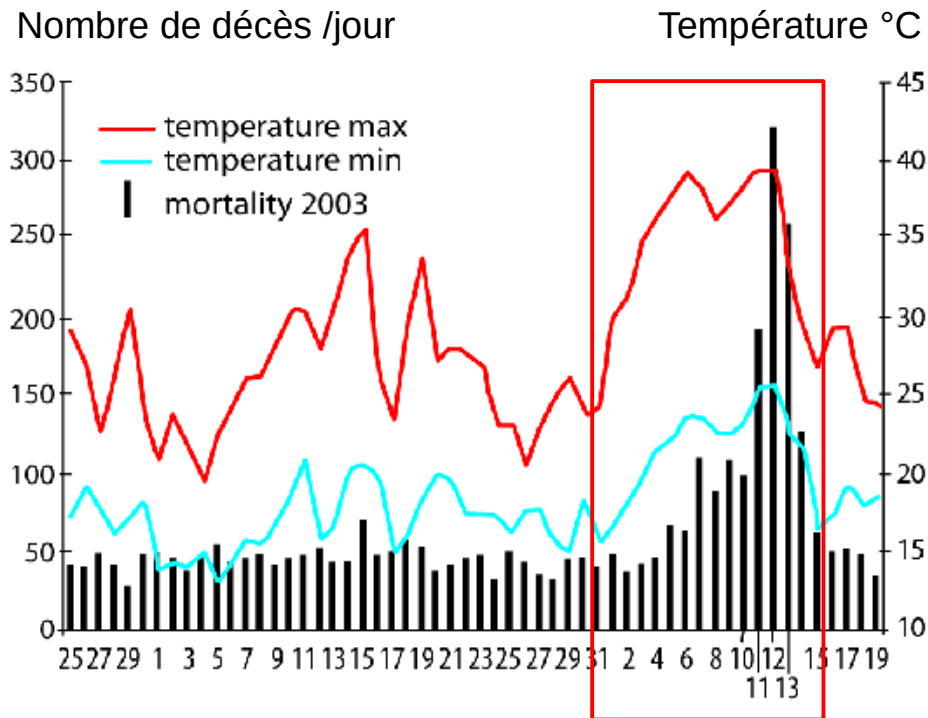
- travail en plein air, efforts physiques

→ **coup de chaleur, hyperthermie**



Impact de la canicule d'Août 2003 à Paris

1-15 Août : 4867 décès excédentaires



Rungis Aout 2003 (AFP T.Coex)

- Observer la variabilité spatio-temporelle des microclimats en temps réel, réduire leurs incertitudes et en comprendre les causes pour les anticiper

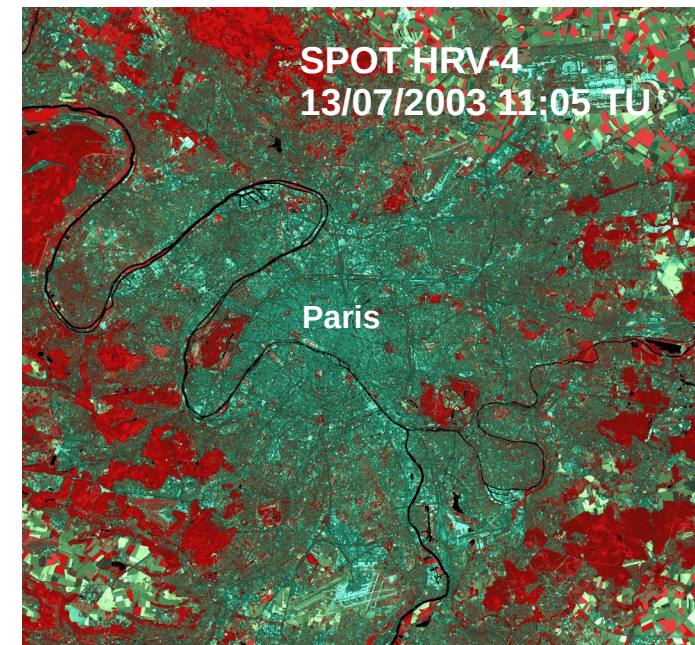
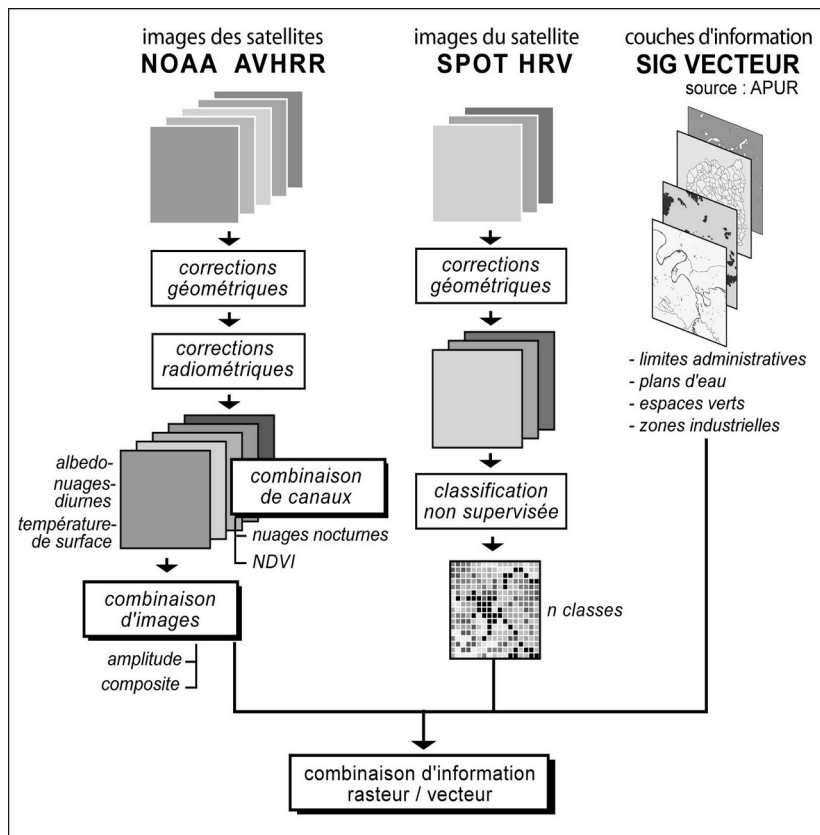
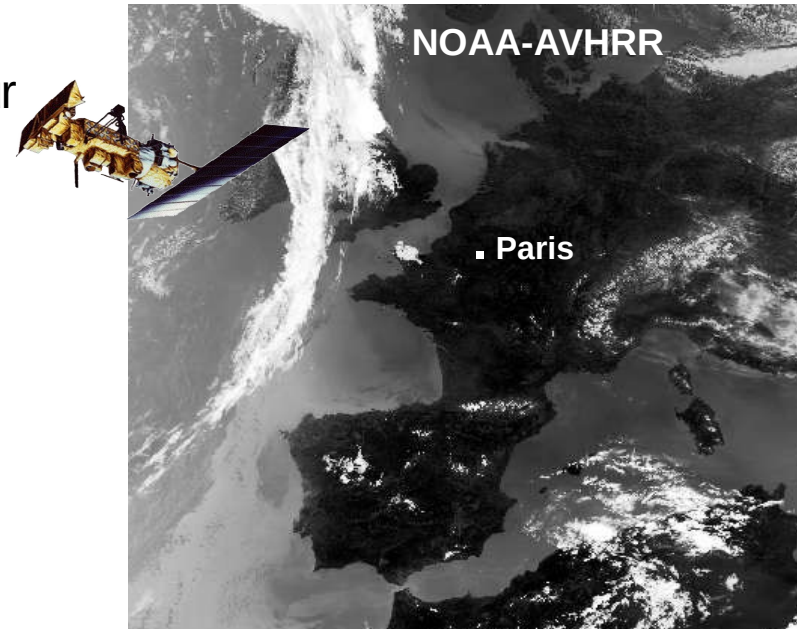
Observation par satellites des variables climatiques

- **NOAA-AVHRR 12, 16, 17**

76 images 20/07-20/08 2003, ~6 images infrarouges /jour
1.1 km de résolution spatiale
- Température de surface, Albédo, Index de végétation

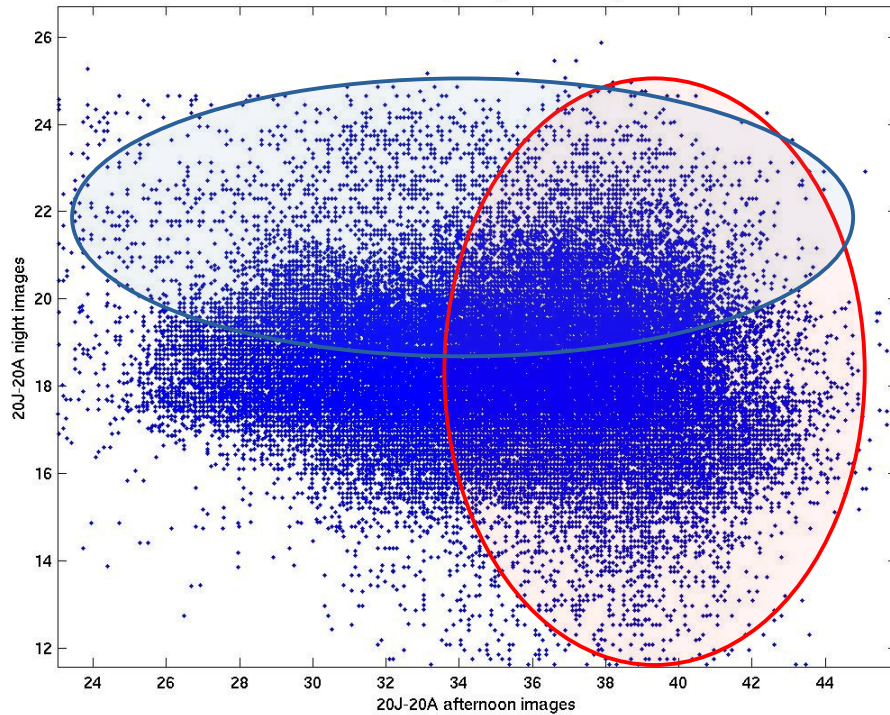
- **SPOT 4 HRV**

1 image 13/07 2003, Visible, 20 m de résolution spatiale
- Index de végétation, Classification des sols



Étapes d'acquisition et de traitement des données

Observation par satellites et in-situ, Paris Août 2003



Températures de surface **nu**it / **apr**ès-midi
76 images 20/07-20/08 2003

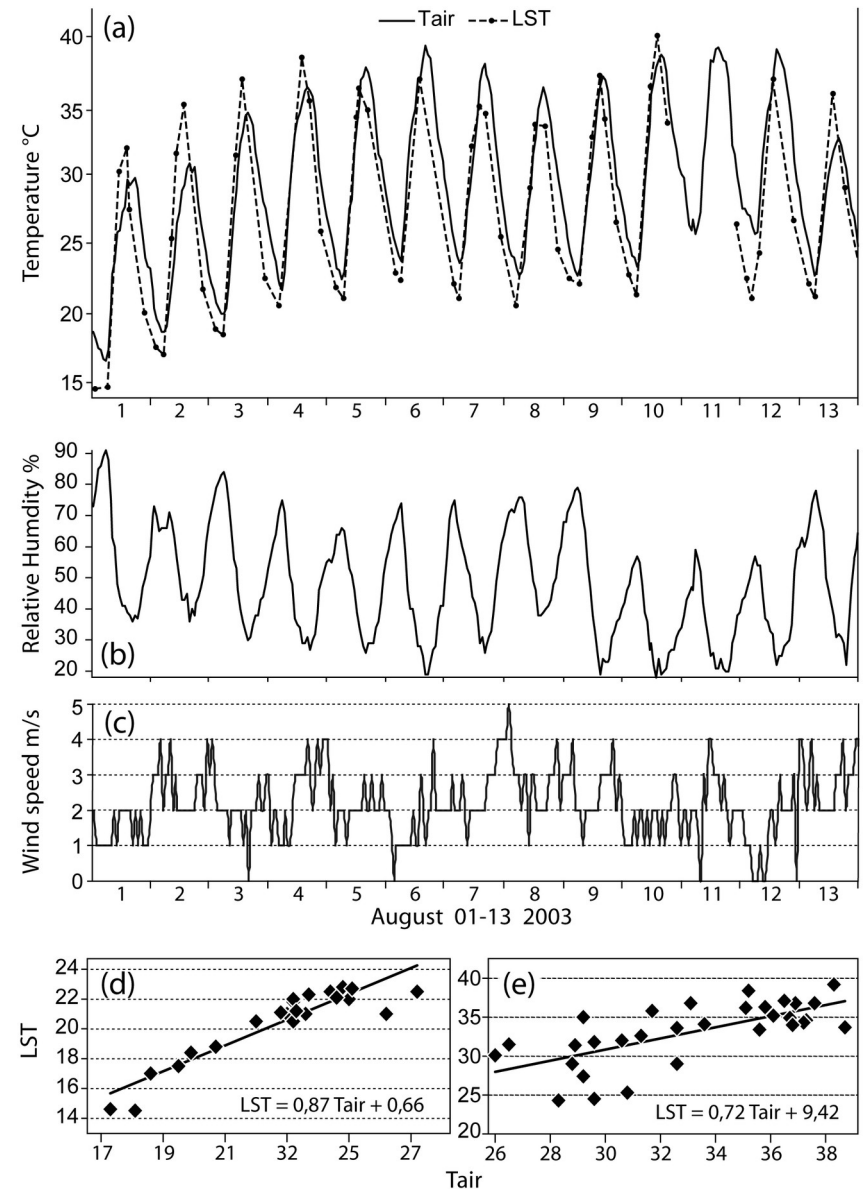
Station: Parc Montsouris 1-13/08 2003

a) Temp.air et Temp.surf.

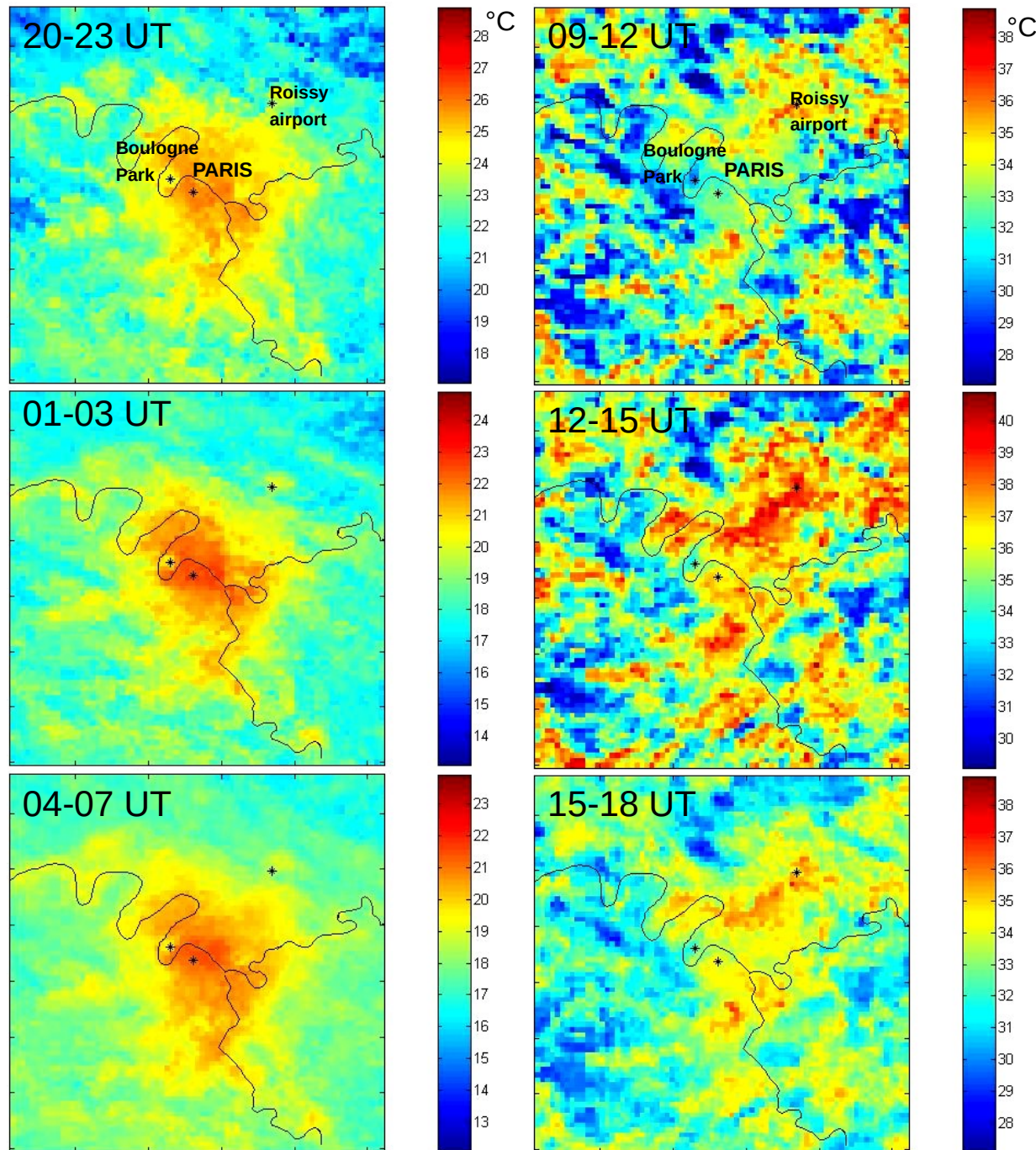
b) Humidité relative

c) Vitesse du vent

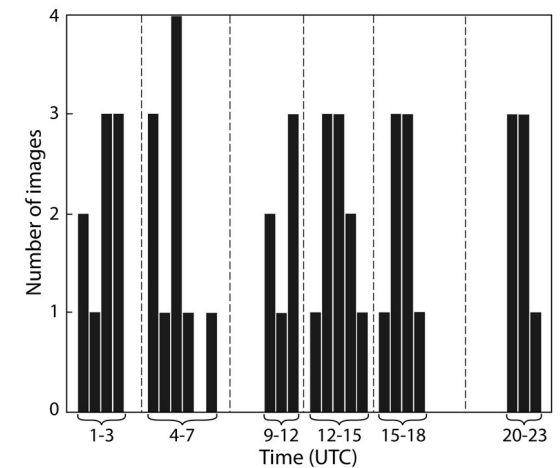
Temp.surf. vs. Temp.air d) nuit, e) jour



Exposition à la chaleur, Paris Août 4-13 2003



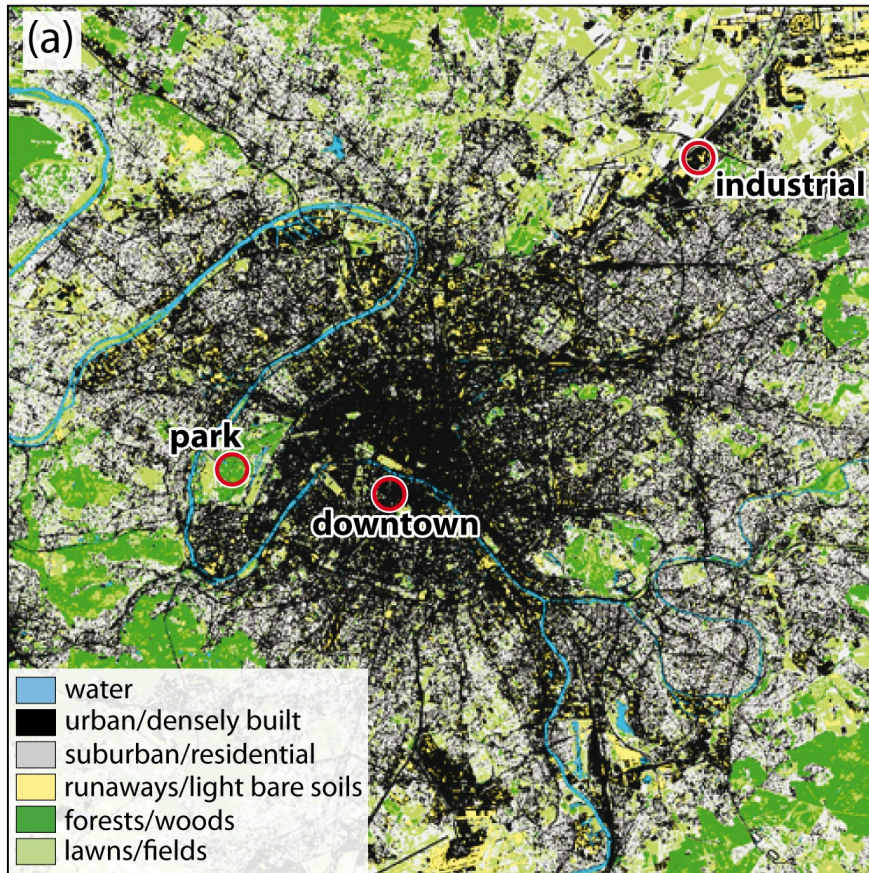
6 images composites construites à partir de 50 images infrarouges NOAA-AVHRR ch.4



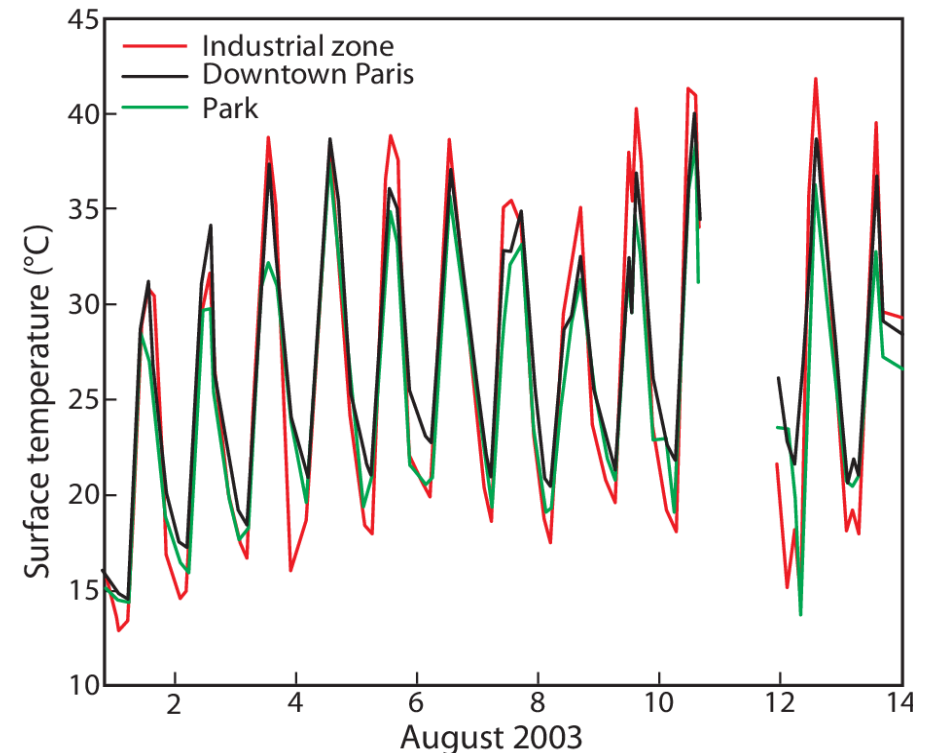
Distribution des 50 images

(Dousset et al., 2007; Dousset et al., 2011)

Cycle diurne des températures de surface



Classification des sols de Paris, image SPOT-HRV du 13/ 07/ 2003, 20m de résolution



Cycles diurnes des températures de surface à Paris 1 - 13 Août 2003, 50 images IR NOAA-AVHRR ch.4



Industries /transport



Centre ville



Parc

(Dousset et al., 2011)

Ilots de chaleur et occupation du sol

Couches d'information à 250m de résolution spatiale

- albedo
- % bâti
- végétation
- hydrologie
- densité de population
- aires industrielles
- transportation

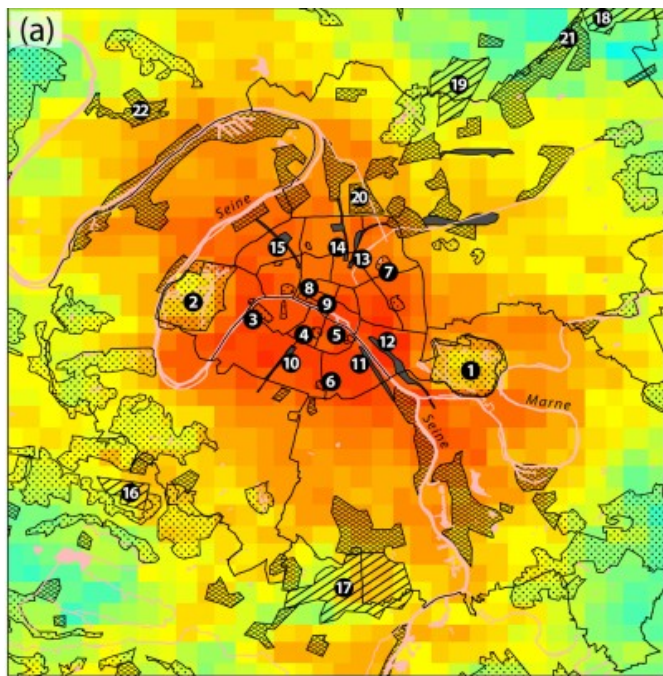
a) **Température de surface nuit**
moyenne de 9 images 1-3 UTC

$\Delta T > 8^{\circ}\text{C}$ Paris centre

b) **Température de surface jour**
moyenne de 10 images 12-15 UTC

$\Delta T > 10^{\circ}\text{C}$ zones industrielles

- $+1^{\circ}\text{C}$ de température régionale intensifie l'îlot de chaleur de $+0.17^{\circ}\text{C}$



Parks :
1 - Bois de Vincennes
2 - Bois de Boulogne
3 - Champs de Mars
4 - Jardin du Luxembourg
5 - Jardin des Plantes
6 - Parc Montsouris
7 - Buttes Chaumont
8 - Jardin des Tuileries

Courtyard :
9 - Palais du Louvre

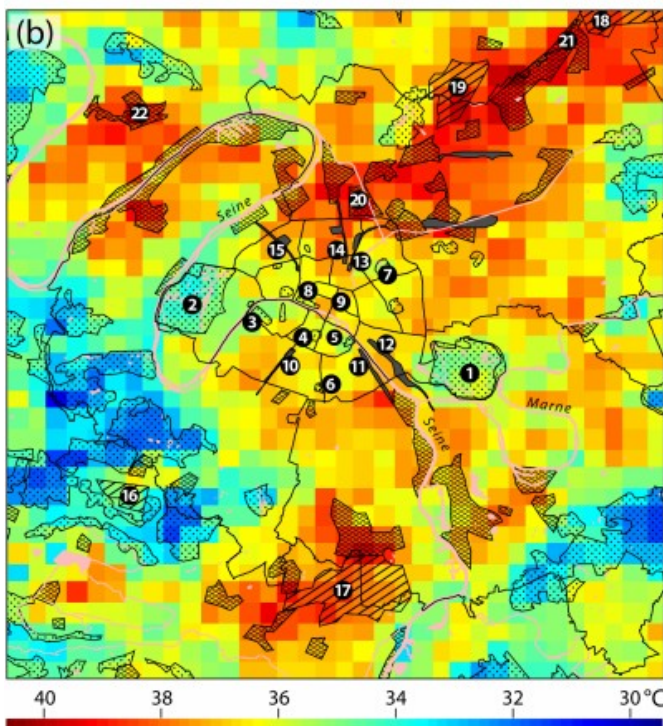
Railway stations :
10 - Montparnasse
11 - Austerlitz
12 - Lyon
13 - Est
14 - Nord
15 - St Lazare

Airports :
16 - Vélizy
17 - Orly
18 - Roissy
19 - Le Bourget

Industrial areas :
20 - La Plaine St Denis
21 - Paris Nord
22 - Val d'Argenteuil

park, forest, wood
industrial area
airport
railway
river, lake
administrative apportionment

0 3 6 km



2 Bois de Boulogne



3 Paris : Champ de Mars



11 Austerlitz railway station



9 Paris : Palais du Louvre



15 Paris : Place de l'Etoile



20 St Denis industrial area

Adaptation et résilience urbaine

La distribution spatiale des plus hautes températures de nuit correspond aux plus hauts taux de mortalité

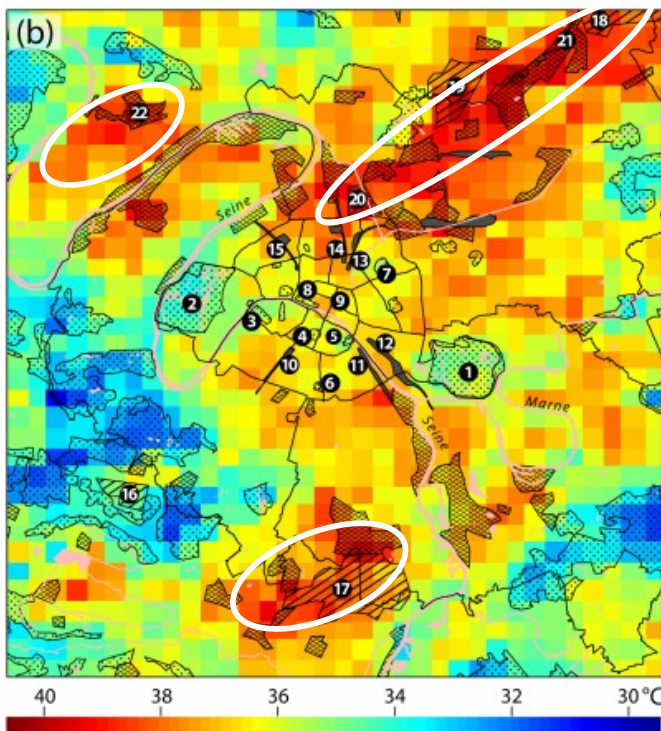
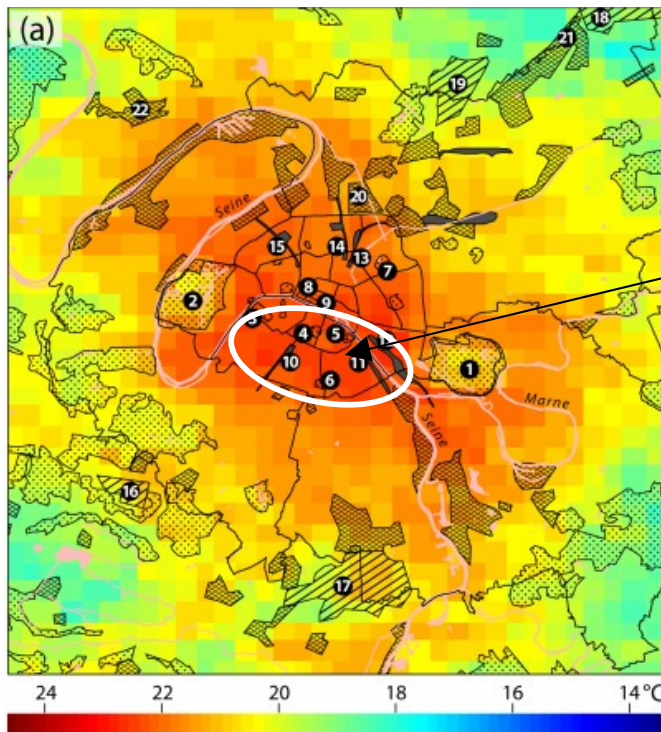
Anticiper les risques

- comprendre la variabilité spatio-temporelle des microclimats urbains, causes et effets
- localiser les seuils critiques de température
- assimiler les données dans les modèles numériques et scénarios d'adaptation

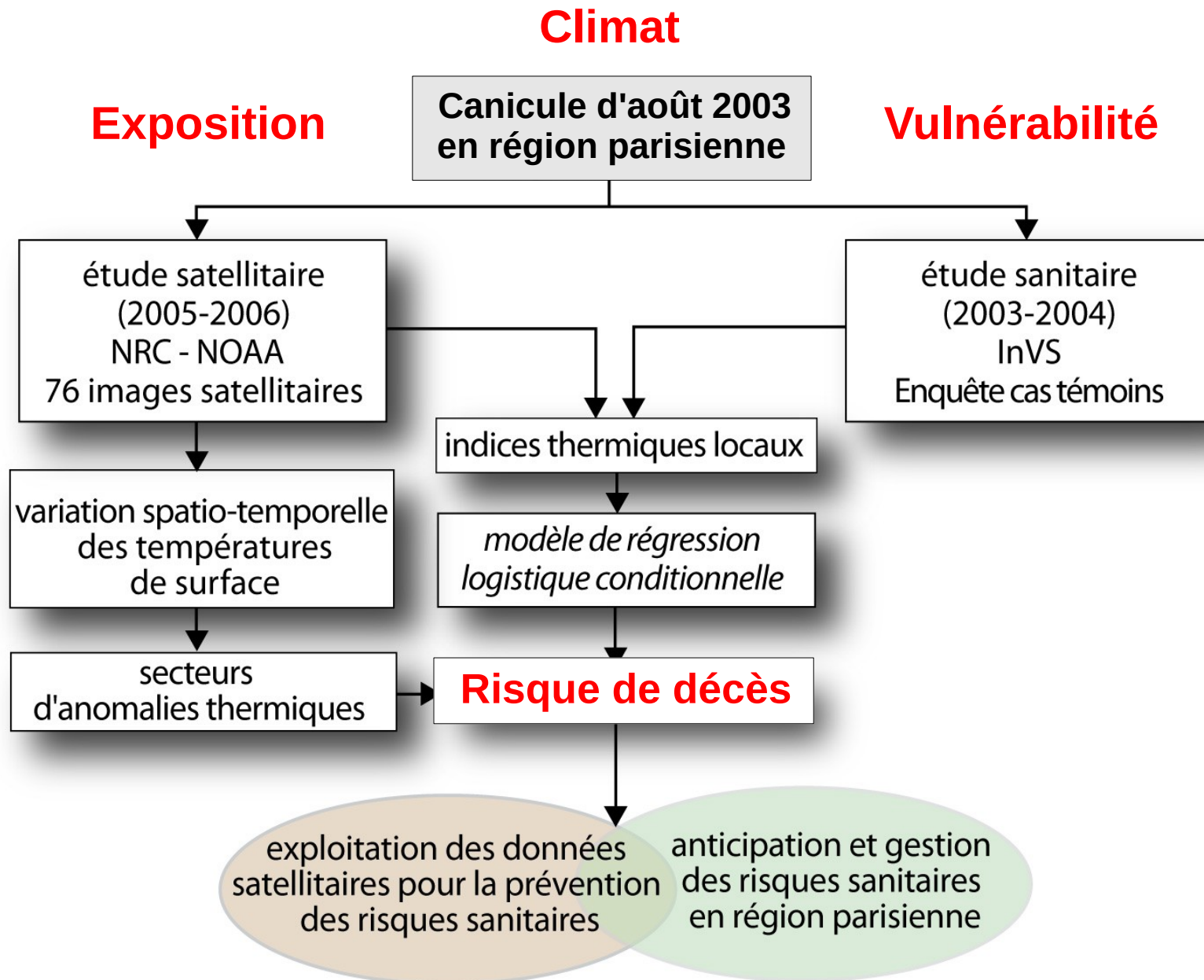
Gérer les risques

- améliorer les systèmes d'alerte et de planification d'urgence
- assister les personnes vulnérables
- interrompre le travail physique dans les zones à risque ...

Résultats intégrés dans "L'évaluation environnementale 2012 du schéma directeur de la région Ile de France 2030".

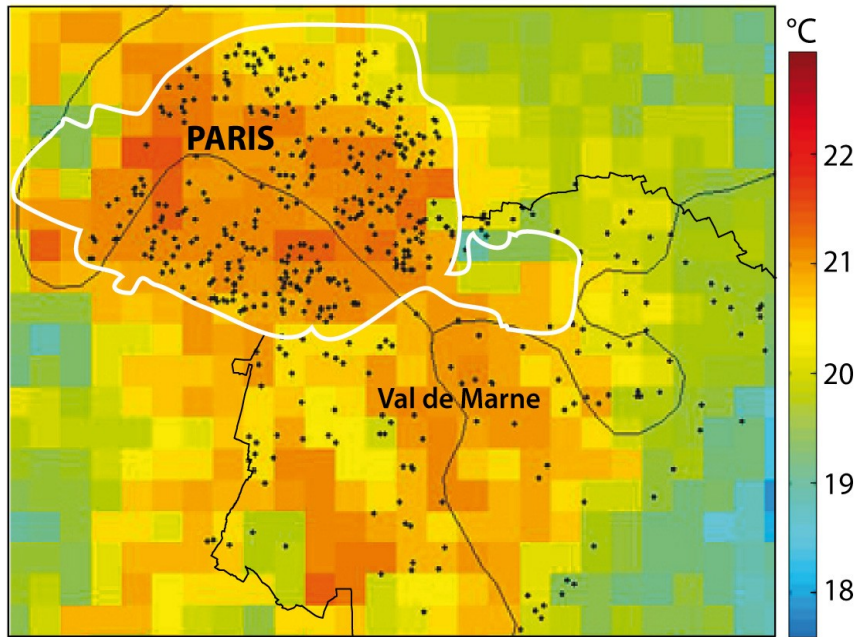


Estimation des risques sanitaires



(Dousset et al., 2011 ; Laaidi et al., 2012)

Estimation de la surmortalité des personnes âgées



Distribution des 482 adresses sur une image infra-rouge de nuit, NOAA-AVHRR



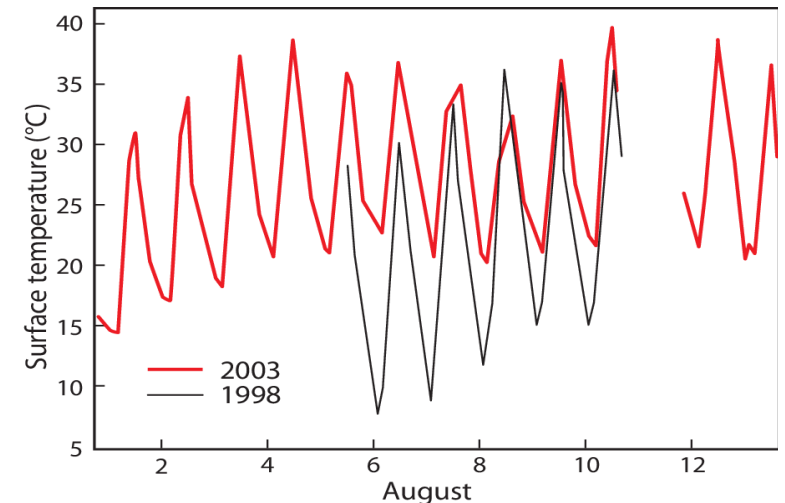
- Personnes âgées de > 65 ans résidant à domicile lors de la canicule
 - **482 cas**: 241 décès du 8-13 Août et 241 cas témoins
- Images satellites du 1-13 Août
 - **indice thermique**: température du pixel à l'adresse du cas / témoin intégré au modèle de régression logistique ajusté pour différents facteurs de risque

(Dousset et al., 2011 ; Laaidi et al., 2012)

Impact des températures de nuit sur la mortalité des personnes âgées

- Les résultats significatifs correspondent aux températures minimales
- A Paris une hausse de **0.5°C la nuit durant 1 semaine double le risque de décès** des personnes > de 65 ans

Température de surface NOAA-AVHRR	ΔT . cas / témoins	OR (95% CI)
<i>Intervalle du 1 au 13 Août</i>		
Temp. Maxima	0.97°C	1.2 (0.61, 2.72)
Temp. Minima	0.41°C	2.17 (1.14, 4.16)
Temp. Moyennes	0.37°C	1.71 (0.94, 3.11)
<i>Intervalle de 6 jours jusqu'au jour du décès</i>		
Temp. Maxima	0.92°C	0.93 (0.51, 1.69)
Temp. Minima	0.51°C	2.24 (1.03, 4.87)
Temp. Moyennes	0.46°C	1.34 (0.71, 2.51)
<i>Intervalle de 2 jours jusqu'au jour du décès</i>		
Temp. Maxima	1.25°C	0.91 (0.56, 1.47)
Temp. Minima	0.68°C	1.40 (0.67, 2.41)
Temp. Moyennes	0.27°C	1.06 (0.60, 1.89)



Température surf. du cycle diurne à Paris
 - Août 5-11, 1998 et **Août.1-13, 2003**
 - Seuil de température 31°C jour, 21°C nuit

Résultats du modèle de régression logistique conditionnelle pour les indices de température dérivés des données NOAA-AVHRR.

(Dousset et al., 2011 ; Laaidi et al., 2012)

En résumé

- En 2100 ~3/4 de la population mondiale pourraient être exposée ~20 jours par an à des températures mortelles si on ne réduit pas les émissions de gaz à effet de serre.
- La fréquence, l'intensité et la durée des canicules augmentent.
Californie Sud : intensification +1°C /déc. depuis 1980, corrélée en temps et lieu avec les canicules marines. Episodes de canicule plus précoces et plus tardifs qui augmentent les risques d'incendie.
- Les stratégies d'atténuation sont impératives pour minimiser le changement climatique, entre-temps l'adaptation est vitale pour assurer la résilience urbaine.
- Afin d'anticiper et gérer les canicules urbaines, on peut:
 - détecter la variation spatio-temporelle des climats urbains et des îlots de chaleur et identifier les secteurs à risques,
 - mesurer l'incidence des températures de nuit sur l'intensité de la canicule, évaluer les risques sanitaires des personnes vulnérables,
 - assimiler les données dans des modèles numériques pour implémenter des stratégies de résilience et d'atténuation appropriées.

Addendum

Quelles stratégies d'atténuation de chaleur en ville ?
quelques exemples



Quelles stratégies d'atténuation de chaleur en ville ?

- Réduire

- les émissions de GES, la chaleur anthropique, la demande énergétique e.g. transports, habitat, bâtiments publics, industries...
- l'utilisation des combustibles fossiles,
- les systèmes qui libèrent de la chaleur : e.g. les climatiseurs augmentent la température extérieure $> 1-1.5^{\circ}\text{C}$ la nuit.

- Augmenter

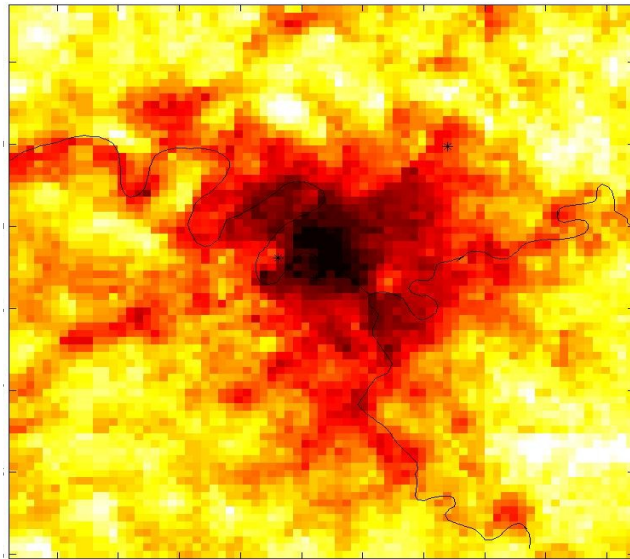
- la végétation, l'albedo, la ventilation, l'inertie thermique, la perméabilité de certains sols, la restitution des précipitations etc..
- l'efficacité énergétique,
- les innovations à faible teneur en carbone dans les transports, l'industrie ..

- Prendre en compte

- les ressources naturelles, le climat local et l'évolution du climat régional dans la planification urbaine.
- Penser le changement climatique et la conservation de l'environnement au-delà des techno-solutions et de l'ajustement des variables, évoluer vers plus de sobriété énergétique et modifier nos modes de vie ...

Stratégies locales d'atténuation de chaleur .1

- Augmenter l'albédo : i.e fraction du rayonnement solaire réfléchi



Paris NOAA-AVHRR albédo Août 2003
% de forçage négatif par rayonnement

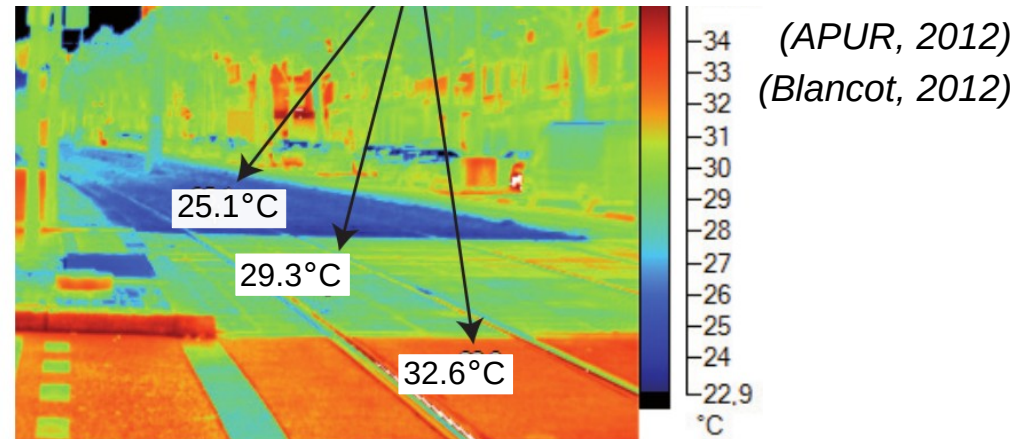
- sur les toits des bâtiments et les parkings
matériaux réfléchifs, peinture blanche →
économie d'énergie, réduction de climatisation



- pas sur les trottoirs et murs en zone piétonne
car le rayonnement solaire réfléchi augmente
la température ressentie par le passant.



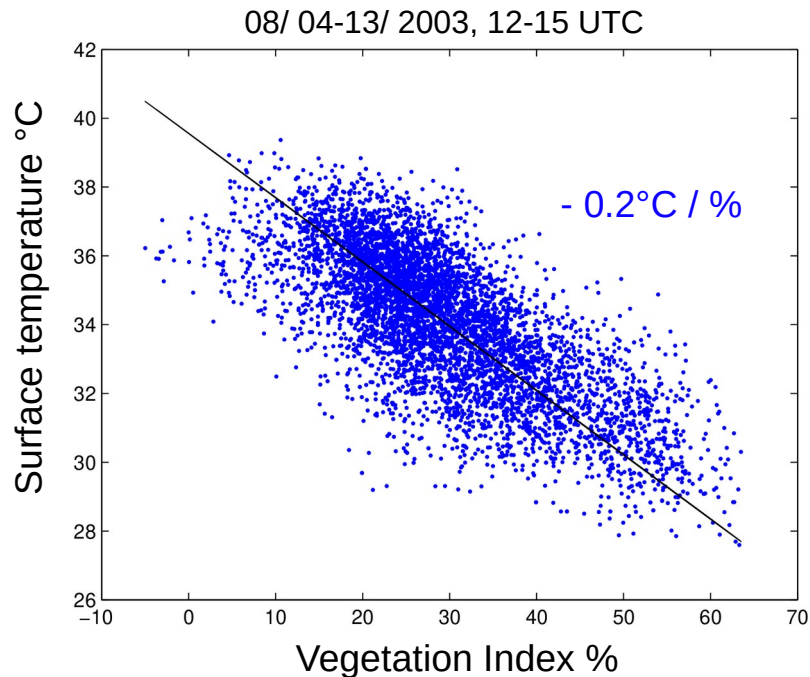
Paris



Thermographie infrarouge

Stratégies locales d'atténuation de chaleur .2

- Augmenter la végétation: ombre, évapotranspiration, chaleur latente



Paris : corrélation inverse, Température.surf vs % végétation photosynthétique

Paris -0.2°C par % végétation

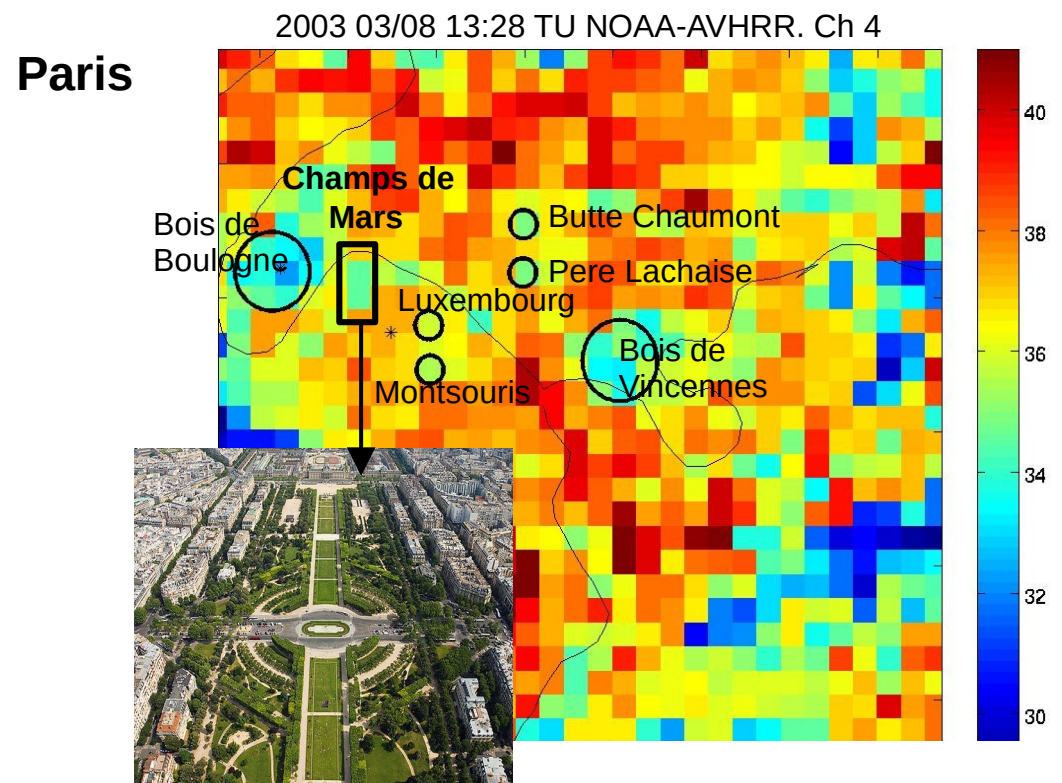
+ 5 % végétation → -1°C

Londres -0.18°C par % végétation

Marseille -0.3°C par % végétation

Los Angeles -0.33°C par % végétation

+ 3 % végétation → -1°C



- Parcs urbains 2°C à 5°C plus frais que les surfaces bâties environnantes

(Dousset et al. 2003, 2011)

Toits végétalisés



Toits du lycée Marcel Sembat à Rouen



La « High Line » ancienne voie ferrée à New York



Toit de l'Acros building garden à Fukuoka Japon
12 étages, jardins de tilleuls et d'érables



Potager de $> 6000\text{m}^2$ sur un bâtiment industriel, au
Navy Yard à Brooklyn

(Sources : images internet)

Stratégies locales d'atténuation de chaleur .3

- Perméabiliser les sols

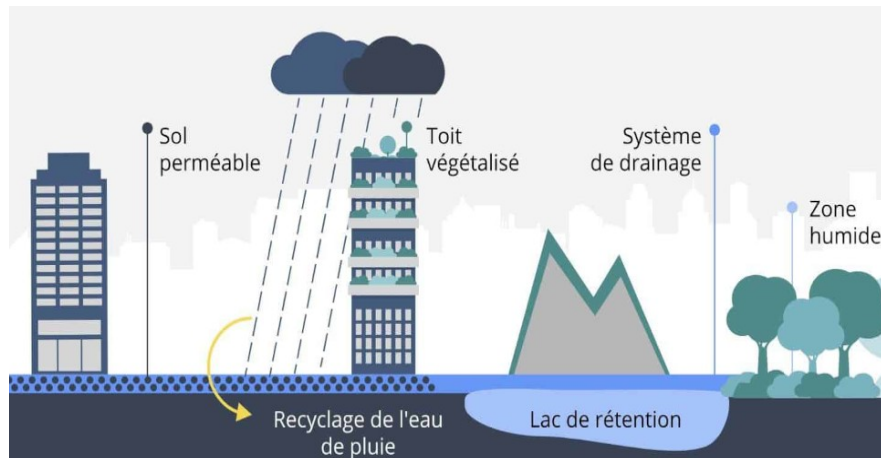
Remplacer l'asphalte et le bitume par des revêtements drainants, infiltration d'eau par porosité du matériau.

- Gérer les eaux pluviales

Limiter le risque de ruissellement et d'inondation causé par les crues subites ou les fortes pluies.

- « Villes éponges » avec espaces naturels, lacs, drainage des rivières et puits d'infiltration pour absorber et restituer les précipitations.

- e.g à Berlin 2018 : les nouveaux projets immobiliers n'évacuent plus les eaux pluviales et sont équipés de bassins de rétention et réservoirs souterrains.



En Chine les villes éponges collectent & réutilise 70% des précipitations



Berlin Quartier 52° Nord

Avec la contribution de



University of Hawai'i at Mānoa, National Research Council of the U.S. Academies, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration (Jet Propulsion Laboratory), la Fondation MAIF, le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS UMR-LETG Brest) et l'Institut de Veille Sanitaire.

Merci pour votre attention, **des questions ?**