

---

## Reconstruction de l'objet canicule : modélisation et représentation graphique

Laura PINSON<sup>1</sup>, Anne RUAS<sup>1</sup>, Valéry MASSON<sup>2</sup> et Katia  
CHANCIBAULT<sup>3</sup>

1. IFSTTAR, Laboratoire LISIS Cité Descartes –Champs sur Marne  
laura.pinson@ifsttar.fr ; anne.ruas@ifsttar.fr

2. CNRM-GAME, groupe de Météorologie à Moyenne Echelle, Toulouse  
valery.masson@meteo.fr

3. IFSTTAR, Laboratoire EE, Bouguenais  
katia.chancibault@ifsttar.fr

---

*RESUME.*L'été 2003 a été le plus chaud que la France ait connu depuis 53ans. Suite à un bilan dramatique, cette canicule fut placée parmi les plus graves catastrophes sanitaires. Elle a conduit à anticiper ce type de crise. La connaissance sur le phénomène de la canicule nécessite de mettre en relation spatialement et temporellement l'ensemble des prévisions de météorologies. Dans les zones urbaines la canicule est liée aux îlots de chaleur urbains (ICU) que l'on sait calculer de mieux en mieux. En France le modèle TEB, conçu par Météo-France, est le modèle de référence utilisé pour estimer les températures urbaines. .

*L'objet de la communication est de présenter les différentes étapes d'élaboration de la cartographie représentant le phénomène de la canicule. Le processus que nous proposons inclut la structuration des données spatiales et temporelles jusqu'à la spatialisation du phénomène de canicule. Il nécessite aussi des analyses spatiales et statistiques. Dans le cadre du projet RepExtrem, cette étude vise à concevoir des cartes de dangerosité liées au risque caniculaire à l'échelle des quartiers.*

*ABSTRACT.* The summer of 2003 was the hottest seen in France for 53 years. A dramatic balance assessment placed this heat wave among the gravest sanitary disasters. It is necessary to anticipate this type of crisis. Knowledge of heat wave phenomena requires understanding and relating, spatially and temporarily, all the meteorological forecasts available. In urban areas heat waves is connected to the Urban Heat Island (UHI). In, France, the model TEB by Météo-France is used.

*The object of this communication is to present the various stages of elaboration of the cartography representing the heat wave. The process we propose includes the structuring of the spatial and temporal data to represent the phenomena of heat waves. It also requires spatial and statistical analysis. Within the framework of the project RepExtrem, this study aims to devise maps of danger related to the risk of heat waves on the district scale.*

*MOTS-CLES :* phénomènes de canicule, données spatio-temporelles, représentation cartographique, modélisation

*KEYWORDS:* heat wave, spatiotemporal data, cartographic representation, modeling

---

Copyright © by the paper's authors. Copying permitted for private and academic purposes. Proceedings of the Spatial Analysis and GEOmatics conference, SAGEO 2015.

## 1. Introduction

Un réchauffement climatique global est prévu d'ici la fin du siècle selon les projections climatiques du GIEC. Ce réchauffement va générer une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, dont les canicules (5<sup>ème</sup> rapport du GIEC, 2014). Pour les extrêmes chauds, ces phénomènes viendront s'ajouter au microclimat spécifique des villes. Ainsi, les scientifiques accordent une attention particulière à l'apparition de phénomènes climatiques engendrés principalement par les constructions urbaines et les activités humaines en couplage avec deux phénomènes climatiques principaux : l'ensoleillement et les écoulements dominants dus au vent. Un des effets les plus connus et des plus étudiés est celui de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Cet effet peut être bénéfique en période hivernale en égard aux besoins de chauffage mais en période estivale, il devient critique pour le confort thermique à l'extérieur comme à l'intérieur des bâtiments. Des situations problématiques liées au climat sont constatées dans les grands centres urbains actuels. Ces situations critiques sont observées en été avec parfois des conséquences dramatiques, comme la canicule de l'été 2003 en France et en Europe avec un surplus de mortalité. Ces risques sanitaires dépendent principalement de l'intensité de la chaleur et de l'humidité relative de l'air, de la durée de l'exposition et de la vulnérabilité des personnes. Il est donc important de bien anticiper les épisodes de canicules et de mettre en place des stratégies évitant les recours aux climatisations massives qui accentuent le phénomène et participent au réchauffement climatique.

En France le modèle TEB (Masson, 2000) conçu par Météo-France est utilisé pour mieux estimer les températures urbaines. Dans le projet RepExtrem, nous souhaitons revisiter le modèle TEB en se concentrant sur les phénomènes de canicule en exploitant mieux les sorties du modèle. A partir des données météo maillées et composées d'une suite d'états, nous souhaitons reconstituer les phénomènes et analyser leur durée pour en déduire des zones de dangerosité (hot spot) à l'échelle du quartier. Le temps et l'espace jouent des rôles différents selon le type d'observation et de description des phénomènes. Ainsi, il est important de bien définir ce que l'on entend du point de vue temporel et du point de vue spatial. En effet, par rapport à d'autres phénomènes, la canicule prend sa dangerosité dans la durée. Il s'agit donc d'intégrer les températures de sortie du modèle et de les recaler dans un contexte spatial. Nous replongeons donc les prévisions dans un espace pour analyser les composantes spatiales et temporelles et essayer de mieux évaluer le risque sur les habitants.

Cet article présente la démarche méthodologique utilisée pour reconstituer le phénomène de canicule (où sont précisément les zones à risque dans une ville) et sa dangerosité. Il est organisé comme suit : la seconde partie rappelle les notions liées à l'ICU avec le phénomène de canicule et sa représentation. La troisième partie décrit le modèle utilisé, TEB, et ses sorties. La section 4 est consacrée à la méthodologie que nous proposons et avons développé pour la construction de l'objet canicule en

intégrant la durée (pour un épisode caniculaire) afin de passer à la notion de dangerosité et à la représentation graphique de cette information.

## 2. Contexte et problématique

### 2.1. Caractérisation de l'ICU

Les villes sont caractérisées par un micro-climat spécifique dont la manifestation principale est le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU ; Oke, 1987). On définit ICU comme l'observation de fortes différences entre les températures mesurées en site urbain et les températures des campagnes environnantes. Il n'est pas dû à un réchauffement de l'air plus rapide en ville, mais à un refroidissement plus lent. L'ICU est un phénomène épisodique et local. Il varie en l'espace de quelques dizaines de mètres et il n'est pas présent et ressenti tout le long de l'année. Les épisodes anticycloniques caractérisés par un vent faible (2 à 3m/s au maximum) et un ciel dégagé sont la conjonction parfaite pour l'apparition de l'ICU. « Une période très favorable pour l'apparition de l'îlot de chaleur est juillet-août, c'est-à-dire quand l'anticyclone subtropical remonte aux latitudes moyennes et apporte sa subsidence. Cette période débute quelquefois dès le printemps et se prolonge jusqu'au début de l'automne (le mois de septembre est très fréquemment favorable) » (Cantat, 2004). De plus, l'ICU a une variabilité journalière récurrente, son intensité est plus forte la nuit que le jour. Cette caractéristique a été mise en évidence dès les premières études portant sur ce phénomène (Renou, 1862 ; Hammon et Duenchel, 1902).

L'ICU amplifie le risque sanitaire des canicules. Il entraîne une exposition de la population urbaine à des températures plus élevées. Plusieurs études estiment que l'ICU augmente le risque de mortalité pendant les vagues de chaleur, comme par exemple à Berlin (rapport InVS, Laaidi, 2012).

### 2.2. L'ICU, un phénomène spatial et temporel

Les descripteurs météorologiques sont très variables spatialement et temporellement en premier lieu par la rotation de la terre et son inclinaison. La température de l'air varie avec l'alternance du jour et de la nuit mais aussi, dans la journée, avec l'ensoleillement. Pendant la journée, l'ICU a régulièrement un caractère résiduel. Il s'amplifie et/ou se forme lors de la période de refroidissement nocturne (Oke et Maxwell, 1974) pendant laquelle on observe un taux de refroidissement différentiel entre les zones urbaines et les zones rurales diminuant rapidement après le lever du soleil.

### 2.3. Canicule et seuils

Ces zones d'ICU sont beaucoup plus exposées aux épisodes de canicule que les zones rurales environnantes du fait de leurs caractères amplificateurs. Les villes de par leur caractère artificiel sont des lieux de phénomènes de surchauffe notable et

sont vulnérables lorsque surviennent des épisodes caniculaires. Le caractère amplificateur de la ville rend ces épisodes encore moins supportables et pose des questions sanitaires. L'accumulation des zones de fortes chaleurs produit des zones de dangerosité dues à la durée du phénomène. L'effet additionnel de l'ICU accentue le stress hydrique déjà ressenti par les habitants lors d'épisodes de vagues de chaleur, ce qui peut être particulièrement néfaste la nuit lorsque l'organisme est en période de récupération (Koukoku-Arnaud et al, 2012). C'est typiquement ce qui s'est produit durant la canicule de l'été 2003.

Pour parler de canicule, des seuils d'intensité et de durée ont été définis par les services météorologiques et sanitaires. Ces seuils de températures sont définis par département, en fonction des normales saisonnières et des statistiques de mortalité compris entre 1973 et 2003. Ils varient sensiblement entre le nord et le sud de la France. Au niveau de la durée, il faut observer des températures très élevées et maintenues au moins 3 jours et 3 nuits consécutives pour parler de canicule. A Paris, les seuils de canicule sont fixés à 21°C la nuit et à 31°C en journée.

Depuis quelques années, les différents drames sanitaires tels que les canicules ont sensibilisé l'opinion à la notion de sécurité sanitaire et ont fait émerger une prise de conscience nouvelle autour des problématiques de la prévention. Ainsi, suite à l'été 2003 un plan canicule, a été mis en place. Il est destiné à informer et à mettre en place des actions pour protéger les personnes à risque en cas de fortes chaleurs.

#### **2.4. Les difficultés liées à la représentation du risque**

La carte est un outil essentiel pour la gestion des risques naturels et même industriels. Elle intervient à la fois comme outil d'analyse, d'aide à la décision et de communication (Arnaud et Davoine, 2011). Elle peut être utilisée en amont pour comprendre les aléas et imposer des réglementations, au début de l'évènement pour alerter la population puis pendant et après pour gérer la crise. La représentation graphique des risques est complexe parce qu'on souhaite représenter beaucoup d'information sur une même carte qui est soit illisible parce que trop chargée soit trop simpliste et au final peu informative. Certaines recherches essaient néanmoins d'apporter des solutions innovantes comme Chesneau (2007) qui propose d'adapter les couleurs (la teinte et valeur) pour une meilleure lisibilité des cartes, ou Arnaud et Davoine (2011) qui proposent des représentations de l'incertitude des données. Comme d'autres risques, le risque canicule varie dans l'espace et dans le temps. Chaque type de risque (sismique, inondation, avalanche, etc) a des caractéristiques temporelles et spatiales ainsi qu'un contexte propres qui conduisent à une représentation différente et adaptée. De plus les cartographies de l'historique des évènements (Davoine 2014) sont différentes des cartographies du suivi d'un évènement en cours. C'est ce dernier cas qui nous intéresse ici.

La spécificité du risque de canicule que nous étudions est la suivante :

Copyright © by the paper's authors. Copying permitted for private and academic purposes. Proceedings of the Spatial Analysis and GEOmatics conference, SAGEO 2015.

- Ce n'est pas uniquement la température dépassant une valeur seuil à un instant donné qui conditionne l'alerte mais plutôt la durée pendant laquelle une valeur seuil est dépassée. Le risque canicule apparaît progressivement, peut s'intensifier, s'étendre spatialement et disparaître.
- La température et la vulnérabilité varient en fonction du Z. En théorie il faudrait prendre en compte les variations entre le sol et le sommet des habitations.
- Nous nous concentrons sur un espace urbain dense qui est un espace contraint.

Si la représentation 3D représente un enjeu scientifique, la représentation temporelle aussi (Andrienko et al, 2011). Si les géographes s'intéressent depuis longtemps au temps (Hägerstrand 1970) les réflexions en géomatique sur la question du temps datent plutôt des années 80 avec la création de nombreux modèles spatio-temporels de base de données (Langran et al, 1988 ; Parent et al 1999). Les technologies de l'information et de la communication rendent possible l'introduction du temps en cartographie en utilisant des techniques d'animations (Arnaud et Davoine, 2009 ; Kraak et MacEachen, 1997).

Au niveau de la communication de l'information, il est important de montrer que les valeurs ne sont pas homogènes dans l'espace et ont une certaine durée. Il est donc nécessaire de réfléchir à un modèle de données permettant de préserver la dimension temporelle de l'information et de représenter spatialement et chronologiquement les phénomènes. Pour cela, il faut améliorer la description des impacts en intégrant la durée, les configurations spatiales et les profils types pour passer à la notion de dangerosité et proposer des représentations graphiques innovantes du risque caniculaire.

### 3. Modélisation du climat par le modèle TEB

L'acquisition d'une meilleure connaissance des échanges thermiques contribue directement aux améliorations des modèles numériques développés pour la prévision du temps et des caractéristiques environnementales des zones urbaines. C'est dans cette perspective qu'a été développé le modèle TownEnergy Balance (TEB) (Masson, 2000). Le modèle TEB que nous utilisons dans notre recherche, a pour objectif de simuler les échanges d'énergie en milieu urbain, à l'échelle de la ville. Le modèle TEB décrit les échanges d'énergie et d'eau entre les diverses surfaces urbaines et l'atmosphère. Nous en donnons les grandes lignes.

La surface urbaine n'est pas homogène, elle varie en fonction de l'urbanisme choisi. La forme, les matériaux de construction sont autant de paramètres variant d'une ville à une autre. Ainsi, dans le modèle TEB la surface urbaine est découpée selon un maillage horizontal régulier et chaque maille possède ses propres caractéristiques s'appuyant sur le concept du canyon urbain. Une maille est caractérisée par trois types de surface : toit, route et de deux murs se faisant face. Ce pattern représente toute la maille même si les formes sont en réalité hétérogènes dans une maille. Ainsi chaque maille (que nous nommons *maille morphologique*, en figure 1) se caractérise par un ensemble d'indices dont le pourcentage de routes, de

végétation, de lac, etc. Ces indices sont calculés à partir d'une représentation de la réalité. Ainsi, les données en entrée sont représentées par les paramètres de surfaces à l'instar des paramètres géométriques, radiatifs et thermiques. Les paramètres de sorties sont calculés sur les mailles, que l'on appelle alors les *mailles météo* décrivant les températures moyennes (dans les bâtiments et dans la rue) à différentes altitudes ainsi que des indices de confort dont l'UTCI (Universal Thermal Climate Index). Le modèle TEB donne en sortie une maille météo (figure 1) caractérisée par un ensemble variables (températures des surfaces, de l'air, humidité, etc) et d'indices. Ainsi, TEB représente la ville de manière simplifiée. Il simule les échanges entre les surfaces bâties et l'atmosphère. TEB est ici employé en mode couplage avec le modèle Més0-NH (modèle de recherche météorologique à mésoéchelle traitant des phénomènes atmosphériques) pour caractériser au mieux les conditions atmosphériques urbaines.

#### 4. Des mailles météo à la construction de l'objet canicule et sa représentation

##### 4.1. Démarche et objectifs

En sortie du modèle TEB, les phénomènes caniculaires sont peu différenciés à l'intérieur même d'une ville alors que la température est différente selon l'altitude, selon l'orientation des rues, etc. Ces phénomènes ne sont pas représentés explicitement, mais de grandes zones chaudes peuvent se voir à chaque temporalité. Pourtant certains lieux sont plus vulnérables que d'autres notamment en raison de configurations spatiales particulières (rues canyons, immeubles orientés Sud, non ombragés, etc). Ainsi, notre approche vise à mieux évaluer, représenter et communiquer sur les risques caniculaires en zones urbaines denses (figure 1).

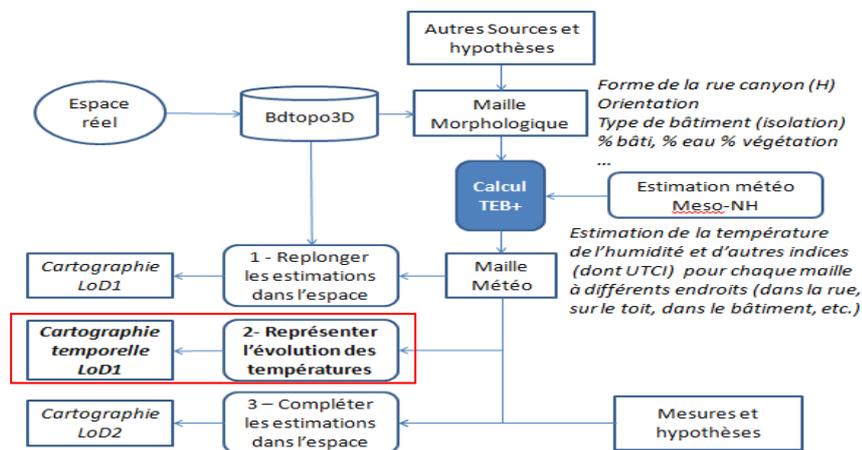


Figure 1. De TEB à la représentation cartographique du phénomène de canicule

Pour cela, nous proposons de mieux analyser les données du modèle (c'est-à-dire de les visualiser et de réaliser des traitements SIG pour passer des données à la notion de dangerosité) et de replonger les résultats dans l'espace géographique. A partir des mailles météo, on propose de construire trois cartographies distinctes pour améliorer la représentation des épisodes caniculaires dans le but d'évaluer les zones exposées et de hiérarchiser leur niveau de dangerosité :

- Une cartographie replongeant les informations, extraites du modèle, dans l'espace afin de contextualiser et de mettre en valeur les données et l'information calculée de TEB. Cela donne à voir la richesse des sorties.
- Une cartographie se basant sur des mesures (réalisées sur un bâtiment non climatisé au centre de Paris (Pinson et al, 2015)) et hypothèses sur les gradients de températures en période de canicule afin de compléter les estimations dans l'espace et ainsi améliorer la précision spatiale en particulier sur les écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment et les faces Nord et Sud et sur le gradient de température en fonction des étages.
- Une cartographie temporelle représentant l'évolution des températures en intégrant un indice de dangerosité (détaillée dans la suite de l'article) c'est-à-dire d'analyser la durée du phénomène caniculaire. Pour cette cartographie on s'appuiera sur les travaux de Yuan (1999) d'après Peuquet (1994). Yuan propose de séparer les trois aspects présents dans une base de données spatiaux-temporelles : le temps, l'espace et la thématique de façon à pouvoir s'intéresser aux changements de l'un, les autres étant fixés, ou aux changements de plusieurs d'entre eux simultanément.

Ces cartographies ont pour objectif d'améliorer l'information sur les canicules en zones urbaines denses, de prendre en compte la durée pour passer à la notion de dangerosité et de représenter graphiquement cette information.

Nous présentons ci-après la méthodologie que l'on souhaite appliquer pour la réalisation de la cartographie temporelle (à différents niveaux de détails, LoD) et qui nous incite à créer l'objet canicule.

#### ***4.2. Des données météo à une base de données d'états***

Comme nous l'avons rappelé précédemment la canicule est, comme tous les phénomènes météorologiques, variable dans l'espace et dans le temps. Le modèle TEB fournit des descripteurs météo pour chacune des mailles pour chaque temps de simulation. Ces données sont fournies en entrée du modèle TEB calculant les flux thermiques entre la surface et les couches hautes de l'atmosphère, pour un temps donné  $t_1$ . Pour pouvoir réaliser des expérimentations sur le suivi de canicule, les sorties TEB, nous ont permis d'établir une base de données des températures sur la période du 5 au 11 juillet 2010, sur Paris, pour des mailles de 250 \* 250m. Une sortie a été mémorisée chaque heure. Le traitement de ces données via un Système d'Information Géographique (SIG) permet de replonger les températures dans l'espace (c'est-à-dire de contextualiser l'information) afin d'établir une cartographie précise de la température de la rue à 2m et d'intégrer ensuite la notion de durée.

Les sorties du modèle TEB sont sous la forme d'un fichier .txt. Ses valeurs sont représentées sous forme de grille. Afin de les visualiser sous un SIG, différents traitements préalables ont été réalisés (tableur Excel, programmation Eclipse, etc). Le premier traitement a été de développer un algorithme pour lire ces grilles, les stocker dans un SGBD et les replonger dans un espace géographique. L'analyse heure par heure du champ (nuit et jour dans notre étude) permet d'identifier la chronologie du réchauffement et du refroidissement de l'air. En effet, les périodes diurnes et nocturnes apparaissent comme des échelles utiles à la définition et la gestion des risques.

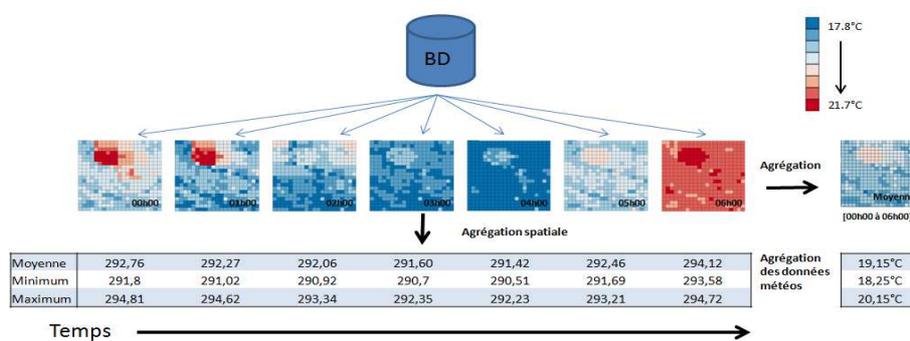


Figure 2. Représentation d'agrégations sur une succession d'états

Cependant, pour notre étude, nous nous sommes focalisés sur des temps spécifiques représentant le mieux le phénomène de canicule soit de 15h-22h pour la journée et de 03h-10h pour la nuit (soit de 13h-20h et 1h-8h en heure solaire). Ces périodes significatives du jour et de la nuit correspondent aux heures les plus chaudes et les plus fraîches pendant un épisode de canicule. Cela a été démontré lors de mesures effectuées sur Paris, en juillet 2015. Ainsi, nous avons créé 80 états différents avec comme paramètres la température et l'humidité de la rue canyon à 2m du sol et la température à l'intérieur des bâtiments. Une fois que les données sont stockées dans un SGBD (PostGIS) elles sont lues dans un SIG (QGIS) pour établir une cartographie des températures de la rue canyon à 2m du sol dans Paris pour une maille de 250m (figure 2). L'objectif de ces premières cartes est de montrer la répartition spatiale du phénomène au cours du temps et d'identifier les zones à risque, et les hot spot, le cas échéant.

La conception de nouvelles représentations nécessite le développement de structures de données adhoc. En effet, si on peut voir en figure 2 des zones plus ou moins chaudes, l'objet canicule n'est pas explicitement représenté : nous voyons une canicule mais le système ne la reconnaît pas et la durée, déterminante dans la définition de la canicule, n'est pas représentée de façon explicite.

### 4.3. D'une succession d'états à la représentation de la canicule

Pour passer à la canicule, il faut intégrer la durée et les seuils officiels (2.3). Lorsqu'une période chaude commence, on ne sait pas si elle va ou non se transformer en canicule. On parle de *pré-canicule* si les critères de température sont atteints mais pas la durée. Pour assurer le suivi, on propose de créer des objets appelés *maille-suivi-canicule* qui sont mis à jours toutes les 24h (en gardant la logique des plages horaires définies ci-dessus) :

- soit les dernières heures ne répondent pas aux critères de canicule, on met les valeurs de l'objet à 0,
- soit on rentre dans une configuration thermique de pré-canicule, l'objet note le début de l'épisode et stocke des valeurs thermiques,
- soit la maille est déjà en canicule ou pré-canicule, elle met à jour ses attributs dont ses valeurs thermiques.

Les critères de canicule étant différents la nuit et le jour, nous proposons de calculer les moyennes de température la nuit et le jour en évitant les heures intermédiaires qui sont moins significatives. L'objet *maille-météo-durée* porte les moyennes (jour ou nuit) pour des durées de 8 heures afin de cerner au mieux ces plages. Le modèle conceptuel de la figure 3 présente les informations que nous proposons de calculer pour assurer ce suivi du risque caniculaire. Les classes sont commentées ci-dessous. TEB fournit des mailles que l'on agrège temporellement. On crée des zones de canicule par agrégat de mailles sous certaines conditions.

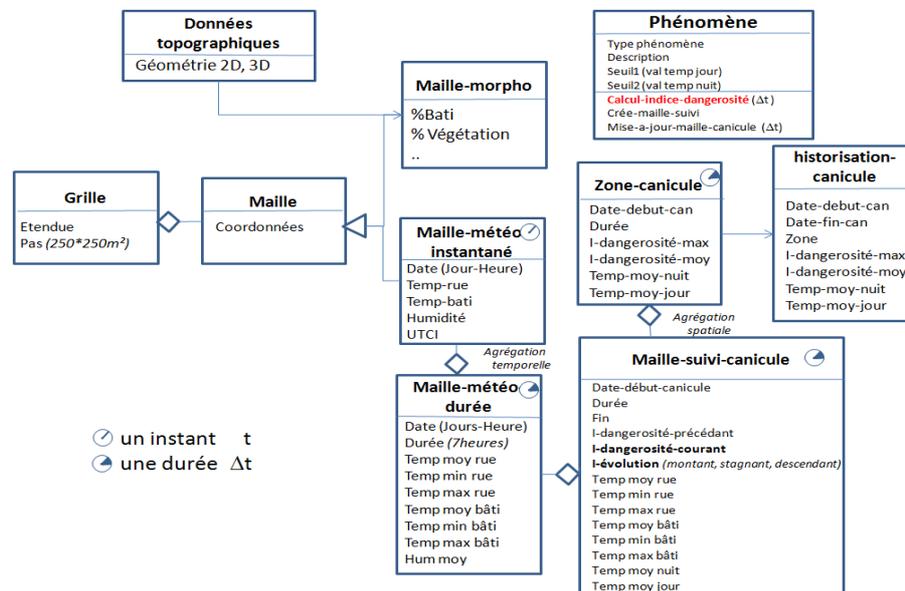


Figure 3. Modèle conceptuel pour le suivi des épisodes de canicule

Dans ce modèle, trois mailles sont représentées pour décrire un espace géographique et météorologique :

- La *maille morphologique* représente l'espace géographique. Chaque maille est constituée de données topographiques (avec des géométries en 2D et 3D) et est représentée par un ensemble d'indices dont le pourcentage de végétation, de bâti, de réseau routier, etc.
- La *maille-météo* instantanée décrit la température de la rue et son humidité à 2m du sol ainsi que la température interne des bâtiments par des valeurs (par heure). On représente donc la température ou un autre paramètre à une date  $t$ . C'est une observation du territoire sous forme « d'instantanée » (snapshot).
- La *maille-météo-durée* est un agrégat temporel de la maille météo instantanée c'est-à-dire des agrégats de valeurs. Dans cette maille est calculée la moyenne, le minimum et le maximum des températures pour chaque paramètre (sur une durée de 8h) (figure 2).

Ces mailles morphologiques et météorologiques permettent de constituer la *maille suivi-canicule* qui portera des  $k$  indices de dangerosité ( $i\_canicule\_k$ ), calculés en fonction de la *durée* du phénomène, de son intensité, du *seuil* (nuit et jour) et du *profil* type.

$$i\_canicule\_k = f\_k(\Delta durée, \Delta seuil, températures, profil)$$

La différenciation de la température de la rue et à l'intérieure des bâtiments est importante au moins dans les villes françaises où la température intérieure, souvent sous évaluée, joue un rôle primordial en période de canicule. Pour l'instant, nous n'avons pas encore conçu ces indices, c'est l'objet des recherches en cours. Nous établirons plusieurs indices pour voir quels sont les plus pertinents. Ces indices doivent servir à indiquer le début d'une pré-canicule pour être en mode alerte, puis à différencier la dangerosité.

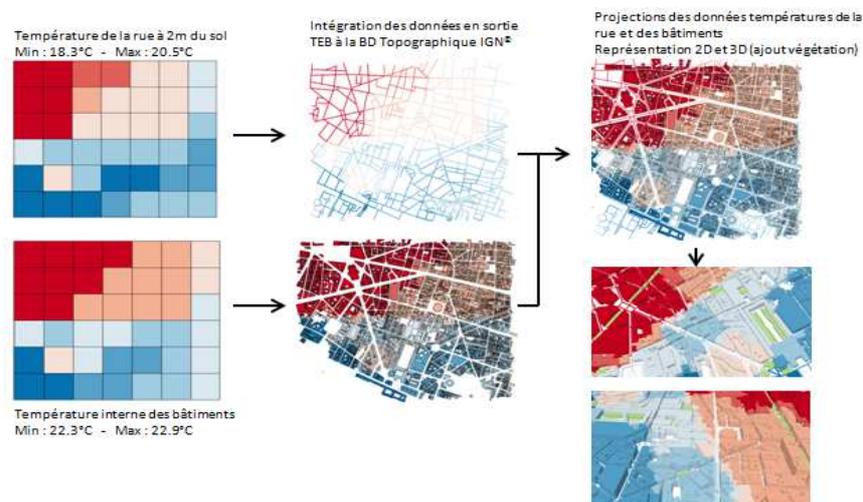
La *maille-suivi-canicule* est donc au cœur de notre analyse. Elle porte notamment une date de début de canicule, la durée du phénomène, les températures minimales, maximales et moyennes dans la rue et les bâtiments et un ou plusieurs indices de dangerosité. La comparaison avec l'état précédent permet de désigner si ce phénomène est en période ascendante (si la température continue à augmenter dans la durée), stagnante ou descendante (si la température régresse pour arriver en dessous du seuil canicule définit). La *maille-suivi-canicule* est issue d'une agrégation temporelle des valeurs. Nous proposons de réaliser également une agrégation spatiale pour disposer de zones de canicules. On notera dès à présent que les deux niveaux sont essentiels. La notion de durée et de seuils sont ici primordiaux. Une analyse statistique viendra en complément de cette *maille suivi-canicule* pour valider la détermination des zones par seuillage. Cette validation nous permettra, par exemple, de répondre à la question : que se passe-t-il si la zone est juste en dessous du seuil ?

Par une agrégation spatiale (en zone), on pourra définir des zones de canicule tout en gardant l'information de la maille-suivi-canicule. Il existe plusieurs solutions pour passer de la *maille-suivi-canicule* à la *zone-canicule*. La solution la plus immédiate est d'agrèger régulièrement (toutes les 24h) les *mailles-suivi-canicule* connexes en fonction des valeurs d'indice de dangerosité. Si les indices sont précis, il faut alors les catégoriser soit a priori (par exemple les valeurs entre 0 et 1 sont regroupées, les valeurs entre 1 et 2 sont regroupées, etc.) soit par classification contrainte par les proximités. A priori, en suivant cette méthode, on devrait avoir des séries sur les zones, toutes les 24 heures. On peut, en effet, penser raisonnablement que les limites (l'étendue) de chaque zone seront différentes toutes les 24h. Afin de voir le phénomène sous un autre angle on peut aussi créer des objets selon les niveaux de dangerosités, enregistrer sa géométrie toutes les 24h et étudier l'évolution de son centre et de son étendue pendant la durée de la canicule.

Enfin l'*historisation-canicule* permet de stocker l'information et de pouvoir comparer les zones entre elles ainsi qu'avec d'autres canicules. Savoir si le phénomène a un caractère exceptionnel ou non en vue des seuils de températures mais surtout de sa durée (rédhibitoire pour la santé des personnes fragilisées) sera un des buts de cet archivage de données. L'historisation permettra d'avoir une vision dynamique du phénomène et de son évolution.

#### 4.4. Replonger les prévisions météo dans les espaces concernés

Afin de contextualiser les données TEB, nous avons développé des méthodes pour croiser températures et objets décrivant l'espace (figure 4). Ainsi en intersectant les mailles, les bâtiments et les rues, nous affectons aux données topographiques les valeurs de TEB. Ceci est particulièrement important pour différencier au moins visuellement les températures rues et bâtiments, et mieux percevoir la vulnérabilité du territoire. Cette projection nous permet aussi de voir l'effet de maillage, important pour interpréter les données.



**Figure 4:** Replonger les données TEB sur les bâtiments. Représentations 2D et 3D

Par ailleurs si un objet (un bâtiment) se localise à l'intersection de plusieurs mailles, on lui affecte la moyenne pondérée par la surface de la valeur des différentes mailles intersectées.

## 5. Conclusion et perspectives

Compte tenu des prévisions de changement climatique, il nous semble important d'apporter des solutions innovantes pour le suivi des épisodes météorologiques. Cela passe par la modélisation, le suivi et l'analyse des données. La démarche, les concepts et un modèle de données, pour modéliser l'objet canicule, sont présentés en insistant sur la temporalité du phénomène. Dans cette recherche, nous proposons un modèle permettant de suivre l'apparition des épisodes de canicules en zone urbaine. A partir des prévisions de modèles de météorologies urbaines et des mesures réalisées sur Paris, il s'agit d'agrèger les données sur un critère temporel et d'insérer un suivi régulier des valeurs pour les comparer à des seuils. Une agrégation spatiale peut alors avoir lieu pour étudier l'étendue et son évolution. Des premières représentations graphiques 2D et 3D ont été faites pour replonger les données météo sur les enveloppes des bâtiments pour mieux percevoir l'espace concerné. Des recherches sont en cours pour concevoir des indices à partir de normes sanitaires. Des mesures faites sur Paris pendant la canicule de 2015 permettront de mieux connaître la variabilité des températures intérieures et extérieures pendant les périodes de canicule, avant d'en proposer une représentation graphique.

## Bibliographie

- Andrienko G, Andrienko N, (2011). Dynamic time transformations for visualizing multiple trajectories in interactive spacetime cube. 25<sup>th</sup> International Cartographic Conference (ICC'11), 3-8 July, Paris
- Arnaud A. Davoine P-A. (2009). Temporal geovisualization in risk area, *International Cartography Conference*, November 15-21, Santiago du Chili.
- Arnaud A. Davoine P-A. (2011). Approche cartographique et géovisualisation pour la représentation de l'incertitude : application à l'information dédiée aux risques naturels (2011), *Revue Internationale de géomatique*, vol21/1, p. 205-224, 2011.
- Cantat O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norvis* n° 191, p. 75-102.
- Chesneau E. (2006). *Modèle d'amélioration automatique de contrastes des couleurs en cartographie. Application aux cartes de risques*. Thèse en sciences de l'information géographique, Université MLV, 370p.
- Davoine P-A. (2014). Contributions Géomatiques pour la gestion des Risques Naturels : modélisation, géovisualisation, acquisition. HDR, volume 1. Université de Grenoble
- Enhofer O. et al. (2014). Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. *Parution du volume 1 du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (IPCC)*. Ministère du développement Durable (<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>)
- Hammon W-H. et Duenchel F-W. (1902). Abstract of a comparison of the minimum temperatures recorded at the U.S. Weather Bureau and the Forest Park

- Meteorological Observatories, St. Louis, Missouri for the year 1891, Mon. Wea. Rev., 30.
- Hagerstrand T. (1970). What about people in Regional Science? *Papers in regional Science*.
- Koukoku-Arnaud R. et al. (2012). Méthodologie pour la quantification de l'impact d'aménagements urbains sur un climat urbain modifié. *Climats et changement climatique dans les villes*. Numéro spécial. AIC ; p. 35-62.
- Kraak M-J. et MacEachren A-M.. (1997). Cartographic Animation and Legends for Temporal Maps : Exploration and Interaction. Proceedings of the 18<sup>th</sup> *International cartographic Conference*, Stockholm, Sweden, p. 253-260.
- Laaïdi K. (2012). Rôle des îlots de chaleur urbains dans la surmortalité observée pendant les vagues de chaleur- Synthèse des études réalisées par l'Institut de veille sanitaire sur la vague de chaleur d'août 2003. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire, 4 p.
- Langran G. (1988). Temporal GIS design tradeoffs. *Proceedings of GIS/LIS*, San Antonio, 890-899 p.
- Masson V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.- Layer Meteorol.*, 94(3), p.357-397.
- Montávez J-P. Rodríguez M. et Jiménez J-I. (2000). A study of the urban heat island of Granada, *Int. J. Climatol.*, 20, p. 899-911.
- Oke T-R. et Maxwell G-B. (1974). Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver, *Atmos. Environ.*, 9, p. 191-200.
- Oke T-R. (1987). *Boundary layer climates*. London et New York : *Methun*, Second edition (first edition 1978), p. 435
- Parent C. Spaccapietra S. et Zimányi E. (1999). Spatio-temporal conceptual models: data structures + space + time. In Proceedings of the 7th *ACM*. p. 26-33.
- Peuquet D. (1994). It's About Time : A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 83, no. 3, p. 441-461.
- Pinson L. Ruas A. Masson V. et Chancibault K. (2015). Une meilleure connaissance et estimation du risque caniculaire en zone urbaine dense. *28<sup>ème</sup> conférence Association Internationale de Climatologie*, Liège.
- Price R. et al (1999). Spatiotemporal extensions to unified modeling language. In 2012 23rd *International Workshop on Database and Expert Systems Application*. p. 460-460.
- Renou E. (1862). Différences de température entre Paris et Choisy-le-roi, *Société Météorologique de France*, Annuaire, 10, p. 105-109.
- Yuan M ; (1999). Use of a Three-Domain Representation to Enhance GIS Support for Complex Spatiotemporal Queries. *Transactions in GIS*, 3(2) : 137-159