COMMENT ET POUR QUI CARTOGRAPHIER L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (ICU) ?

Yves RICHARD[1], Julien CRÉTAT[1],
Julita DUDEK[1], Nadège MARTINY[1], Julien PERGAUD[1], Benjamin POHL[1], Mélissa POUPELIN[1, 2], Mario REGA[1],
Daniel JOLY[2], Damien ROY[2], Thomas THÉVENIN[2,4], Justin EMERY[3], Ludovic GRANJON[4],
Suzie BESSET[5], Oanez CODET-HACHE[5], Marie-Françoise DODET[5], David FAU[5], Anne VOLATIER[5]

[1] *Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté,*

[2] *UMR 6049 ThéMA, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté*

[3] *AVENUES EA 7284, Univ. de technologie de Compiègne*

[4] *MSH de Dijon, UAR 3516 CNRS-UBFC uB*

[5] *Dijon Métropole*

1. Problématique

- quels sont les déterminants statiques des variations spatiales de température à l’échelle d’une agglomération ?
    - la position absolue : latitude, longitude, altitude ;
    - la situation relative : distance au centre-ville, formes de reliefs (creux, bosses, …) ;
    - l’occupation des sols : végétation, bâti ;
    - les formes d’occupation des sols : rugosité, facteur d’ouverture sur le ciel.

1. Problématique

- quels sont les déterminants statiques des variations spatiales de température à l’échelle d’une agglomération ?
    - la position absolue : latitude, longitude, altitude ;
    - la situation relative : distance au centre-ville, formes de reliefs (creux, bosses, …) ;
    - l’occupation des sols : végétation, bâti ;
    - les formes d’occupation des sols : rugosité, facteur d’ouverture sur le ciel.

- produire une ou bien des cartes de l’ICU ?
    - Pour un document d’urbanisme (PLUI, PCAET, SCOT, …) une carte serait idéale ;
    - la T° de l’air est tout sauf une constante : une analyse des variations spatio-temporelles s’impose.

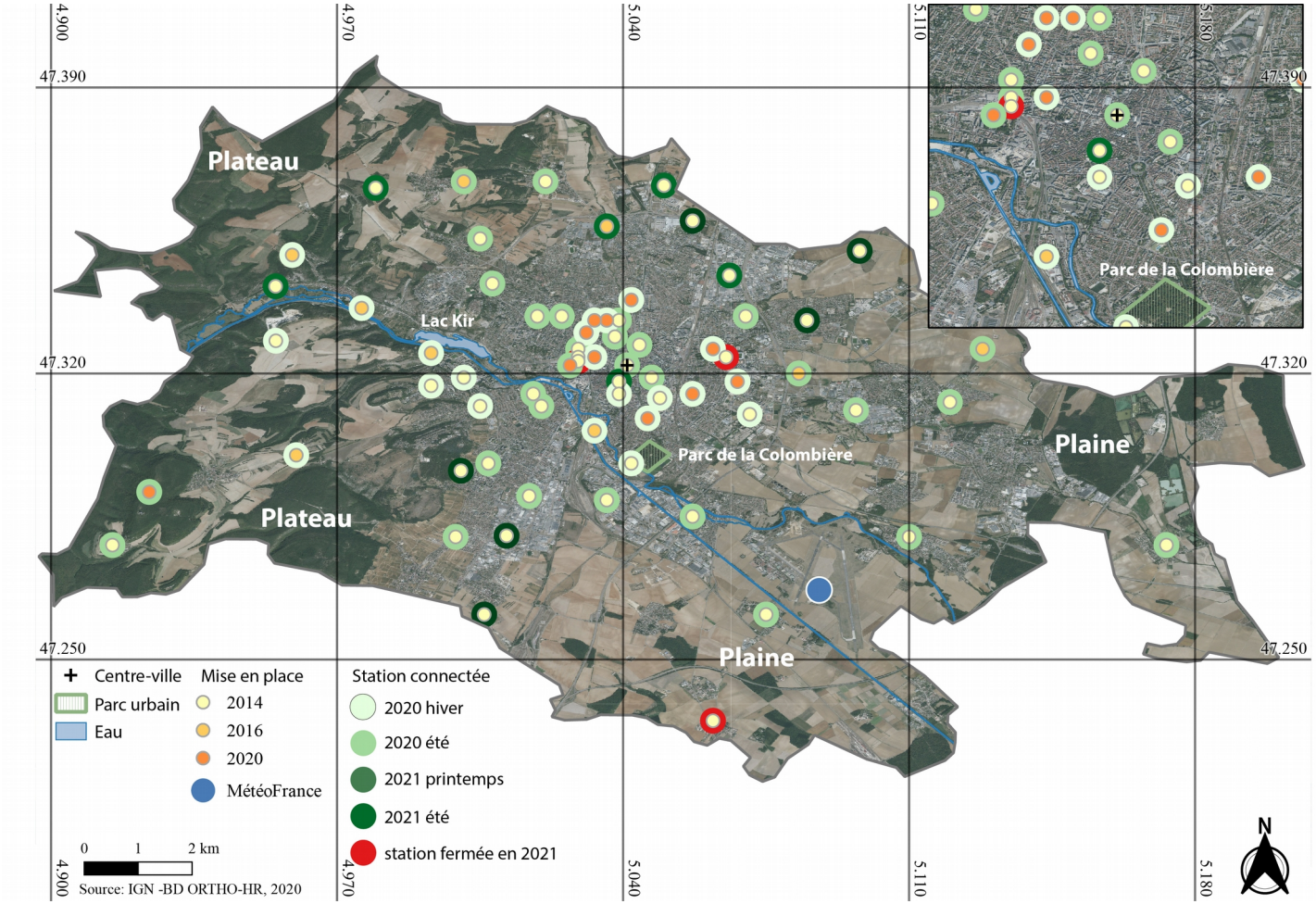
1. Problématique

- quels sont les déterminants statiques des variations spatiales de température à l’échelle d’une agglomération ?
    - la position absolue : latitude, longitude, altitude ;
    - la situation relative : distance au centre-ville, formes de reliefs (creux, bosses, …) ;
    - l’occupation des sols : végétation, bâti ;
    - les formes d’occupation des sols : rugosité, facteur d’ouverture sur le ciel.

- produire une ou bien des cartes de l’ICU ?
    - Pour un document d’urbanisme (PLUI, PCAET, SCOT, …) une carte serait idéale ;
    - la T° de l’air est tout sauf une constante : une analyse des variations spatio-temporelles s’impose.

- pour qui produire ces cartes ?
    - les habitants d’une ville ?
    - les acteurs : élus, services, agences d’urbanisme, …
    - la communauté scientifique.

2. Données : Prédictand « T° horaire aux 50 à 72 stations de juin 2014 à décembre 2020 »



Dijon Métropole

MUSTARDijon, un des observatoires partenaire du SNO INSU-CNRS : Observil service national d'observation

2. Données : Prédicteurs « BD Topo et MNT de l'IGN, + image PLEIADES »

Prédicteurs Potentiels		Construction du modèle d'interpolation	Application du modèle sur une grille de mailles 100m x 100m
Coordonnées géographiques	Longitude (°)	Station MUSTARDijon	Centre de chaque maille
	Latitude (°)		
Topographie	***Altitude*** (m) **ou** **Ampleur des bosses** (m)	Pixel de 50m le pus proche	
	Ampleur des vallées (m)	Moyenne des 7 pixels de 50m les plus proches	
Urbain	***Distance au centre-ville*** (m) **ou** **Bâti** (%)	Station MUSTARDijon	Centre de chaque maille
	Surface artificialisée (%)	Zone tampon de 300m de rayon autour de chaque station MUSTARDijon	Maille
Végétation	***Forêt + Eau*** (%)		
	Grande culture (%)		
	Végétation basse (%)		

Prédicteurs potentiels utilisés comme variables indépendantes pour expliquer la distribution spatiale de la température horaire mesurée par le réseau MUSTARDijon et l'interpoler sur une grille de 100 m x 100 m.

Les prédicteurs en **gras** sont proposés pour la solution recherche, ceux en *italique* sont imposés pour la solution opérationnelle.

3. Méthode : des régressions multiples selon deux approches « recherche et opérationnelle »

- L’interpolation est effectuée pour chaque heure sur près de 7 ans soit 57571 modèles ;

- la résolution spatiale est de 100m * 100m, soit plusieurs milliers de mailles ;

- des RLM sont proposées selon deux approches : recherche et opérationnelle (dans les 2 cas, 5 préd. max) ;

- recherche : optimisation de la performance : le nombre et la nature des prédicteurs varient ;

- opérationnelle : robuste et simple : toujours les 5 mêmes prédicteurs.

3. Méthode : des régressions multiples selon deux approches « recherche et opérationnelle »

- L'interpolation est effectuée pour chaque heure sur près de 7 ans soit 57571 modèles ;

- la résolution spatiale est de 100m * 100*, soit plusieurs milliers de mailles ;

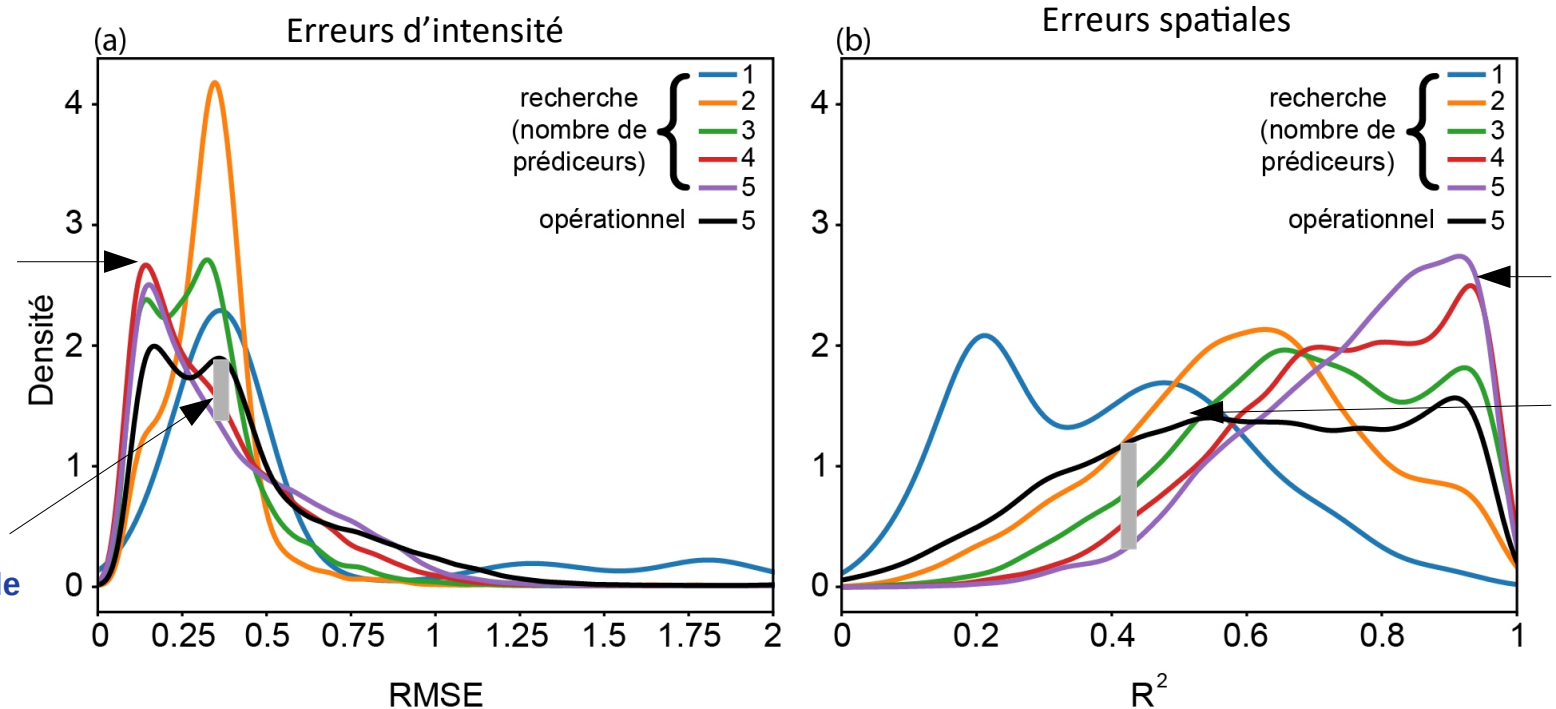
- des RLM sont proposées selon deux approches : recherche et opérationnelle (dans les 2 cas, 5 préd. Max), LOOCV ;

- recherche : optimisation de la performance : le nombre et la nature des prédicteurs varient ;

- opérationnelle : robuste et simple : toujours les 5 mêmes prédicteurs.

Considérer 4 ou 5 prédicteurs réduit l'erreur d'intensité

Erreurs d'intensité + fortes en solution opérationnelle

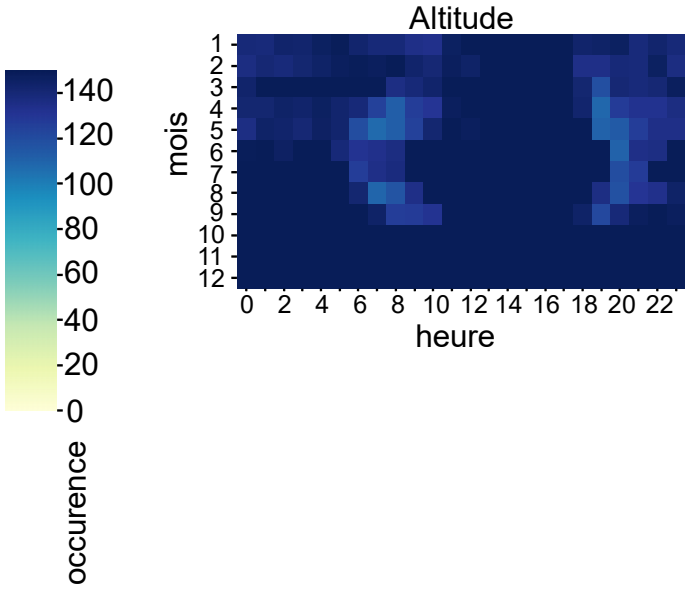


Considérer 4 ou 5 prédicteurs réduit l'erreur spatiale

Erreurs Spatiales + fortes en solution opérationnelle

4. Résultat 1 : quels sont les prédicteurs les plus souvent sélectionnés en mode recherche ?

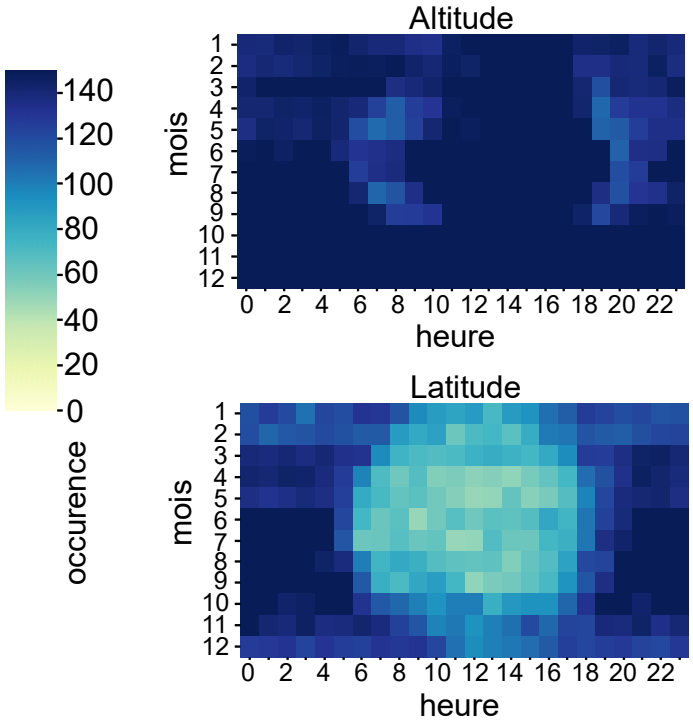
Les graphiques permettent d'analyser les cycles diurnes et saisonniers de sélection des prédicteurs dans les modèles



- prédicteur le + souvent sélectionné (quasi systématiquement) ;
- quel que soit le mois ou l'heure ;
- parfois non sélectionné : lever et coucher du soleil en saison chaude (avril-septembre)

4. Résultat 1 : quels sont les prédicteurs les plus souvent sélectionnés en mode recherche?

La situation géographique absolue, indépendamment de l'occupation du sol, est déterminante

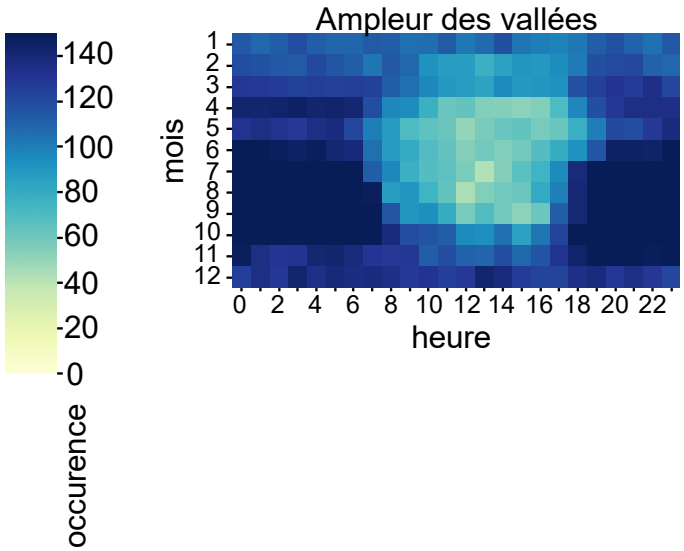


- prédicteur le + souvent sélectionné (quasi systématiquement) ;
- quel que soit le mois ou l'heure ;
- parfois non sélectionné : lever et coucher du soleil en saison chaude (avril-septembre).

- prédicteur très souvent sélectionné ;
- quasi systématiquement la nuit, beaucoup plus rarement le jour ;
- la différence nuit / jour élimine l'hypothèse d'un gradient thermique méridien constant.

4. Résultat 1 : quels sont les prédicteurs les plus souvent sélectionnés en mode recherche ?

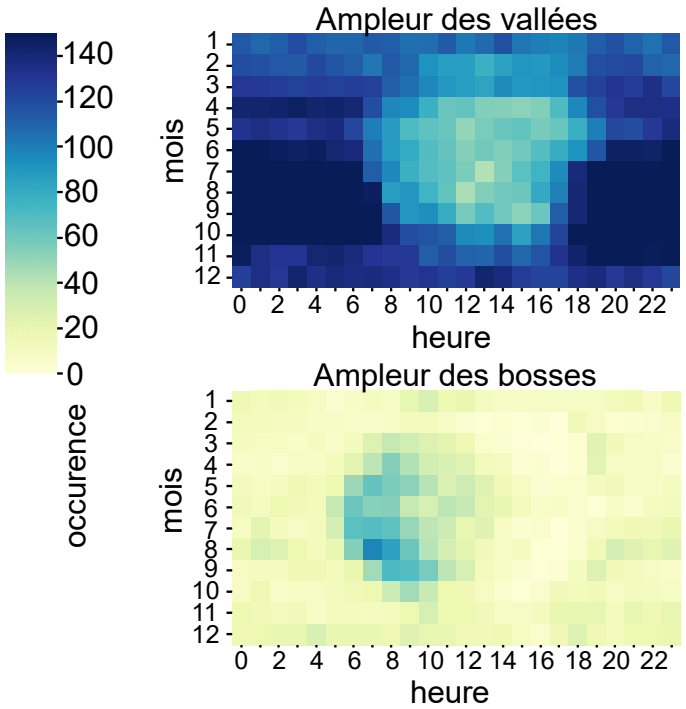
Le relief mérite d'être analysé de manière plus approfondie que via la seule altitude (Joly *et al*., 2012)



- prédicteur souvent sélectionné ;
- surtout la nuit ;
- surtout en saison chaude (avril-septembre).

4. Résultat 1 : quels sont les prédicteurs les plus souvent sélectionnés en mode recherche ?

Le relief mérite d'être analysé de manière plus approfondie que via la seule altitude (Joly *et al*., 2012)



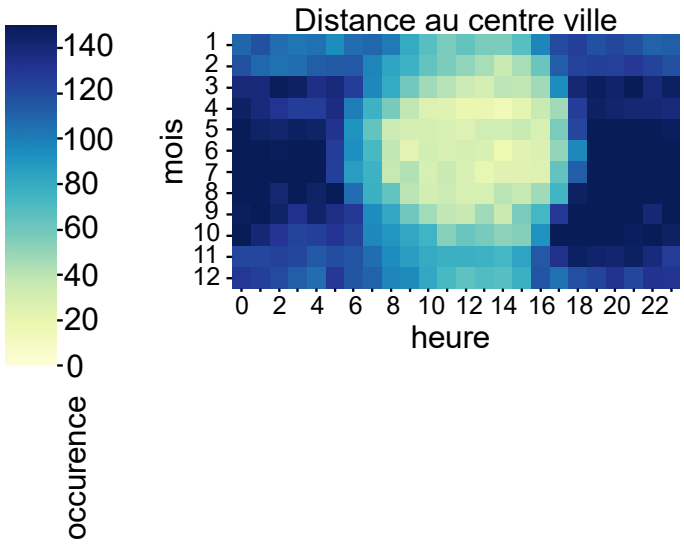
- prédicteur souvent sélectionné ;
- surtout la nuit ;
- surtout en saison chaude (avril-septembre).

- prédicteur rarement sélectionné ;
- intervient certains matins ;
- plutôt des matins de saison chaude.

Note : l'ampleur des bosses est très souvent redondante avec l'altitude ; les 2 ne rentrent jamais ensemble dans la solution recherche

4. Résultat 1 : quels sont les prédicteurs les plus souvent sélectionnés en mode recherche?

Le rôle de l’anthropisation : 1/ urbanisation

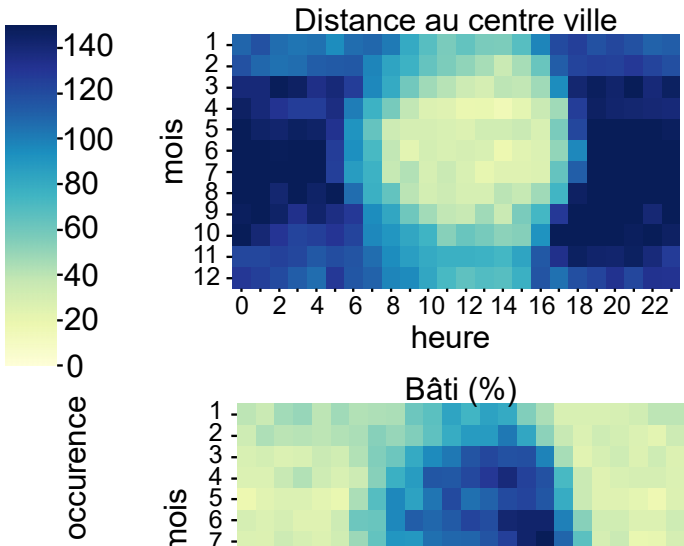


- la distance euclidienne au centre-ville est un déterminant fréquent ;
- c’est vrai la nuit, faux le jour ;
- c’est très marqué en saison chaude.

Ensemble d’éléments typiques de l’ICU

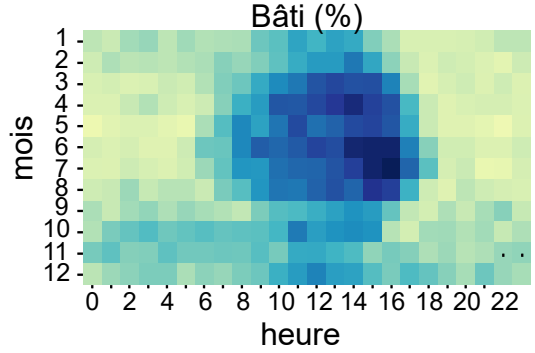
4. Résultat 1 : quels sont les prédicteurs les plus souvent sélectionnés en mode recherche?

Le rôle de l’anthropisation : 1/ urbanisation



- la distance euclidienne au centre-ville est un déterminant fréquent ;
- c’est vrai la nuit, faux le jour ;
- c’est très marqué en saison chaude.

Ensemble d’éléments typiques de l’ICU



- n’intervenant que le jour ;
- surtout en saison chaude ;
- pouvant être présent nuit et jour en saison froide.

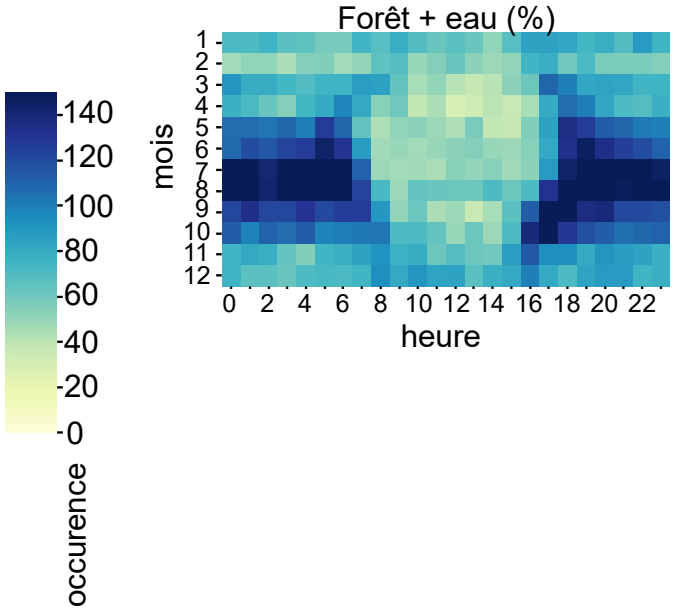
Interprétation + complexe :

- Piégeage intra-urbain ?

- Chaleur anthropogénique ?

4. Résultat 1 : quels sont les prédicteurs les plus souvent sélectionnés en mode recherche?

Le rôle de l'anthropisation : 2/ végétation

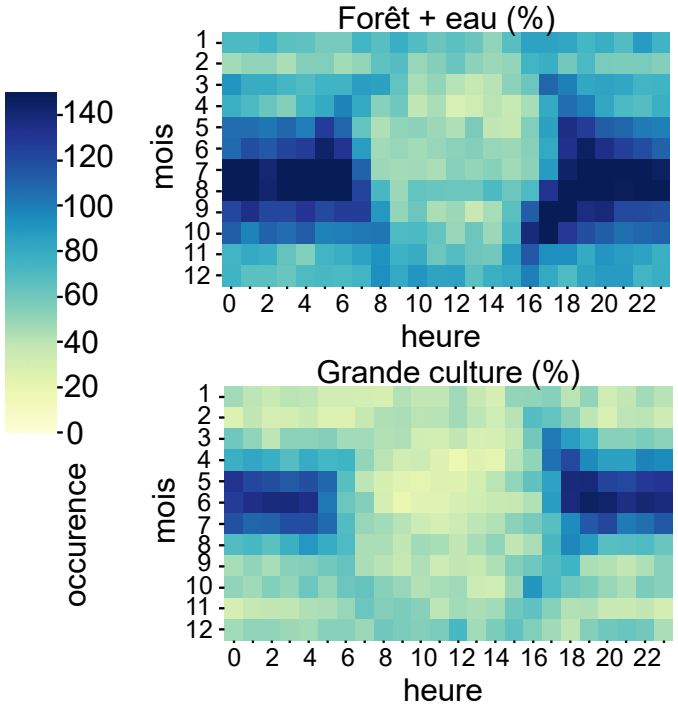


- déterminant fréquemment sélectionné ;
- surtout les nuits de saison chaude (mai – octobre), mais pas trop en avril... ;
- + marqué au cœur de en saison chaude (juillet-août).

La forêt et l'eau : été et fin d'été

4. Résultat 1 : quels sont les prédicteurs les plus souvent sélectionnés en mode recherche?

Le rôle de l'anthropisation : 2/ végétation



- déterminant fréquemment sélectionné ;
- surtout les nuits de saison chaude (mai – octobre), mais pas trop en avril... ;
- + marqué au cœur de en saison chaude (juillet-août).

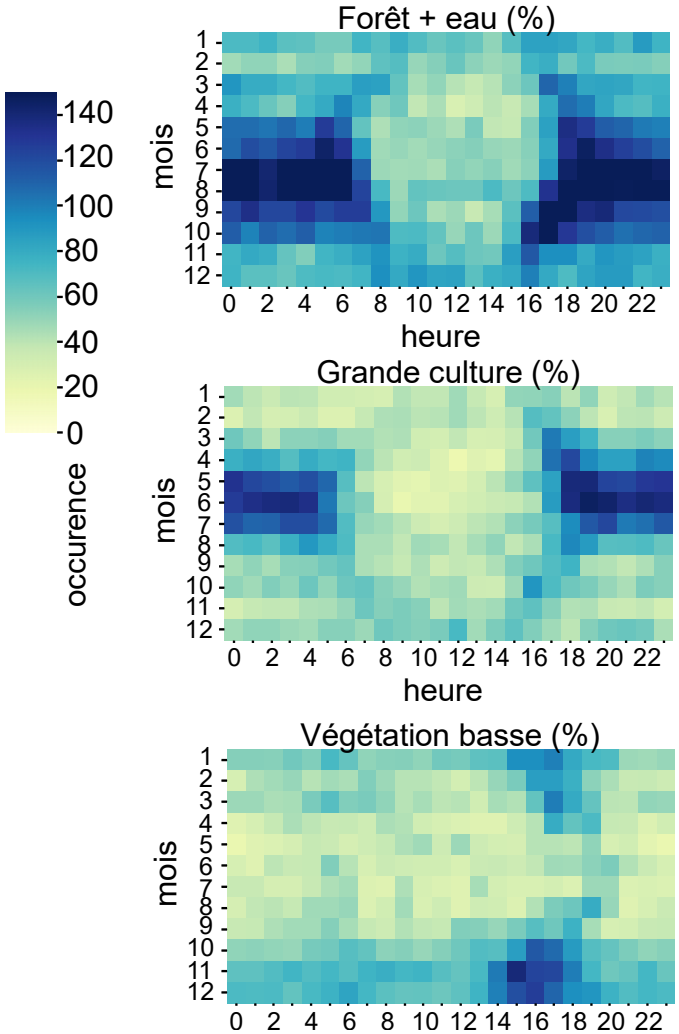
La forêt et l'eau : été et fin d'été

- déterminant moyennement sélectionné ;
- surtout les nuits de début de saison chaude (mai, juin et juillet) ;

Après les moissons, les sols nus n'ont plus d'effet sur la T°

4. Résultat 1 : quels sont les prédicteurs les plus souvent sélectionnés en mode recherche?

Le rôle de l'anthropisation : 2/ végétation



- déterminant fréquemment sélectionné ;
- surtout les nuits de saison chaude (mai – octobre), mais pas trop en avril... ;
- + au cœur de en saison chaude (juillet-août).

La forêt et l'eau : été et fin d'été

- déterminant moyennement sélectionné ;
- surtout les nuits de début de saison chaude (mai – juillet) ;

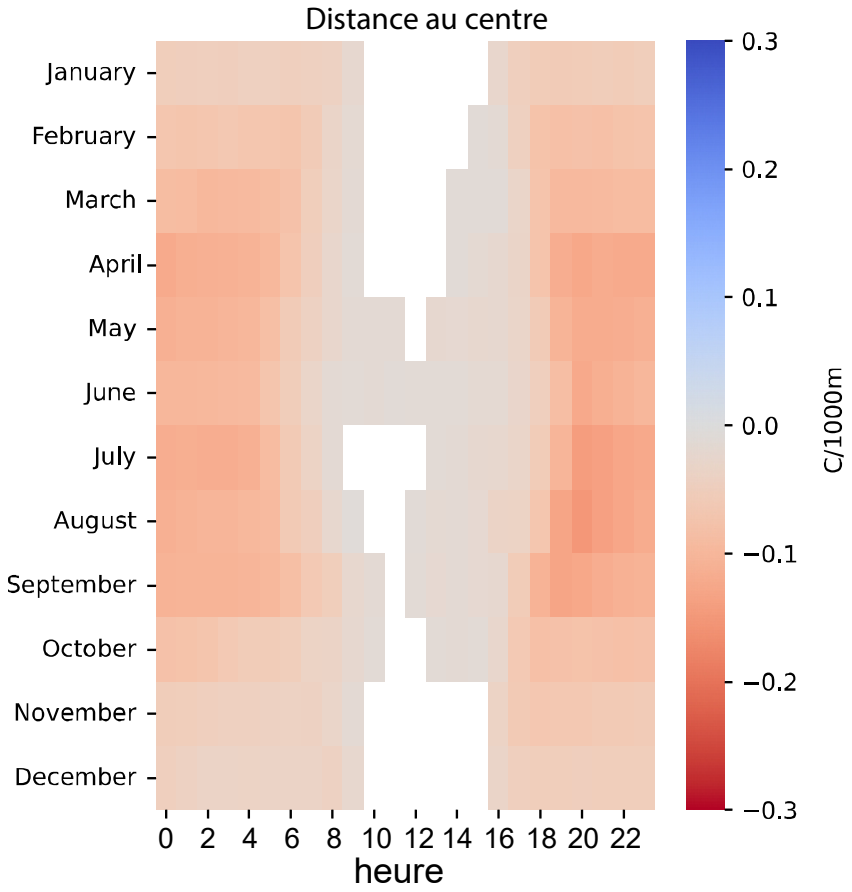
Après les moissons, les sols nus n'ont plus d'effet sur la T°

- Intervient plus rarement ;
- surtout en soirée de saison froide (octobre à mars) ;
- pouvant être présent nuit et jour en saison froide ;
- présent également le jour en hiver : négatif du flux de chaleur anthropogénique ?

Les 3 types de végétation se relayent dans la saison, la forêt est la plus déterminante.

4. Résultat 2 : qu’est qui réchauffe et qu’est ce qui rafraîchit ?

Le sens des forçages

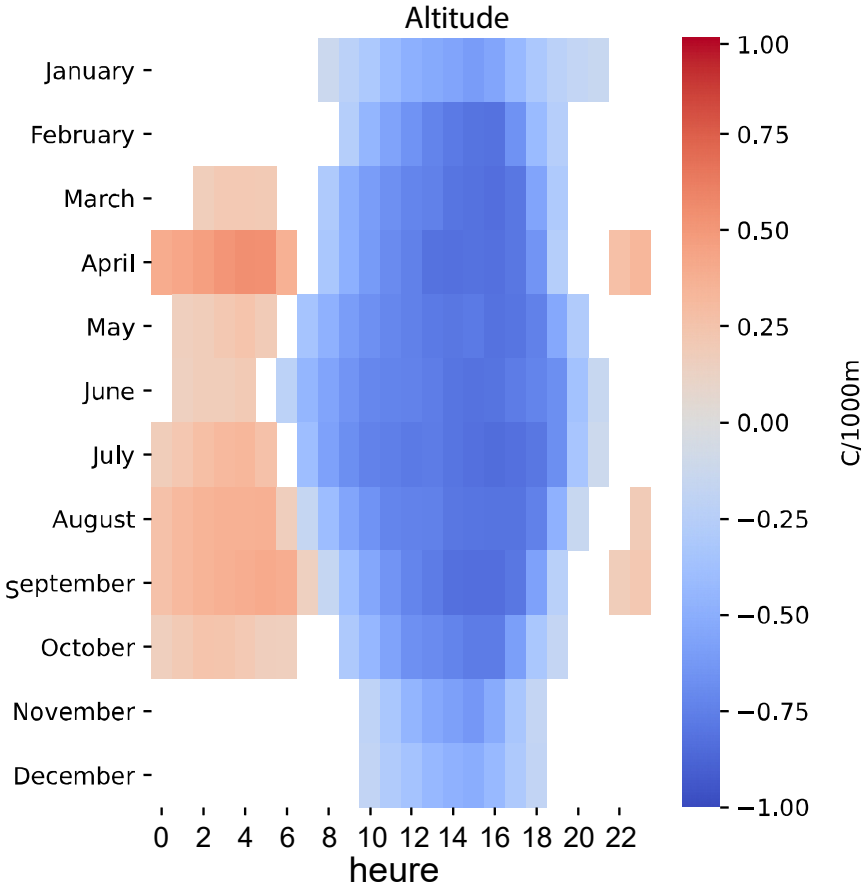


- systématiquement < 0 : plus on s’éloigne du centre, moins il fait chaud ;
- + marqué la nuit ;
- + marqué en saison chaude.

La signature de l’ICU

4. Résultat 2 : qu’est qui réchauffe et qu’est ce qui rafraîchit ?

Le sens des forçages

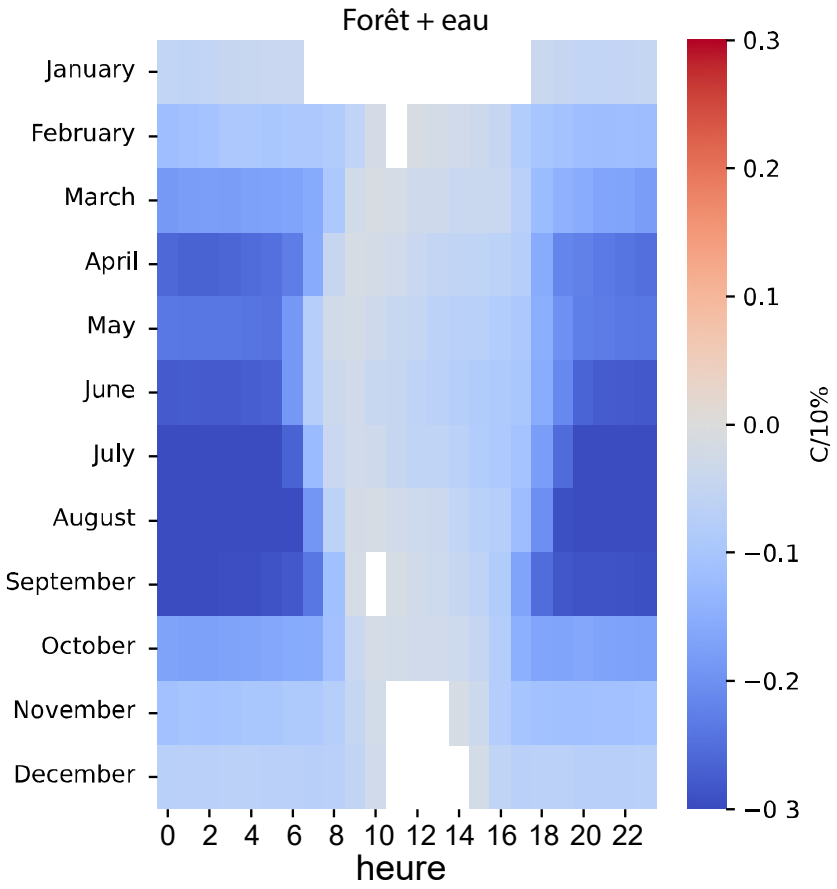


- renversement de signe entre le jour et la nuit ;
- le jour : gradient adiabatique => environ 0,6°C + frais en montant de 100 m ;
- la nuit : inversions thermiques dominent ;

- des inversions thermique se développent fréquemment la nuit ;
- surtout en début (avril) et fin (août-septembre) de saison chaude.

4. Résultat 2 : qu’est qui réchauffe et qu’est ce qui rafraîchit ?

Le sens des forçages



- systématiquement < 0 ;

+ il y a d’arbres et d’eau, - il fait chaud,

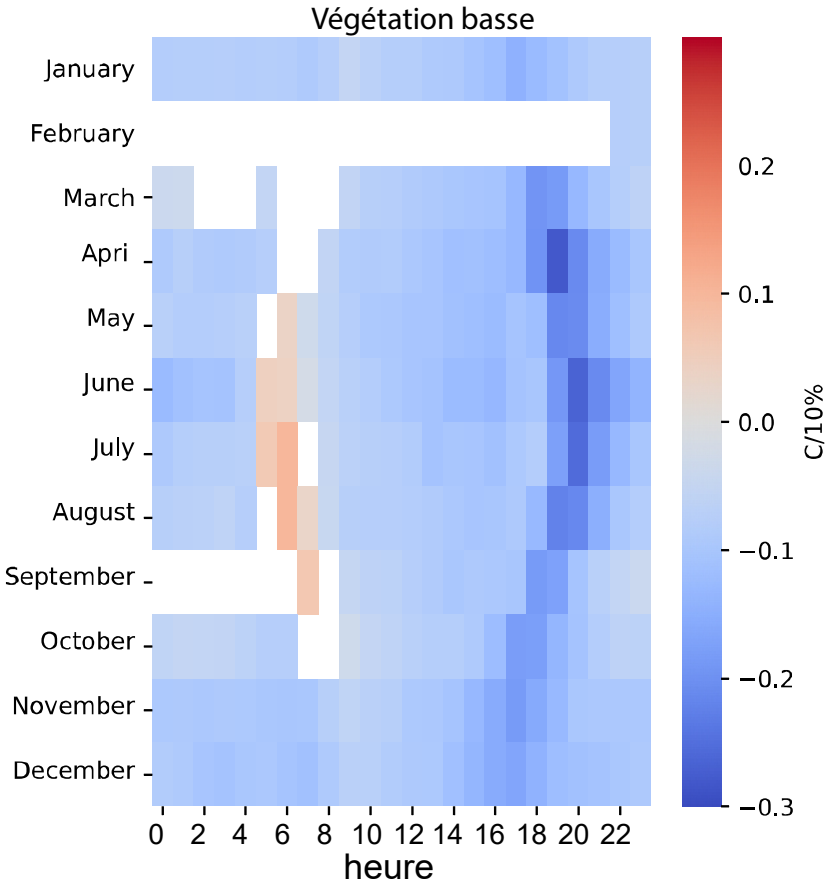
Tout le temps vrai.

- surtout les nuits de saison chaude (avril – septembre)

Si l’on veut rafraîchir les nuits d’été, on sait quoi faire !

4. Résultat 2 : qu’est qui réchauffe et qu’est ce qui rafraîchit ?

Le sens des forçages



- le + souvent < 0 ;
- surtout en début de nuit ;
- surtout en saison chaude ;
- parfois > 0 : systématiquement le matin.

En général la végétation basse contribue au rafraîchissement ;

En matinée les espaces ouverts bénéficient les premiers du soleil.
A noter que cette catégorie inclus les vignobles exposés au soleil levant.

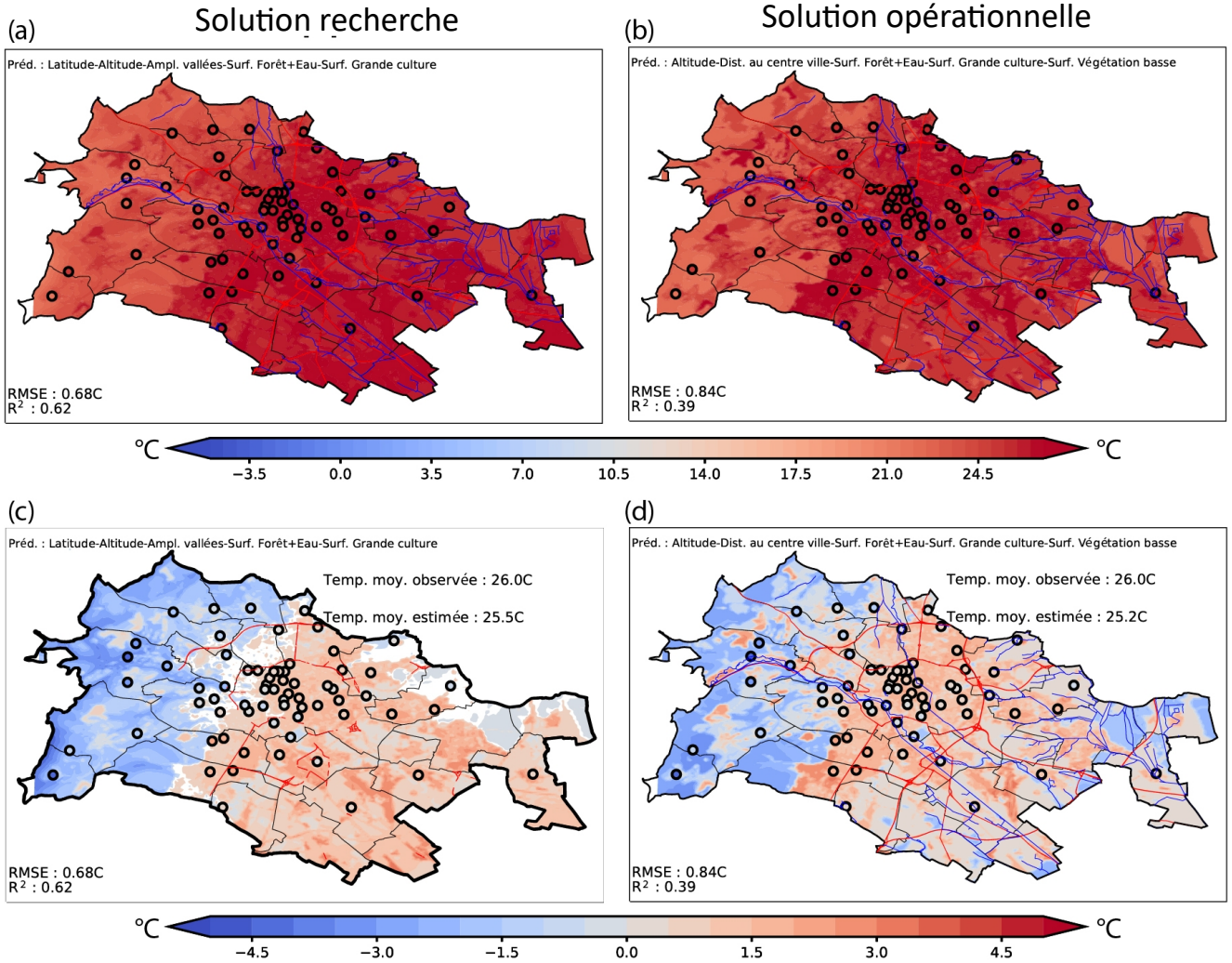
4. Résultat 3 : Enfin des cartes !

Thermographie du 31 juillet 2020 à 23h obtenue par régression linéaire multiple

Solution recherche | Solution opérationnelle

Température brute

Écart à la moyenne spatiale de la température calculée sur Dijon Métropole



Performances dégradées (RMSE et R^2) en mode opérationnel, mais patterns à peine modulés.

5. Discussion, conclusion et perspectives

Aux échelles temporelles considérées, quelques années à quelques décennies :

- le relief est constant ;

- l’occupation du sol peu changer : nécessité de mettre à jour les bases de données.

5. Discussion, conclusion et perspectives

Aux échelles temporelles considérées, quelques années à quelques décennies :

- le relief est constant ;

- l’occupation du sol peu changer : nécessité de mettre à jour les bases de données.

La tentation est donc forte de produire UNE carte et UNE seule. Le rêve des aménageurs, des habitants, des élus. Comment produire cette carte ?

- moyenner les températures puis interpoler ;

- interpoler puis moyenner ;

- moyenne ou médiane ;

- interpoler comment : des RLM, du kriegeage, les deux, etc.

5. Discussion, conclusion et perspectives

Aux échelles temporelles considérées, quelques années à quelques décennies :

- le relief est constant ;

- l'occupation du sol peu changer : nécessité de mettre à jour les bases de données.

La tentation est donc forte de produire UNE carte et UNE seule. Le rêve des aménageurs, des habitants, des élus. Comment produire cette carte ?

- moyenner les températures puis interpoler ;

- interpoler puis moyenner ;

- moyenne ou médiane ;

- interpoler comment : des RLM, du kriegeage, les deux, etc.

Le climatologue ne peut se satisfaire de la production d'UNE seule carte, ce serait nier la dynamique atmosphérique.

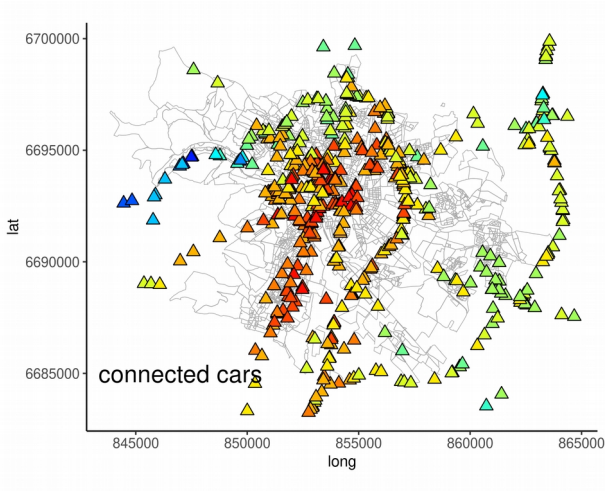
Le pédagogue ne peut se satisfaire de la production d'UNE seule carte, cela interdit de réfléchir aux déterminants.

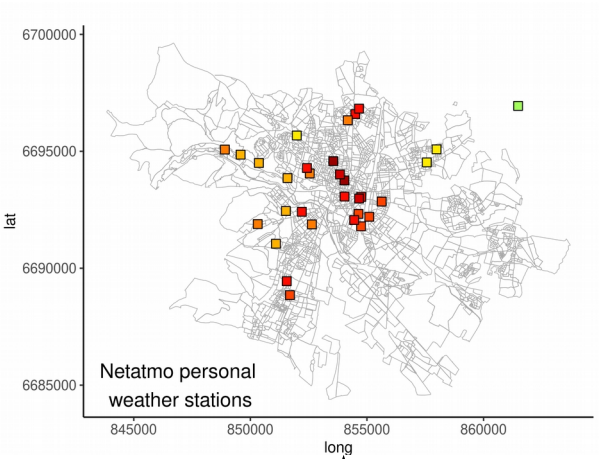
Nous avons produit des milliers cartes utiles pour :

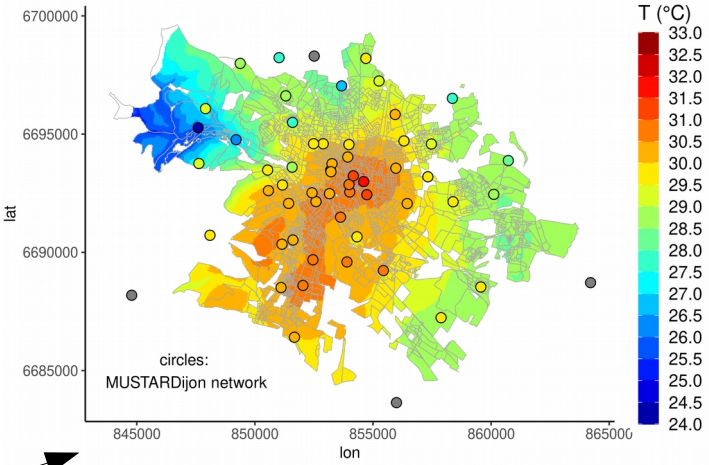
1) **mettre à jour les déterminants de la variabilité spatiale de la température de l'air le long des cycles annuels et diurnes ;**
2) **monitorer des températures de l'air en temps quasi-réel => utilité pour habitants (e.g., identifier des îlots de fraîcheur) ;**
3) **mettre en place des systèmes d'alerte plus fins que ceux existant à l'échelle des Dept (quand méthode d'interpolation appliquée aux prévisions) ;**
4) **croiser énergie – climat.**

Perspectives : des milliers de cartes sont inutilisables pour l'aménageur => nécessité de synthétiser par types, familles, etc..

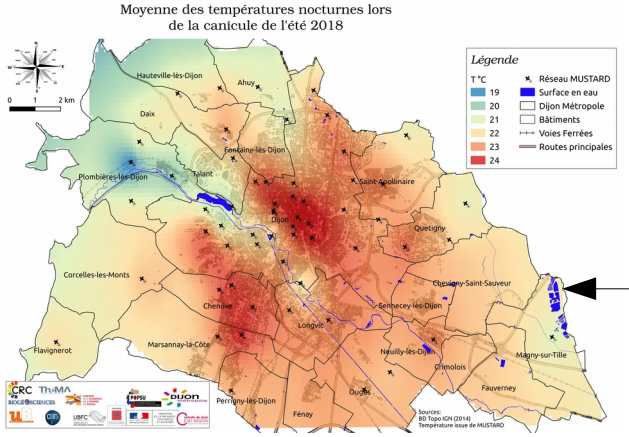
On peut aussi faire des cartes autrement selon des styles différents, ou avec d'autres données



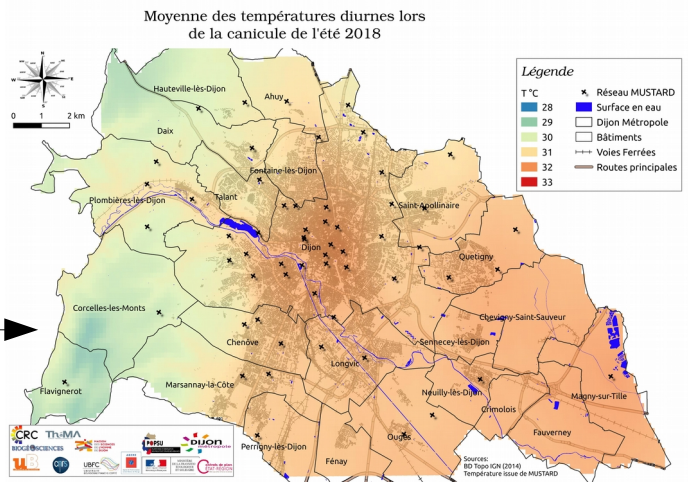




Marques et al. 2022



Richard et al. 2018



MERCI DE VOTRE ATTENTION