

Prise en compte des comportements énergétiques dans le modèle de climat urbain TEB et modélisation de l'îlot de chaleur des villes françaises

Robert Schoetter¹, Thomas Gardes², Julia Hidalgo³, Nathalie Long², Valéry Masson¹

- 1) CNRM, Météo-France/CNRS, Toulouse
- 2) LIENSs, Université de La Rochelle/CNRS
- 3) LISST, Université Toulouse - Jean Jaurès/CNRS

CNRM

Modélisation climat urbain et énergie du bâti



FNAU

Réseau d'agences d'urbanisme



Lab-STICC

Traitement de données géographiques



LATTS

Comportements énergétiques



LIENSs

Analyse spatiale et statistique de données



LIEU

Droit de l'urbanisme



LISST

Dynamique de territoires et politiques urbaines



LRA

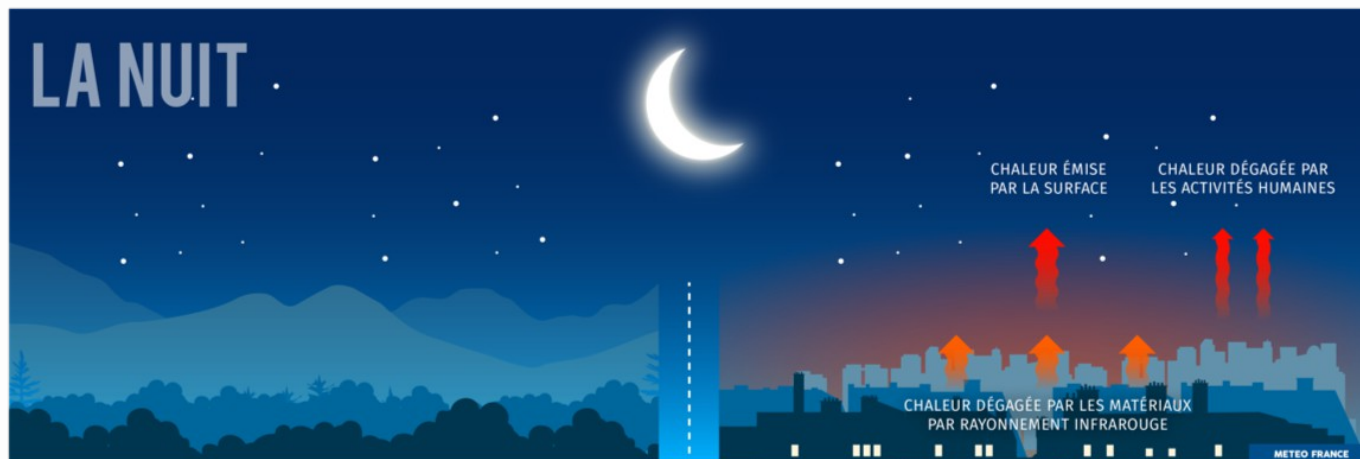
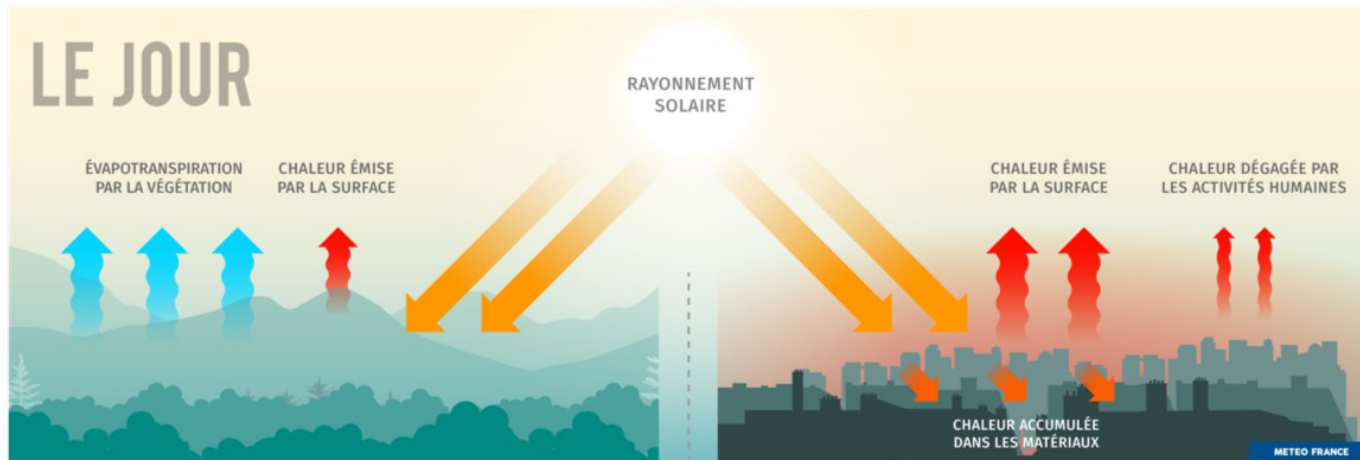
Morphologie urbaine, architecture



- **Le climat urbain et sa modélisation**
- **Prise en compte des comportements énergétiques dans le modèle de climat urbain TEB**
- **Modélisation de l'îlot de chaleur des villes françaises**
- **Conclusions et perspectives**

Le climat urbain et sa modélisation

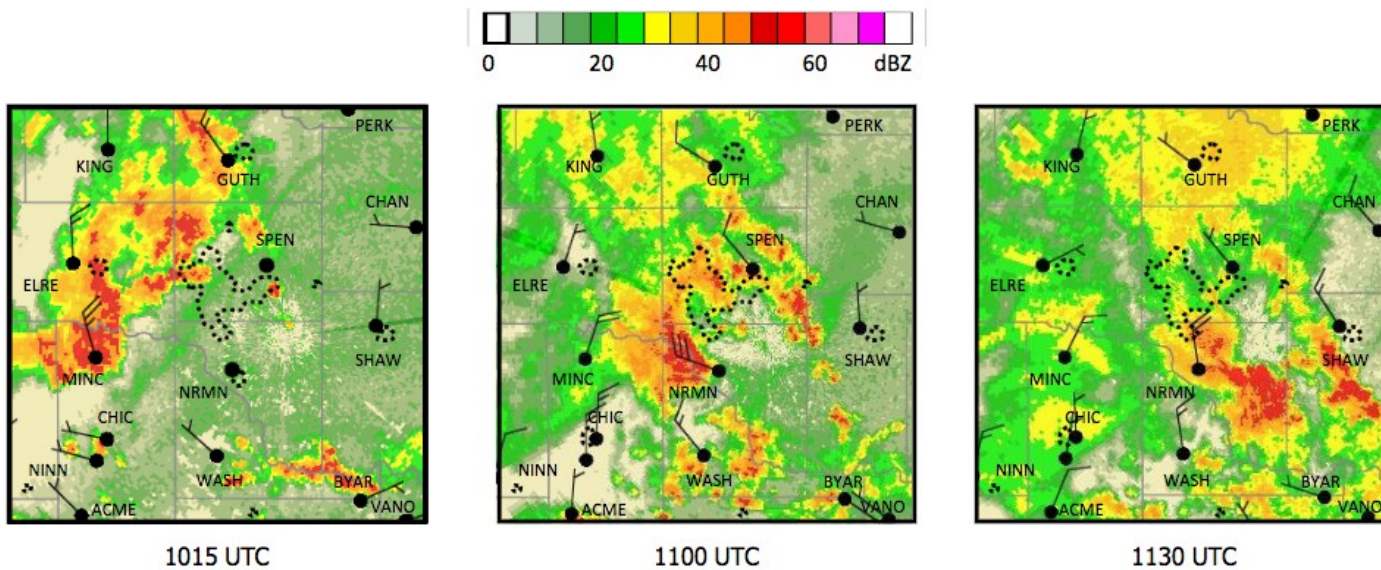
Les interactions surface-atmosphère en ville et en campagne



Conséquence : Modification des conditions météorologiques

Principaux phénomènes de climat urbain

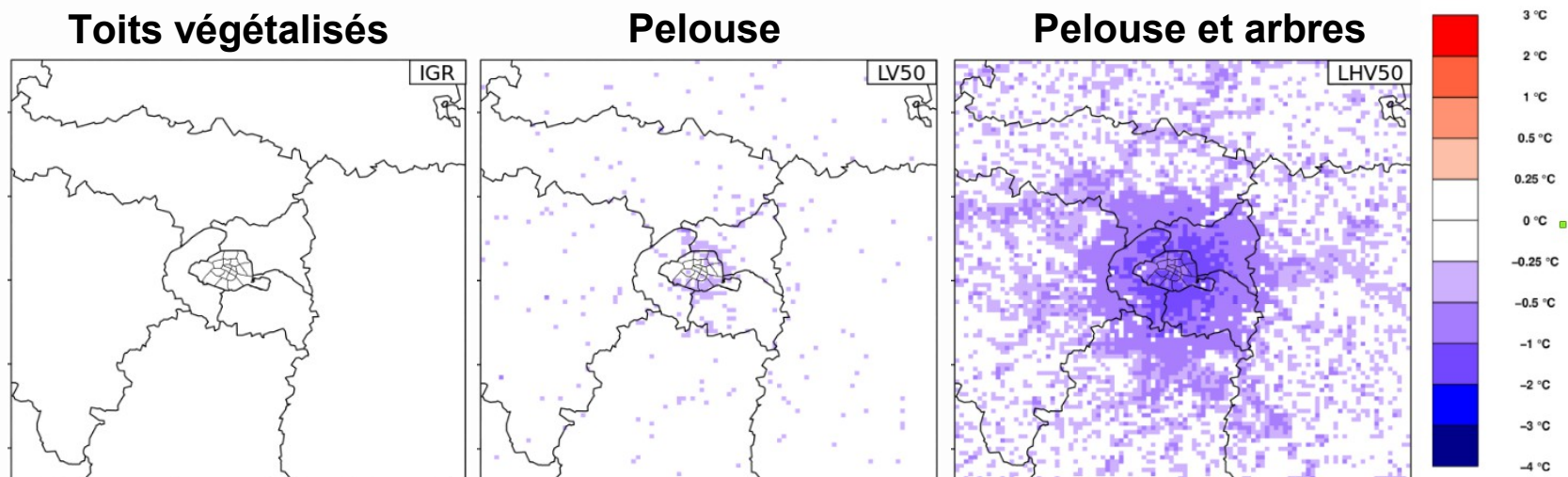
- Température (nocturne) plus élevée (îlot de chaleur ; jusqu'à 10 K)
- Humidité relative plus basse
- Modification de la précipitation
- Modification du confort thermique des habitants et de la consommation énergétique des bâtiments



Niyogi et al. (2006)

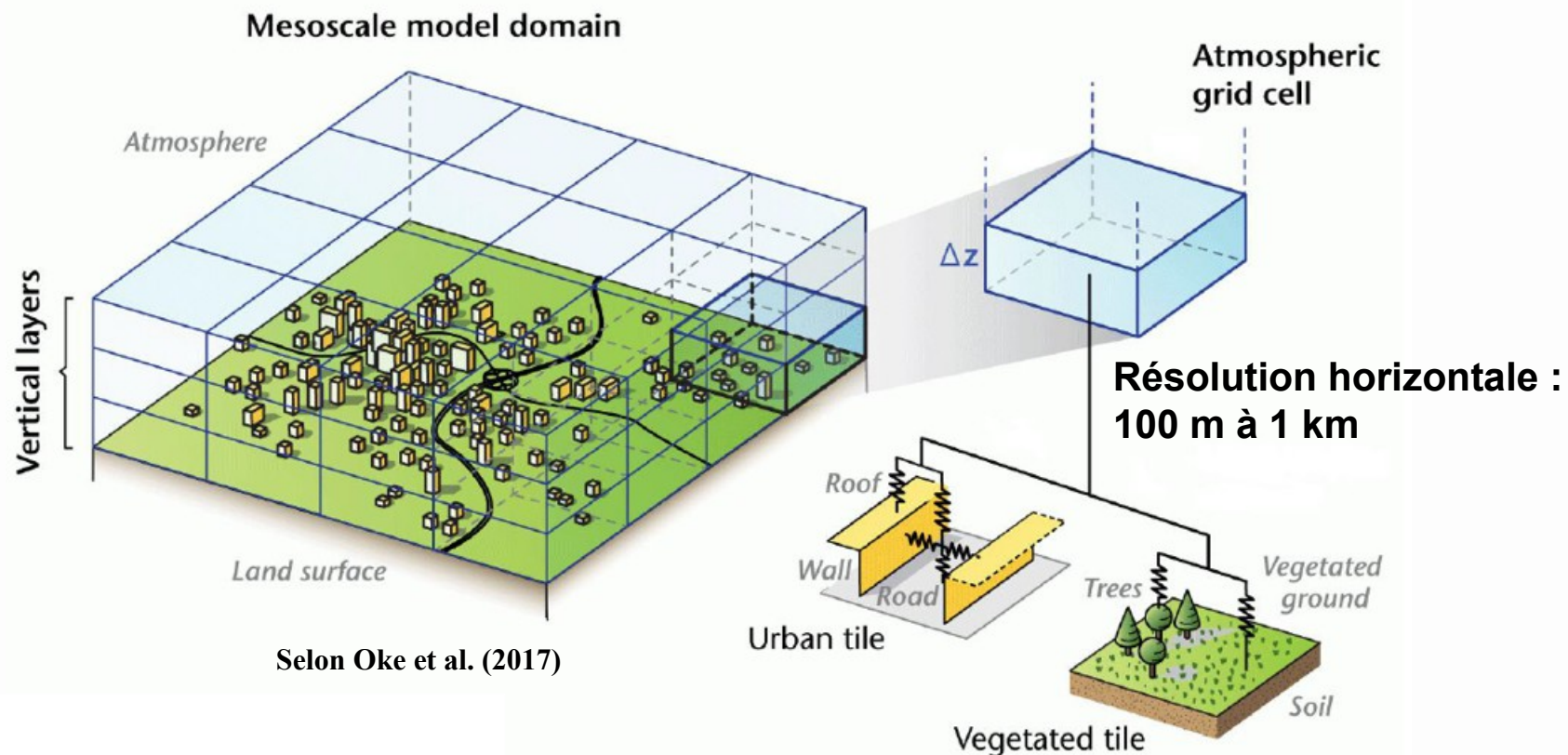
Pourquoi modéliser le climat urbain ?

- Quantification du climat urbain
- Etude de processus
- Efficacité de mesures d'atténuation et d'adaptation en ville
- Prévion de la météo. urbaine et de son impact sur les habitants



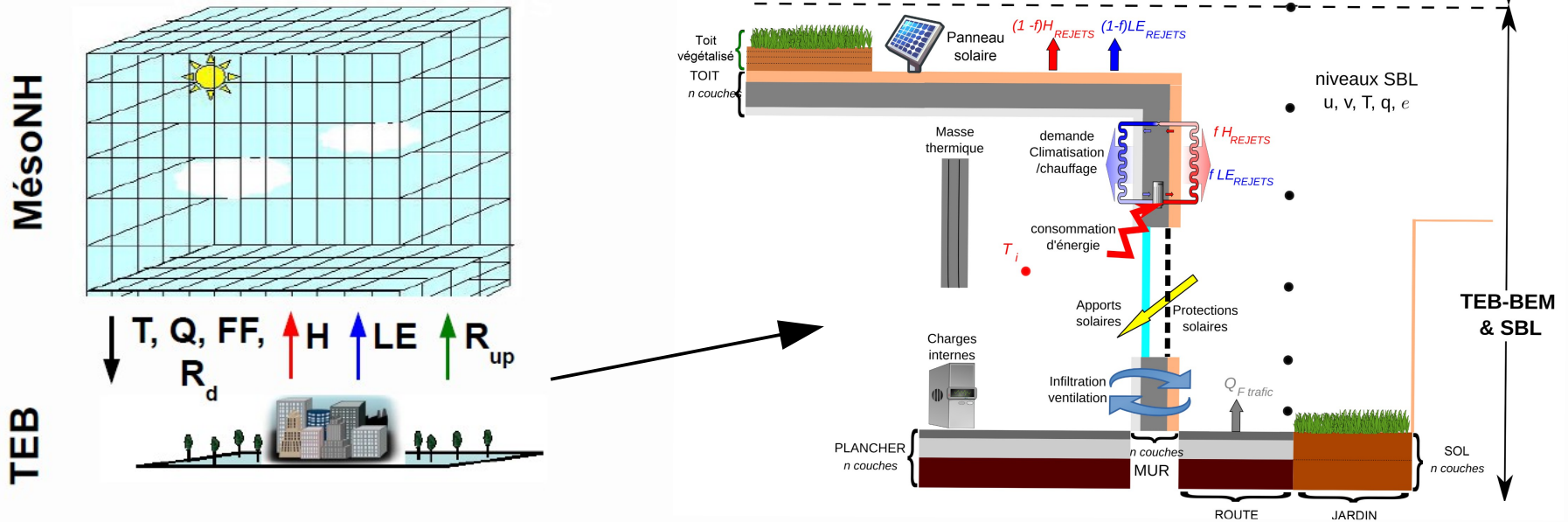
de Munck et al. (2018)

Modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier



Les bâtiments ne sont pas résolus et la géométrie urbaine est simplifiée (par exemple par l'approche dite de rue-canyon)

Modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier - A Météo-France

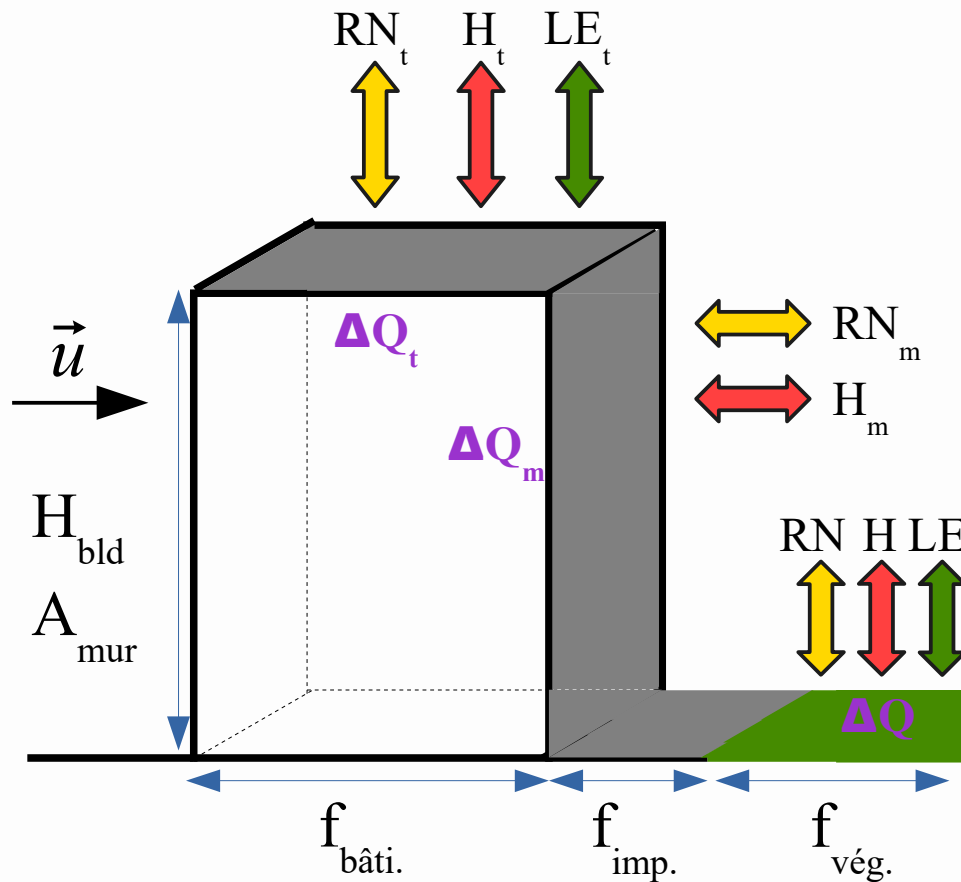


MésosNH : Calcule les conditions atmosphériques au-dessus de la ville

Town Energy Balance (TEB) : Calcule les échanges ville-atmosphère en fonction des conditions simulées par MésosNH

TEB considère : végétation urbaine, thermique du bâtiment, toits végétalisés, panneaux solaires, ...

Quelles données sur la morphologie urbaine ?



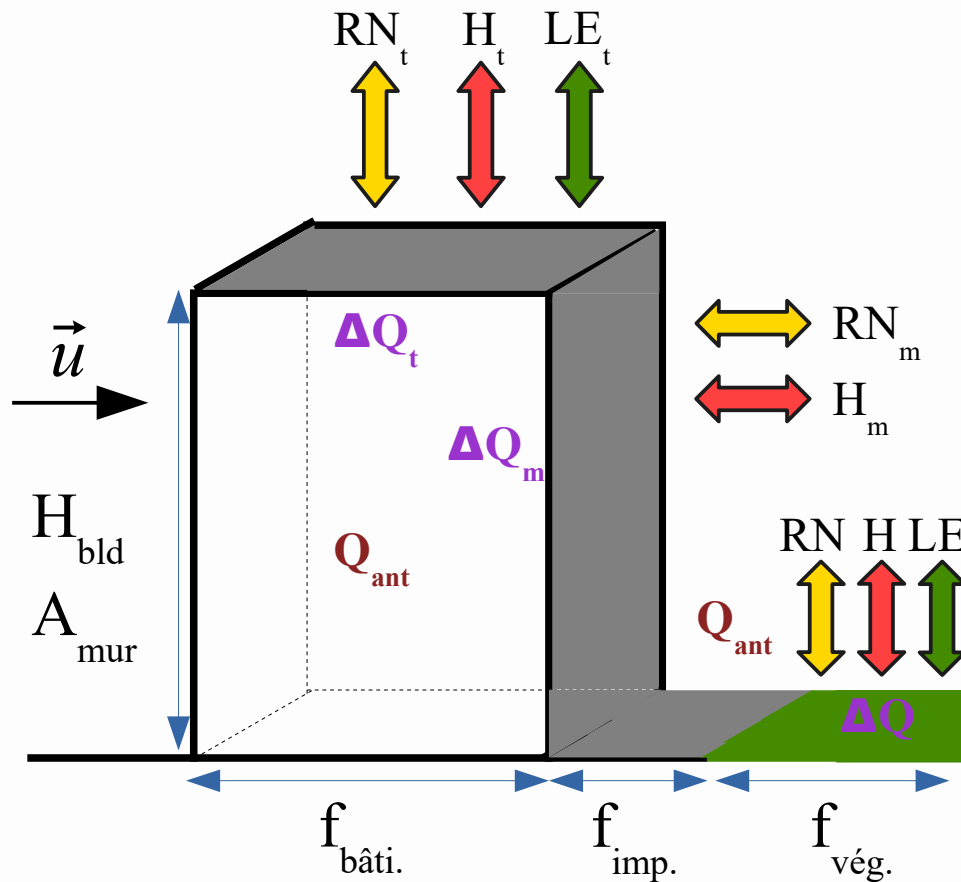
Morphologie

- Fraction de bâti, routes, ...
- Hauteur des bâtiments
- Surface de murs extérieurs

Matériaux

- Albédo, émis. des toits, murs
- Épaisseur toits, murs
- Conductivité thermique

Quelles données sur la morphologie urbaine ?



Peu de travaux antérieurs sur les usages et comportements énergétiques

Morphologie

- Fraction de bâti, routes, ...
- Hauteur des bâtiments
- Surface de murs extérieurs

Matériaux

- Albédo, émis. des toits, murs
- Épaisseur toits, murs
- Conductivité thermique

Usage, comportements

- Chauffage, climatisation
- Électroménager
- Ventilation, volets
- Trafic

Stratégie pour la modélisation du climat urbain en France dans le projet MApUCE

Données urbaines

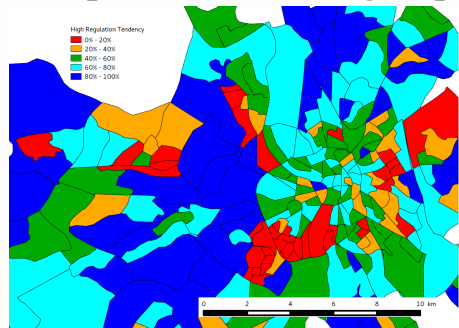
Morphologie



Matériaux de construction



Comportements énergétiques

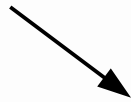


Stratégie pour la modélisation du climat urbain en France dans le projet MApUCE

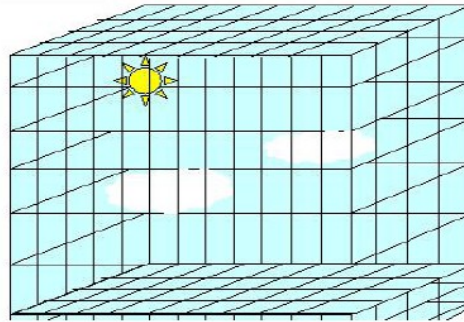
Données urbaines

Modèles numériques

Morphologie



MésoNH



T, Q, FF, R_d (downward arrow)
 H (upward arrow)
 LE (upward arrow)
 R_{up} (upward arrow)

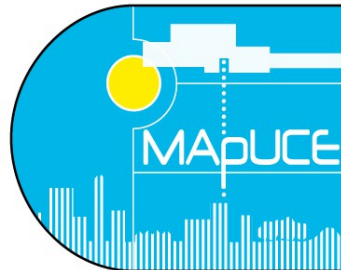
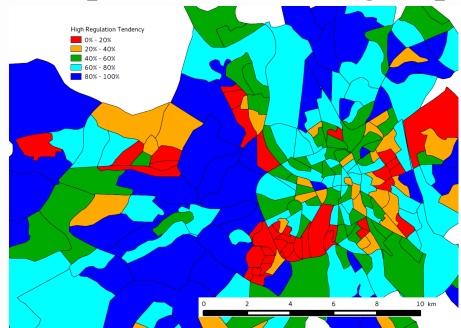


Matériaux de construction



TEB

Comportements énergétiques



GAME
FNAU
IRSTV
LATTS
LIENSS
LIEU
LISST
LRA

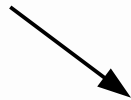
Stratégie pour la modélisation du climat urbain en France dans le projet MAPUCE

Données urbaines

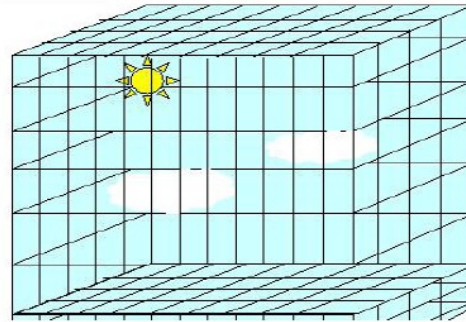
Modèles numériques

Descente d'échelle

Morphologie



MésóNH



↓ T, Q, FF, R_d ↑ H ↑ LE ↑ R_{up}

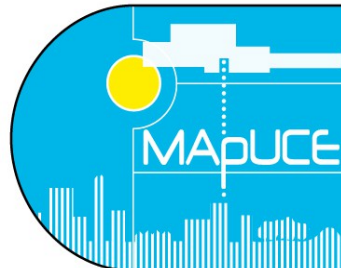
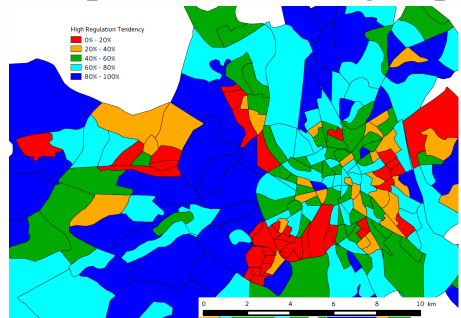


TEB

Matériaux de construction

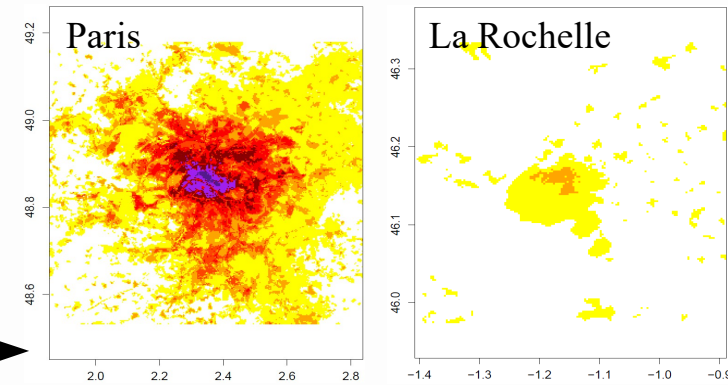


Comportements énergétiques

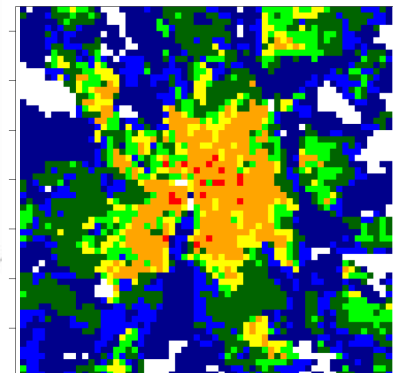


GAME
FNAU
IRSTV
LATTS
LIENSS
LIEU
LISST
LRA

ICU nocturne fort estival



Consommation d'énergie pour le chauffage (Toulouse)



Prise en compte des comportements énergétiques dans le modèle de climat urbain TEB

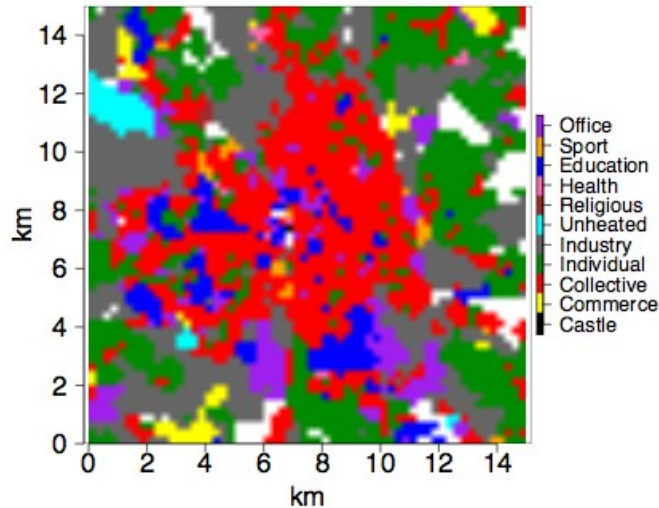
Quels comportements faut-il considérer ?

- **Vis à vis de leur pertinence pour le climat urbain**
 - Chauffage/climatisation peut dominer le bilan d'énergie en ville
 - Electroménager, éclairage, eau chaude sanitaire
 - Actionnement des fenêtres et volets (conditions à l'intérieur, consommations énergétiques)

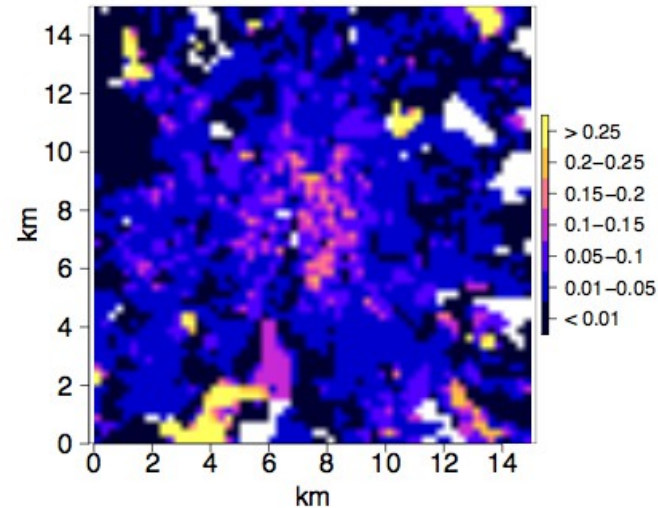
- **Vis à vis de la situation actuelle en France Métropolitaine**
 - Presque tous les bâtiments sont équipés de chauffage
 - Climatisation encore peu répandue
 - Mixité des usages (résidentiel, commerce, tertiaire) surtout dans les centres des villes

Variété des usages et des comportements à l'échelle du quartier

Usage majoritaire (Toulouse)



Fraction d'usage commercial



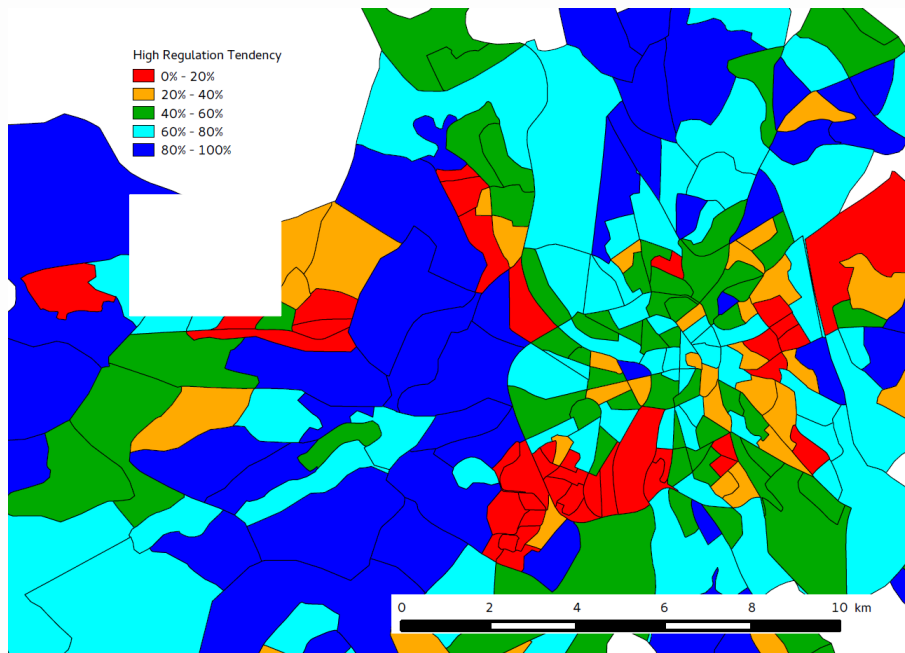
Détermination des usages :

- Attributs 'PAI' de la BDTOPO de l'IGN
- Typologie du bâtiment (suppositions de plausibilité)
- Nombre d'habitants par m² de plancher

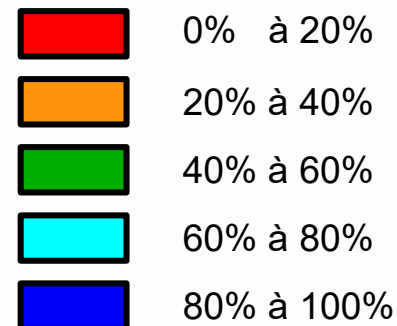
Variété des usages et des comportements à l'échelle du quartier

Indicateurs de comportements énergétiques

- **Tendance à régulation** → f (type et combustible du chauffage, âge)
- **Équipement-Intensité-Usage** → f (#habitants, surface habitable, âge)



Pourcentage de ménages avec forte Tendance à régulation, Toulouse



Considération de la variété des usages et des comportements énergétiques dans TEB

Distinction de 6 usages/comportements à l'échelle du quartier

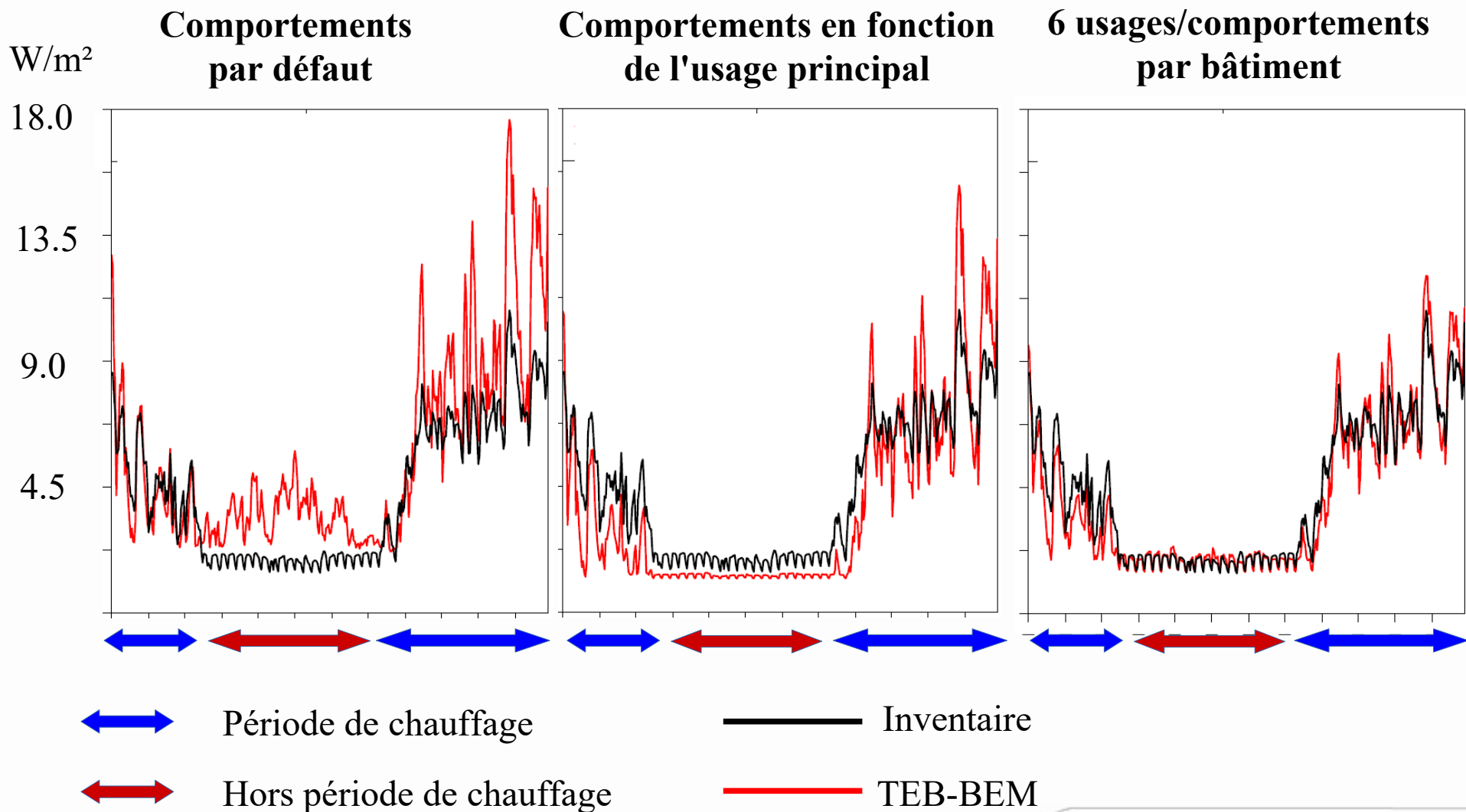
- Non-chauffé, tertiaire, commercial, 3 températures de consigne pour le chauffage (18,4 °C ; 20,4 °C ; 22,3 °C)
- Valeurs des consignes de chauffage depuis Energihab
- Pourcentage des consignes de chauffage depuis [Tendance à régulation](#)
- Rejets de chaleur dus à l'électroménager depuis [Equipment-Intensité-Usage](#) et Enquête Nationale Logement

Evaluation de l'apport de la représentation des comportements énergétiques

- Campagne CAPITOUL (mars 2004 à 2005 ; Masson et al., 2008)
- Conditions météorologiques mesurées par mât pneumatique
- Morphologie et architecture via base de données MAPUCE
- Inventaire des consommations énergétiques de Pigeon et al. (2007)

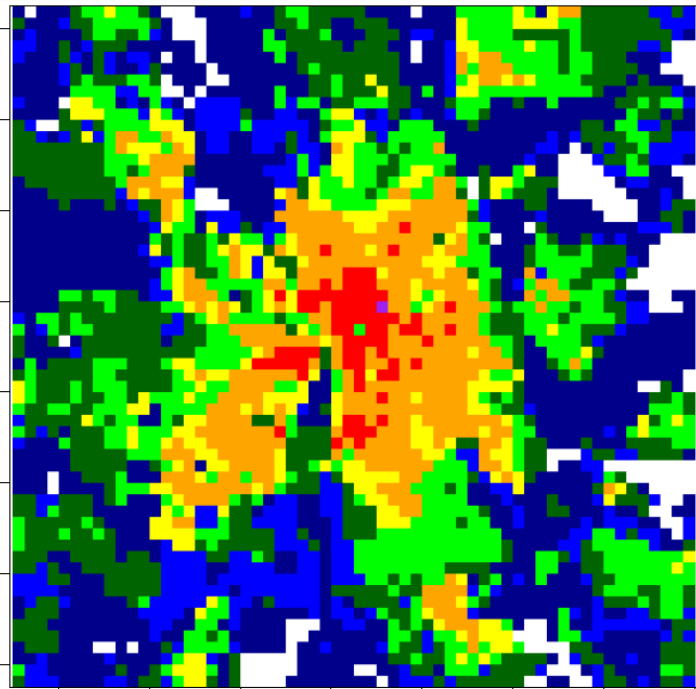


Série temporelle des consommations quotidiennes moyennées sur l'agglomération



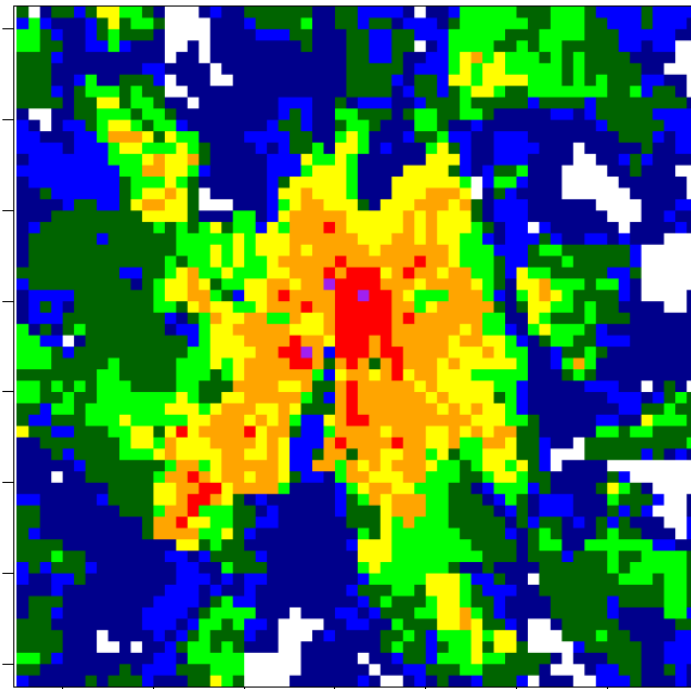
Distribution spatiale des consommations énergétiques en hiver

Simulation



15 km

Inventaire



15 km



■ Conclusions

- Amélioration de TEB pour considérer une variété d'usages et de comportements énergétiques
- Meilleure simulation des consommations énergétiques pour Toulouse
- Bémols : Nécessite beaucoup de données, évalué que sur une ville, risque de surcalibration suite aux nombreux paramètres incertains

■ Perspectives

- Evaluation des consommations (anneles) sur plus de villes
- Comportements liés à la climatisation
- Comportements lors de situations extrêmes
- Exploitation de nouvelles sources de données (participatives)



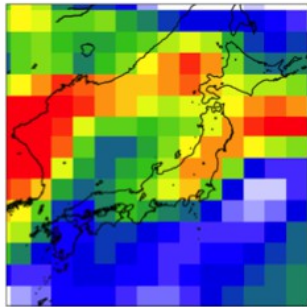
Modélisation de l'îlot de chaleur des villes françaises

Les méthodes de descente d'échelle

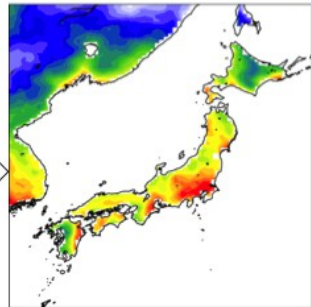
Descente d'échelle : Champs météorologiques à haute résolution à partir de simulations à basse résolution ou d'observations éparses

- Statistique : Relations entre variables de grande et petite échelle
- Dynamique : Simulation numérique de longue durée et haute résolution
- Statistique-dynamique : Relations stat. + simulations de courte durée

Global Climate Model (GCM)



High-Resolution Regional Climate Model (RCM)



Descente d'échelle statistique-dynamique pour l'îlot de chaleur urbain

Fondement théorique de la descente d'échelle :
L'intensité et la distribution spatiale de l'îlot de chaleur urbain varient avec la situation météorologique

- **Îlot de chaleur plutôt fort si**
 - Vent faible
 - Ciel dégagé
 - Humidité relative basse

- **Situations météorologiques à distinguer**
 - Beau temps, différentes directions du vent
 - Mauvais temps, différentes directions du vent
 - A déterminer via une méthode objective : classification en types de temps de Hidalgo et al. (2014) et Hidalgo et Jougla (2018)

Incertitudes de la descente d'échelle statistique-dynamique

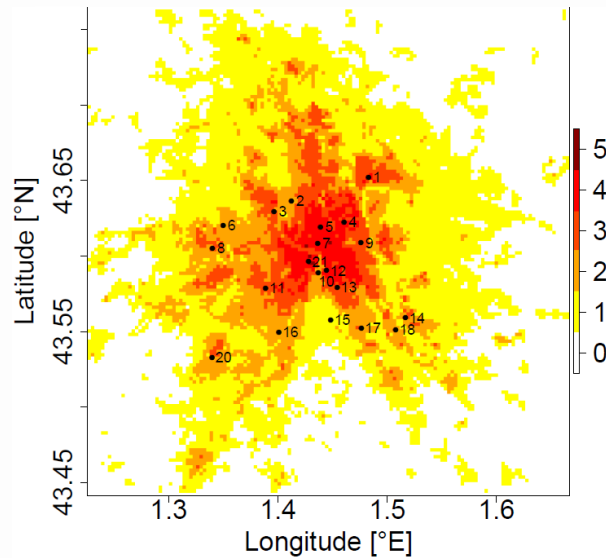
- Est-ce que l'intensité de l'ICU par type de temps est bien simulée ?
- Combien de jours faut-il simuler par type de temps ?

**Quantification via des simulations de longue durée pour
Toulouse et Dijon et comparaison à des observations de haute qualité**

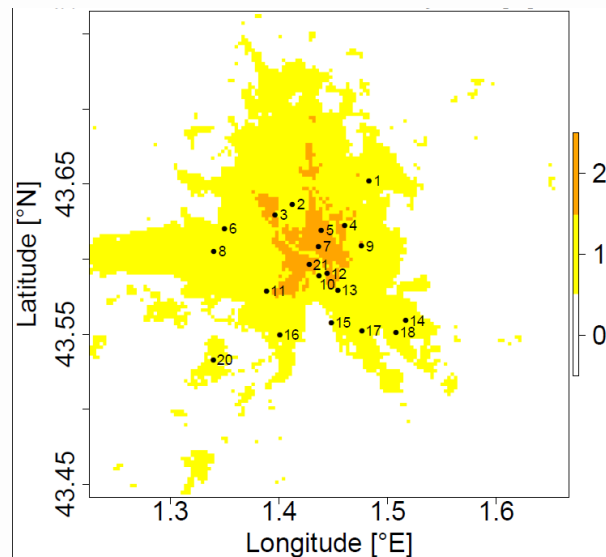
Est-ce que l'intensité de l'ICU est bien simulée ?

Printemps
 $\Delta T = 13 \text{ K}$
 $\overline{FF} = 1.8 \text{ m/s}$

Intensité ICU [K], 2 m



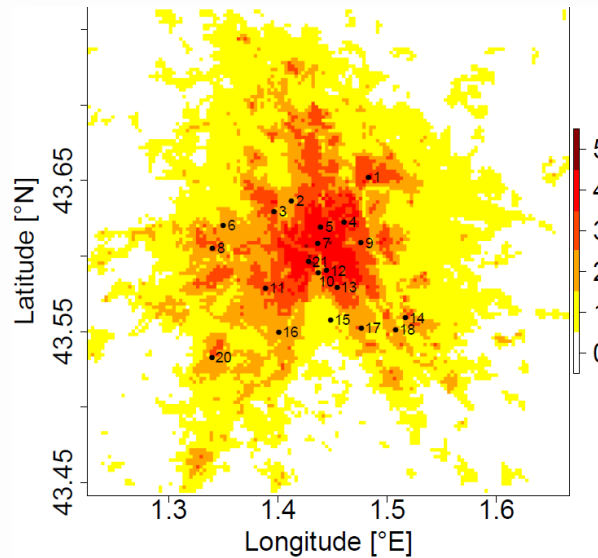
Printemps
 $\Delta T = 5 \text{ K}$
 $\overline{FF} = 4.5 \text{ m/s}$



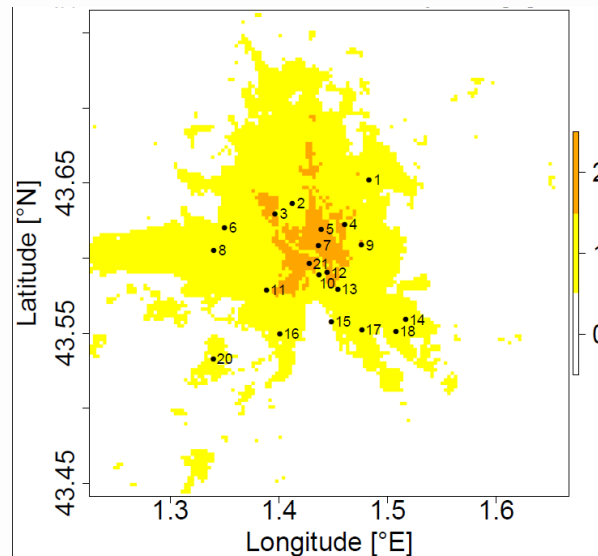
Est-ce que l'intensité de l'ICU est bien simulée ?

Printemps
 $\Delta T = 13 \text{ K}$
 $\overline{FF} = 1.8 \text{ m/s}$

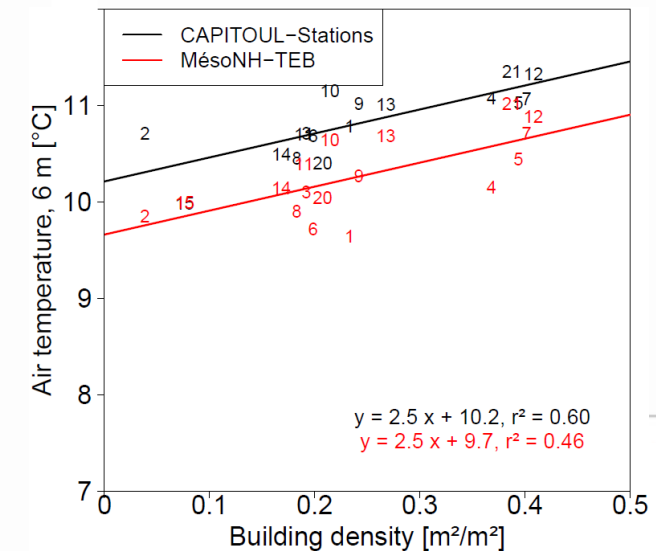
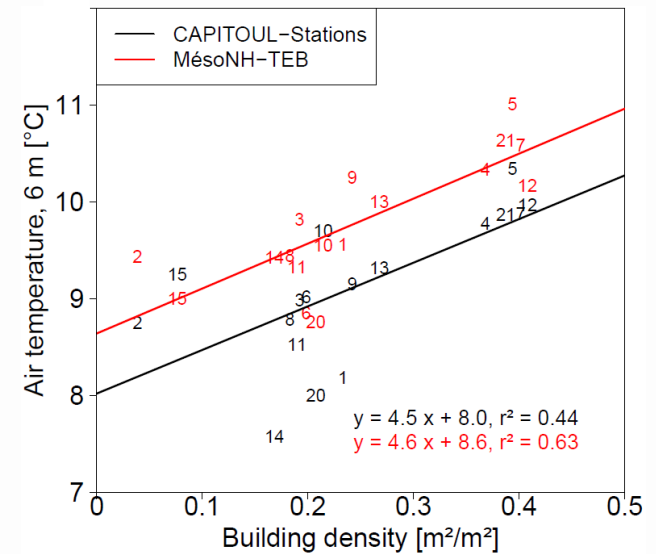
Intensité ICU [K], 2 m



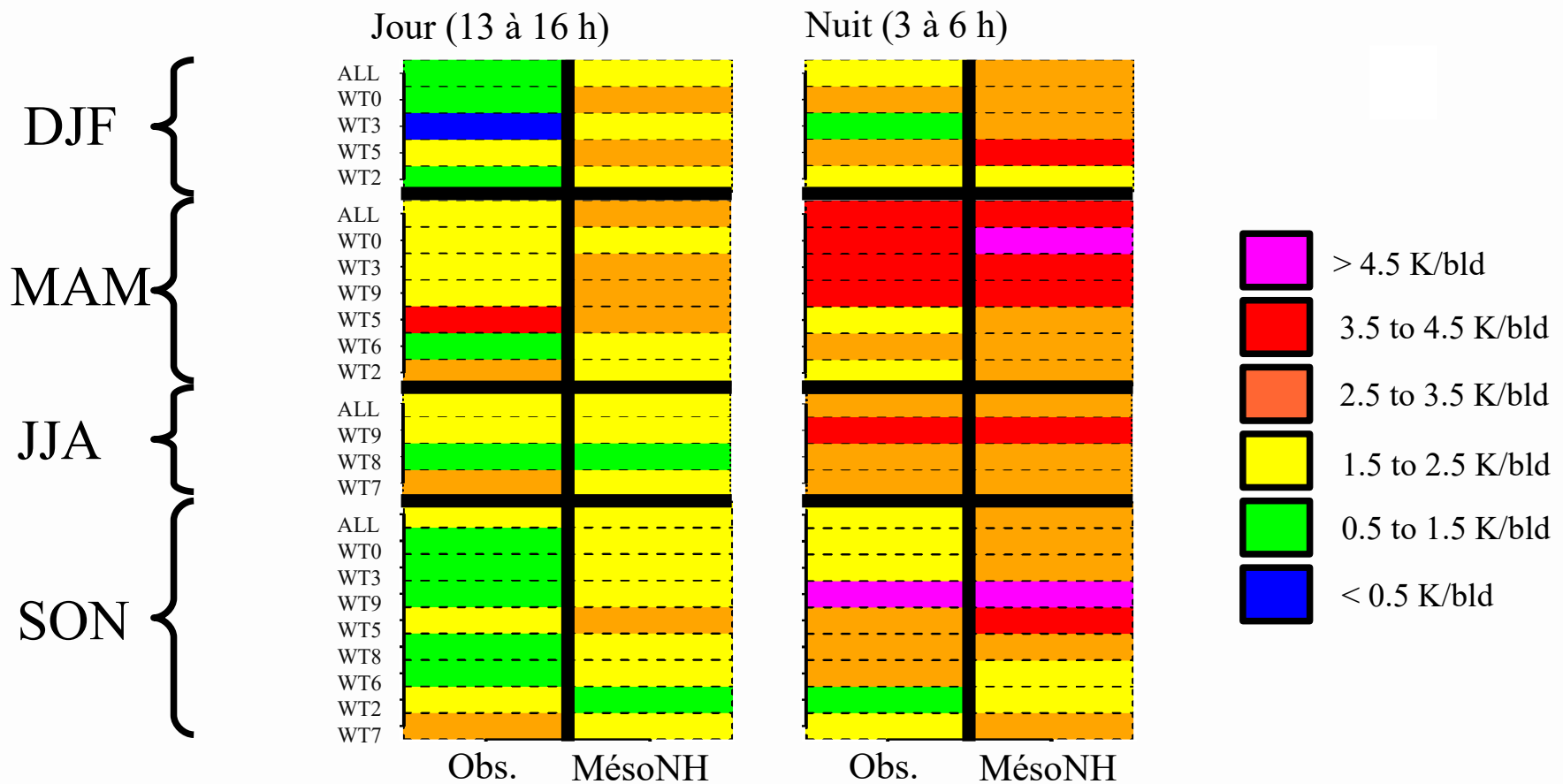
Printemps
 $\Delta T = 5 \text{ K}$
 $\overline{FF} = 4.5 \text{ m/s}$



Sensibilité à la densité des bâtiments



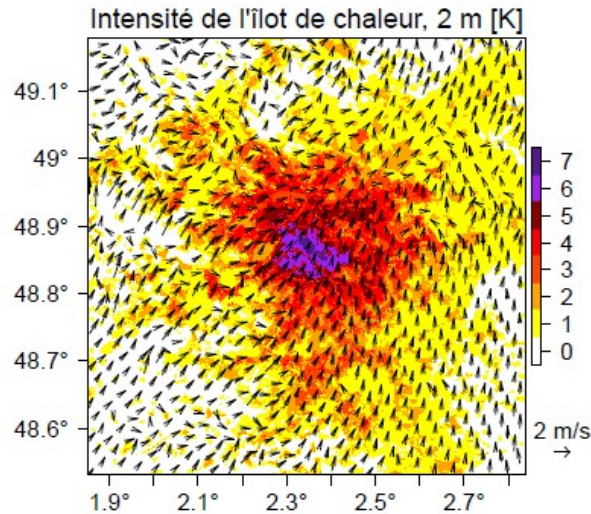
Est-ce que l'intensité de l'ICU est bien simulée ?



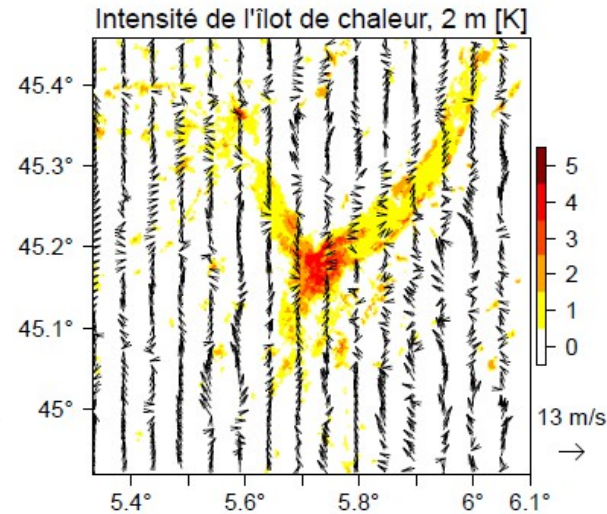
- Intensité de l'ICU bien simulée, sauf surestimation en hiver
- Il faut simuler 3 à 6 jours par type de temps

Application de la descente d'échelle pour un type de temps estival favorable à un fort ICU

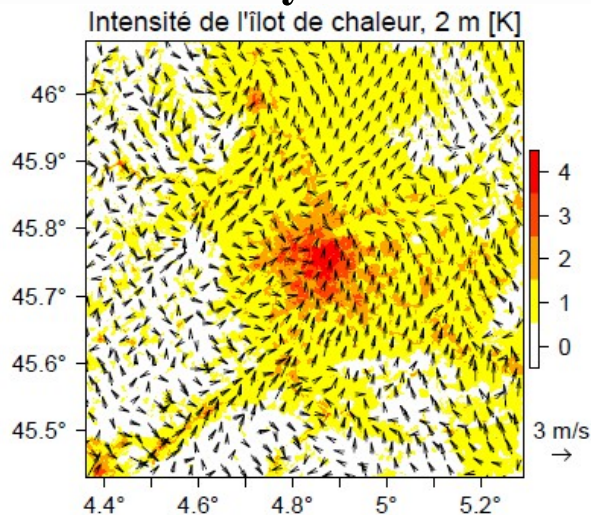
Paris



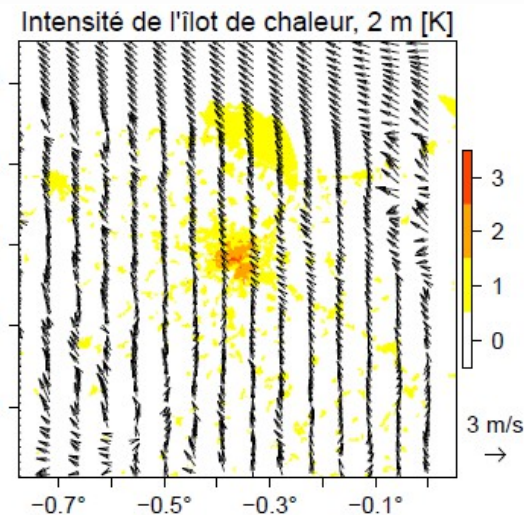
Grenoble



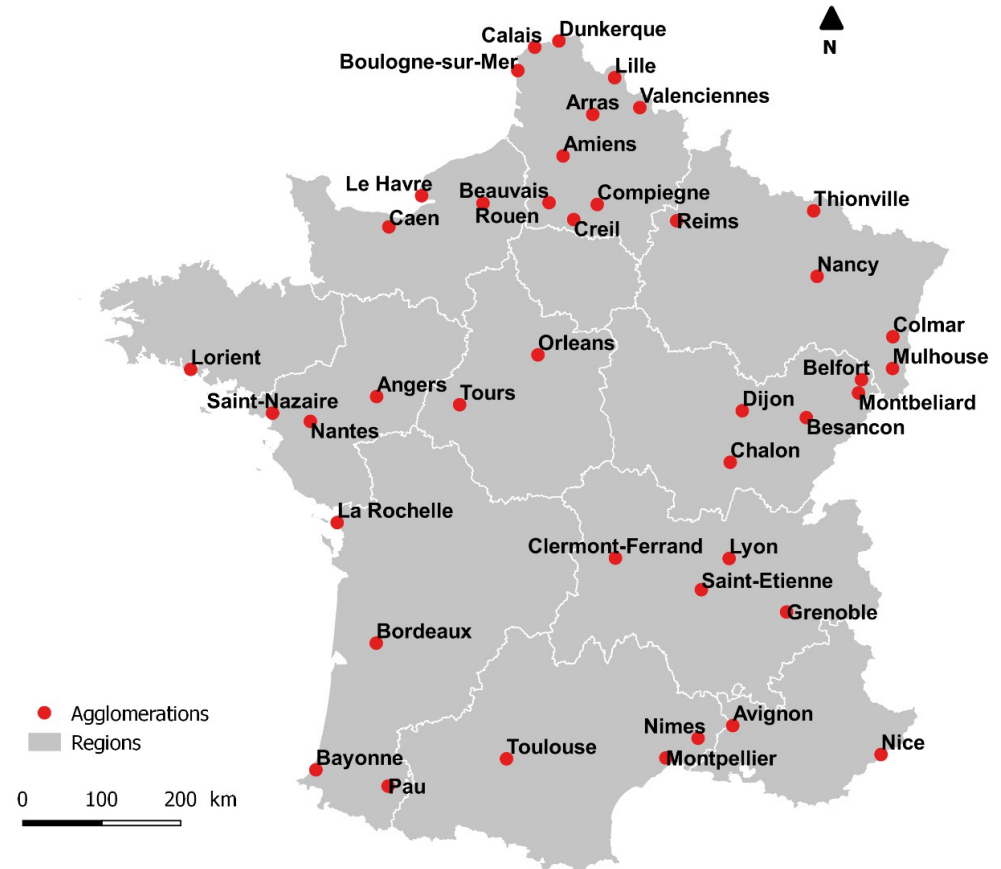
Lyon



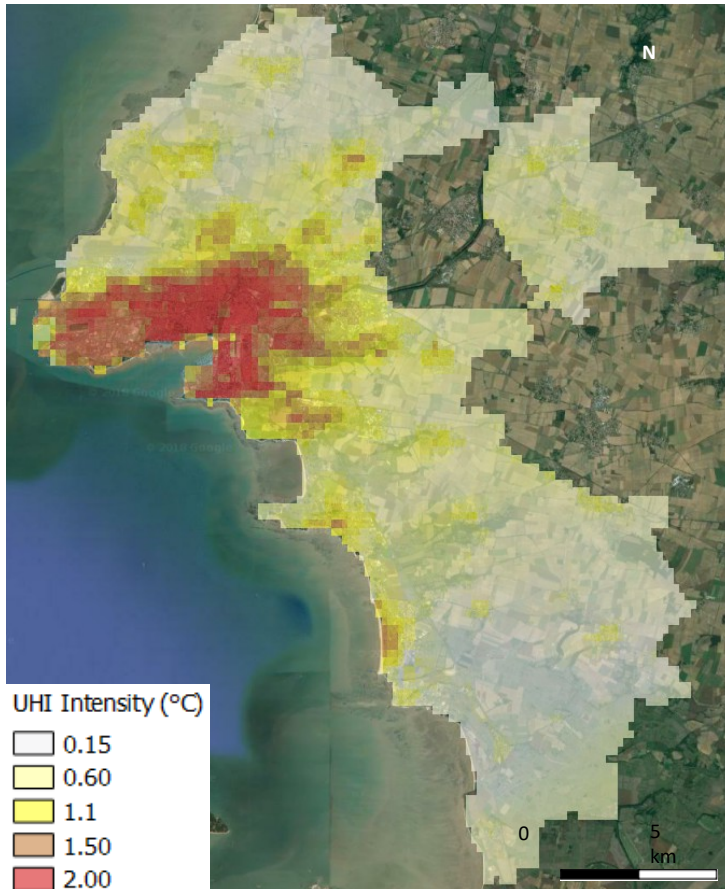
Caen



42 unités urbaines simulées



Méthodologie



Moyennes d'intensités d'ICU sur le créneau 21h-23h : Exemple de La Rochelle

Intensités d'ICU simulées par MésosNH-TEB
 Moyennées sur 21h-23h
 Intensité moyenne d'ICU par LCZ

	LCZ	△	AREA	AREA_P	T21_23_mea
7	1		6814.625499...	0.00000	1.55263
9	2		555318.4338...	0.29000	2.22306
8	3		2574103.900...	1.36000	1.84280
11	4		93076.14747...	0.04000	2.00720
10	5		2161709.622...	1.14000	1.90702
1	6		37451883.80...	19.90000	1.14612
0	7		214542.9407...	0.11000	0.59285
3	8		24892999.40...	13.20000	0.99782
2	9		32305288.29...	17.10000	0.56518
5	D		87667011.10...	46.60000	0.37519
4	E		111205.0544...	0.05000	1.56798
6	G		35443.91125...	0.01000	0.64751

Code de la LCZ

Surface absolue et relative sur
l'unité urbaine




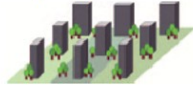

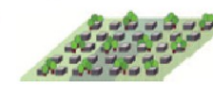
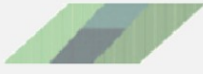


Intensité moyenne de l'ICU
par LCZ

Méthodologie

ANOVA pour analyser lien entre LCZ et intensité d'ICU

Régressions linéaires pour quantifier la corrélation entre la proportion (%) de chaque LCZ et l'intensité moyenne de l'ICU sur l'unité urbaine

Analyses par LCZ et sur LCZ agrégées :

Name	LCZ	Description
Compact LCZ	1. Compact high-rise  2. Compact midrise  3. Compact low-rise 	LCZ compactes, de toutes hauteurs
Open LCZ	4. Open high-rise  5. Open midrise  6. Open low-rise 	LCZ open, de toutes hauteurs
Nature LCZ	D. Low plants  E. Bare rock or paved  G. Water 	LCZ de nature

Résultats

ANOVA confirment la relation entre le type d'LCZ et l'intensité d'ICU au sein d'une unité urbaine ($p < 10^{-5}$)

Modèles de régressions linéaires :

Variables	Adjusted R ²	p-value
% de chaque LCZ	0.324	0.03
LCZ agrégées	0.419	< 2.10-5

Résultats

Différences d'intensités d'ICU entre les LCZ compactes et les LCZ de nature selon les types de climats locaux (Joly et al., 2015)

Climat	Frank-med.	Weather-med.	Mountain	Frank-ocean.	SW-Basin	Deg-ocean.	Weather-ocean.	Semi-conti.
Différence (°C)	0.762	0.957	1.283	1.345	1.367	1.527	1.537	1.562

Modélisation de l'îlot de chaleur urbain

- Conclusions et perspectives

■ **Conclusions**

- Méthode de descente d'échelle pour l'ICU évaluée (presque) avec succès
- Les LCZ expliquent 40% de la variance de l'intensité de l'ICU, mais pas tout
- Influence du climat régional, (du relief, de la structure de la ville, ...)

■ **Perspectives**

- Simulation de tous les types de temps pour quelques villes (Paris, ...)
- Reconstruction de séries temporelles avec méthode des types de temps
- Réflexions pour la descente d'échelle vers l'échelle du bâtiment

Couplage ville-atmosphère pas à la surface uniquement



Perspectives moyen-terme

- La modélisation à la micro-échelle

