

Cécile de Munck

Unité de recherche : CNRM-GAME/GMME/TURBAU

Directrice de thèse : Aude Lemonsu

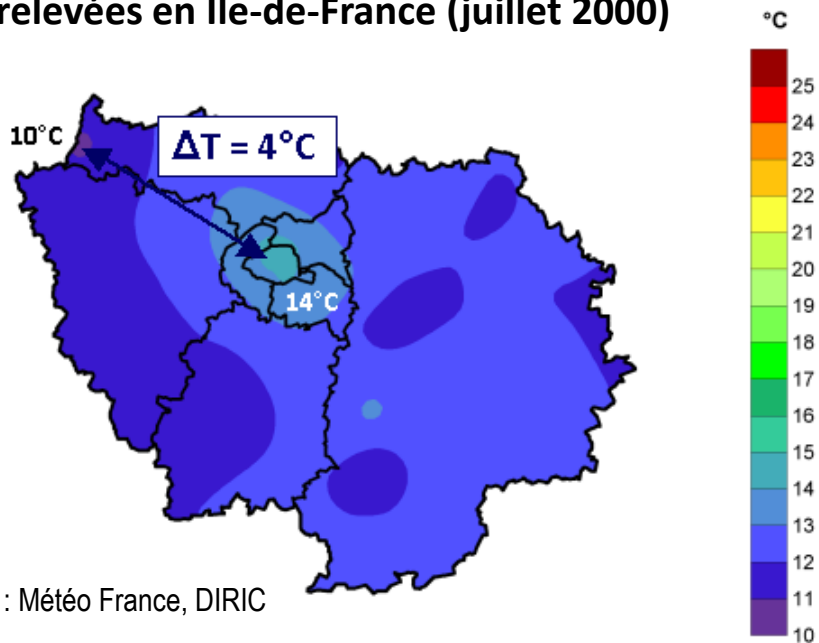
Modélisation de la végétation urbaine
et des stratégies d'adaptation au changement climatique
pour l'amélioration du confort climatique
et de la demande énergétique en ville



8 novembre 2013

Un micro-climat particulier en ville

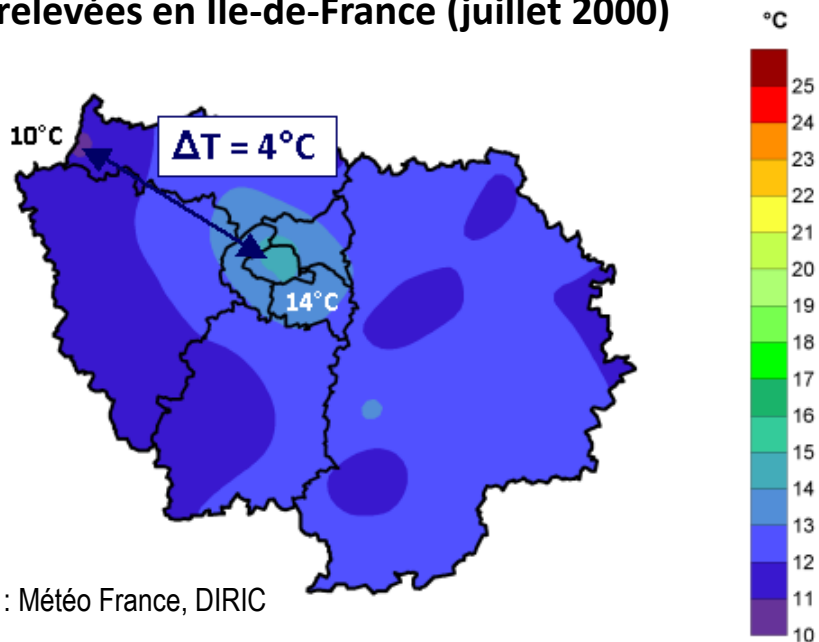
Températures minimales nocturnes
relevées en Ile-de-France (juillet 2000)



Source : Météo France, DIRIC

Un micro-climat particulier en ville

Températures minimales nocturnes
relevées en Ile-de-France (juillet 2000)



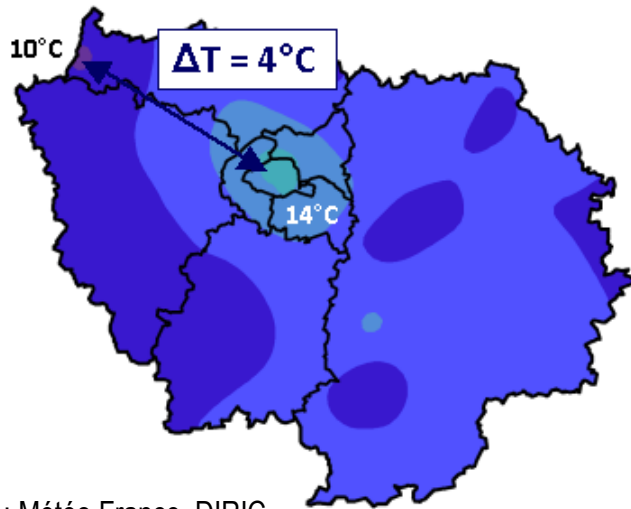
Différence positive de température
entre la ville et la campagne

=

Ilot de chaleur urbain

Un micro-climat particulier en ville

Températures minimales nocturnes relevées en Ile-de-France (juillet 2000)



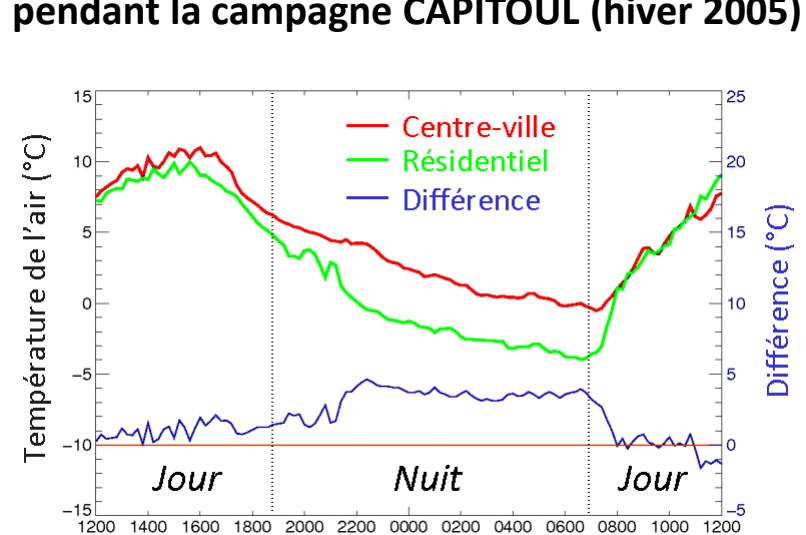
Source : Météo France, DIRIC

Différence positive de température
entre la ville et la campagne

=

Ilot de chaleur urbain

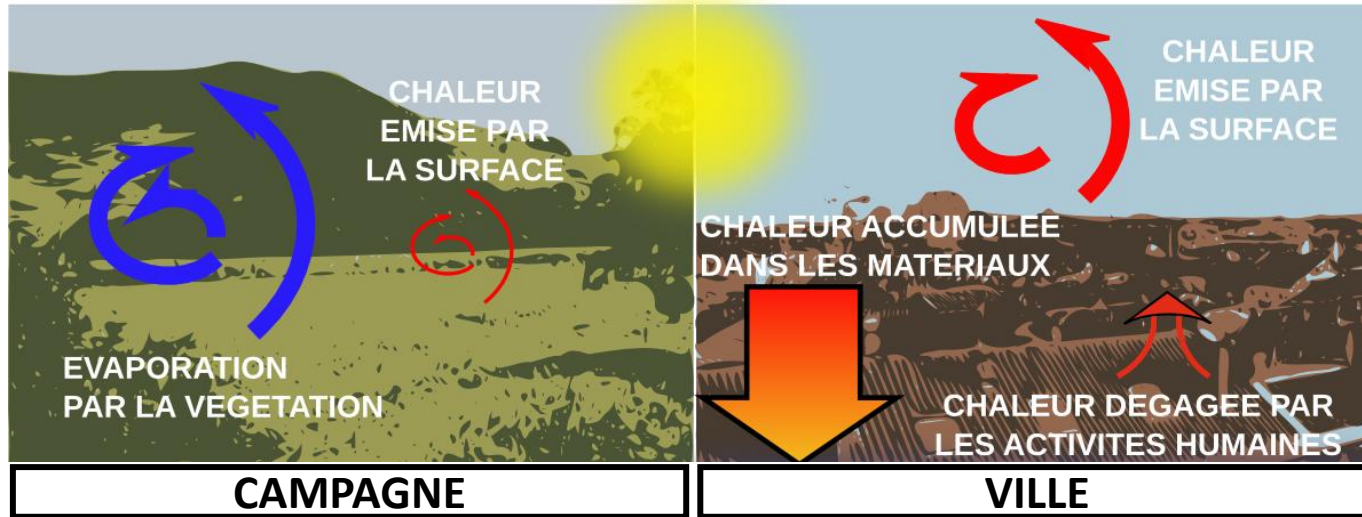
Températures relevées à Toulouse pendant la campagne CAPITOUL (hiver 2005)



Source : G. Pigeon

- Plus marquée la nuit
- Fonction de la taille des villes et du taux d'urbanisation
- Peut atteindre jusqu'à 10°C

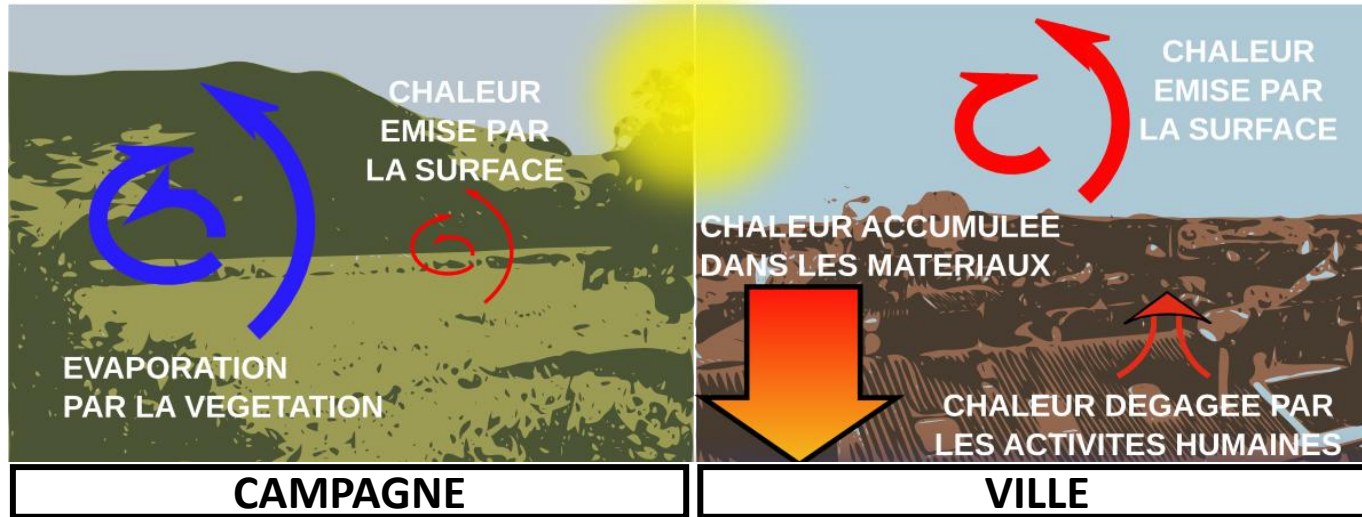
Quelle est l'origine de cette chaleur ?



$$Q^* = Q_H + Q_E + \Delta Q_s$$

Rayonnement net *Flux de chaleur sensible* *Flux de chaleur latente* *Flux de stockage*

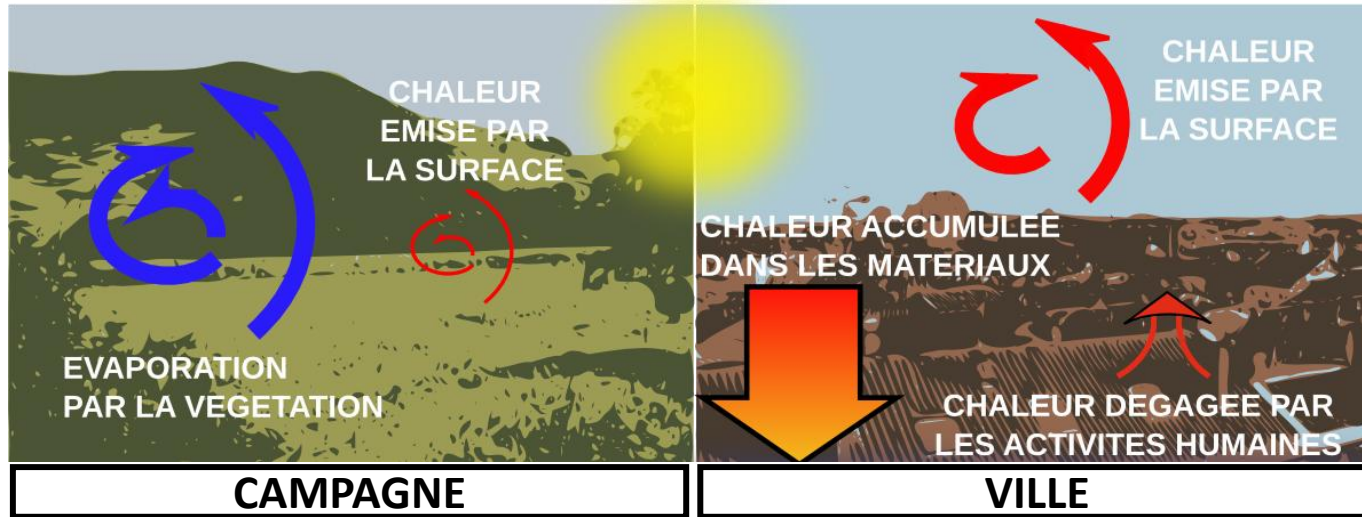
Quelle est l'origine de cette chaleur ?



$$Q^* = Q_H + Q_E + \Delta Q_s$$

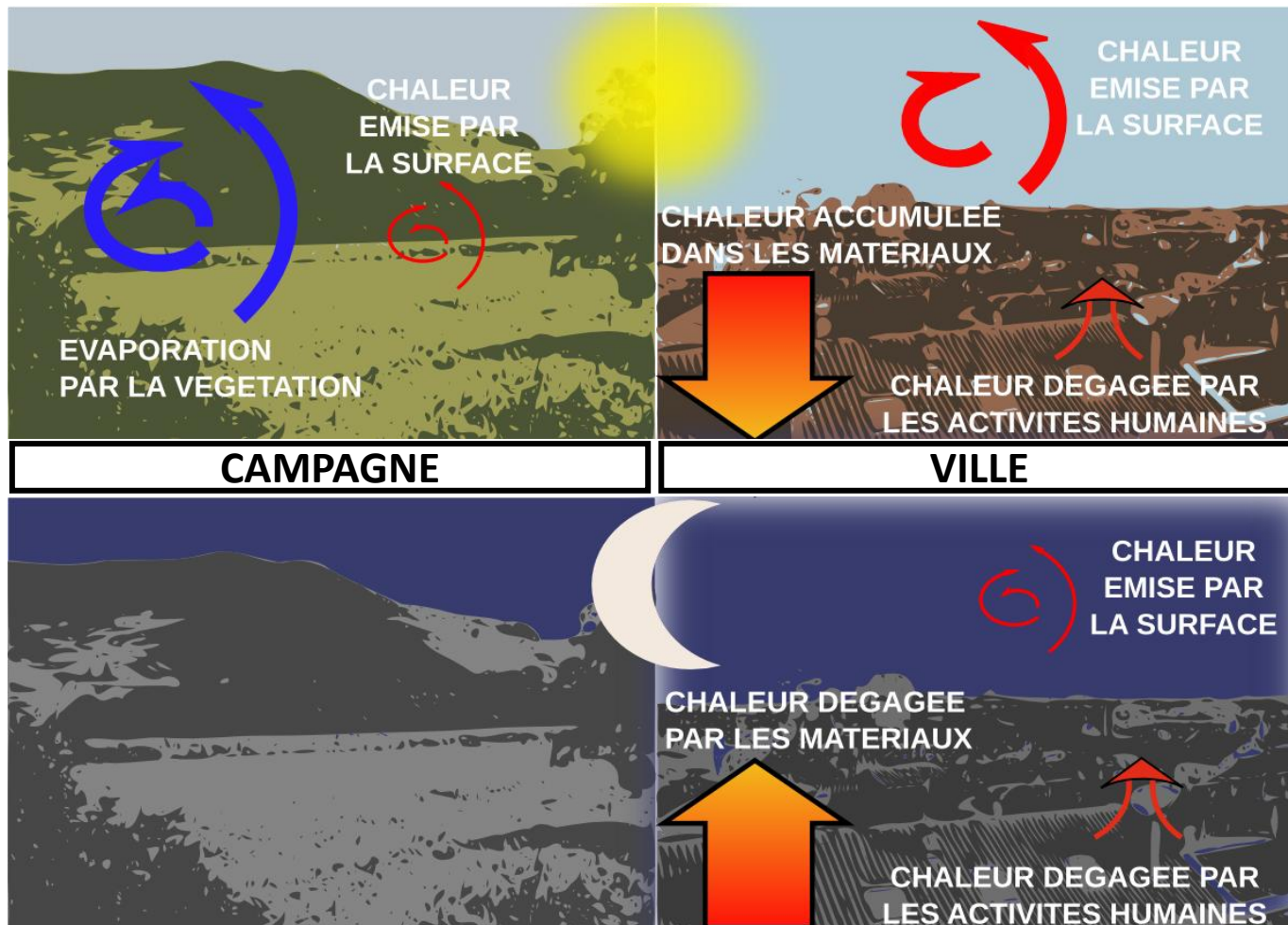
Rayonnement net *Flux de chaleur sensible* *Flux de chaleur latente* *Flux de stockage*

Quelle est l'origine de cette chaleur ?



$$\underbrace{Q_F}_{\text{Flux anthropiques}} + \underbrace{Q^*}_{\text{Rayonnement net}} = \underbrace{Q_H}_{\text{Flux de chaleur sensible}} + \underbrace{Q_E}_{\text{Flux de chaleur latente}} + \underbrace{\Delta Q_S}_{\text{Flux de stockage}}$$

Quelle est l'origine de cette chaleur ?



Changement climatique et conséquences en ville ?



GIEC - IPCC (2013) *5th Assessment Report*

- Hausse des températures moyennes : au moins + 1.5/2 °C
- Recrudescence d'évènements extrêmes
 - précipitations intenses
 - vagues de chaleur
- Forte variabilité inter annuelle et spatiale

Changement climatique et conséquences en ville ?



GIEC - IPCC (2013) *5th Assessment Report*

- Hausse des températures moyennes : **au moins + 1.5/2 °C**
- Recrudescence d'évènements extrêmes
- Forte variabilité inter annuelle et spatiale

Moisselin et al. (2002)

Déqué et al. (2007) *Clim. Change*

- Recrudescence d'évènements extrêmes
- Hausse des températures supérieure aux tendances globales
- Fortes variabilités régionales pour la T_{max}

Changement climatique et conséquences en ville ?



GIEC - IPCC (2013) *5th Assessment Report*

- Hausse des températures moyennes : **au moins + 1.5/2 °C**
- Recrudescence d'évènements extrêmes
- Forte variabilité inter annuelle et spatiale

Moisselin et al. (2002)

Déqué et al. (2007) *Clim. Change*

- Recrudescence d'évènements extrêmes
- Hausse des températures supérieure aux tendances globales
- Fortes variabilités régionales pour la T_{max}

Lemonsu et al. (2013) *Climatic Change*

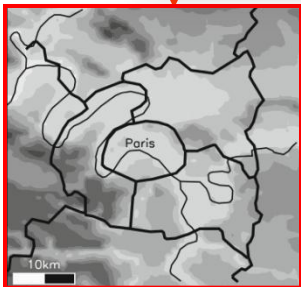
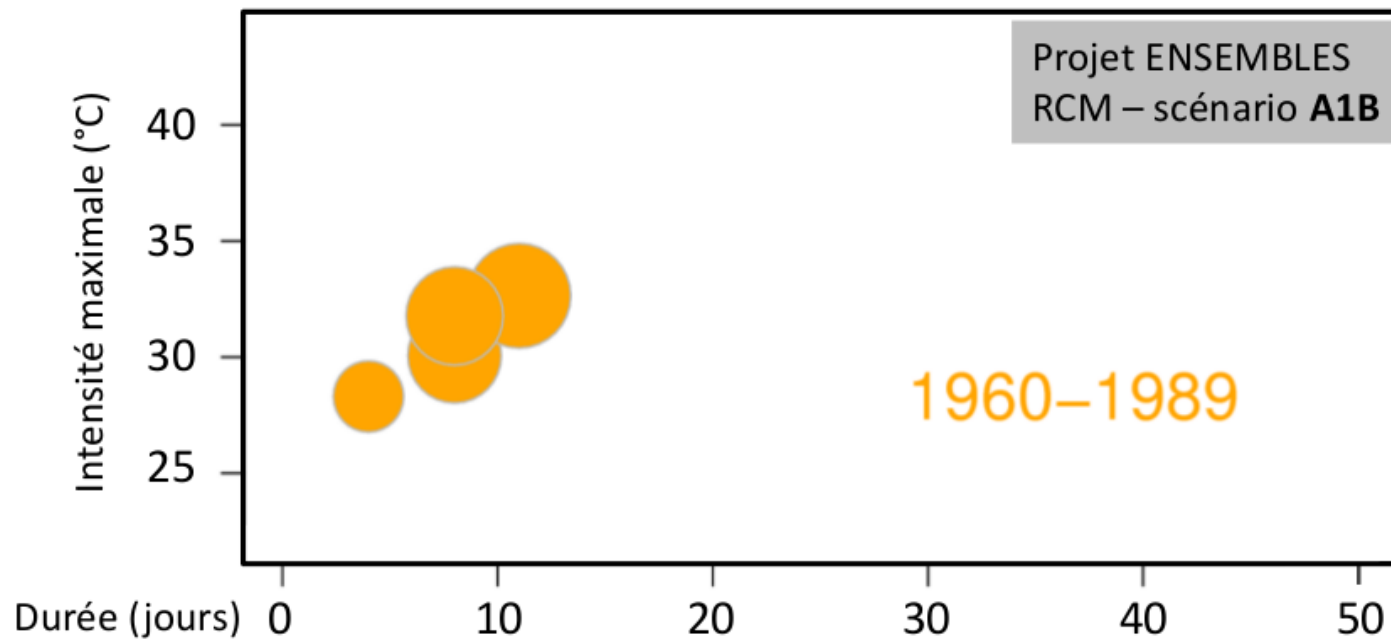
Beulant et al. (2012) *NATO SPSSC*

- Réchauffement moyen des T_{min}/max marqué : **+ 3.5 / + 5 °C été**
+ 2 / 2.4 °C hiver
- Augmentation du nbre de jours chauds / canicules

Changement climatique et conséquences en ville ?

Lemonsu et al. (2013b) VURCA

Exemple d'extraction de canicules sur la région parisienne

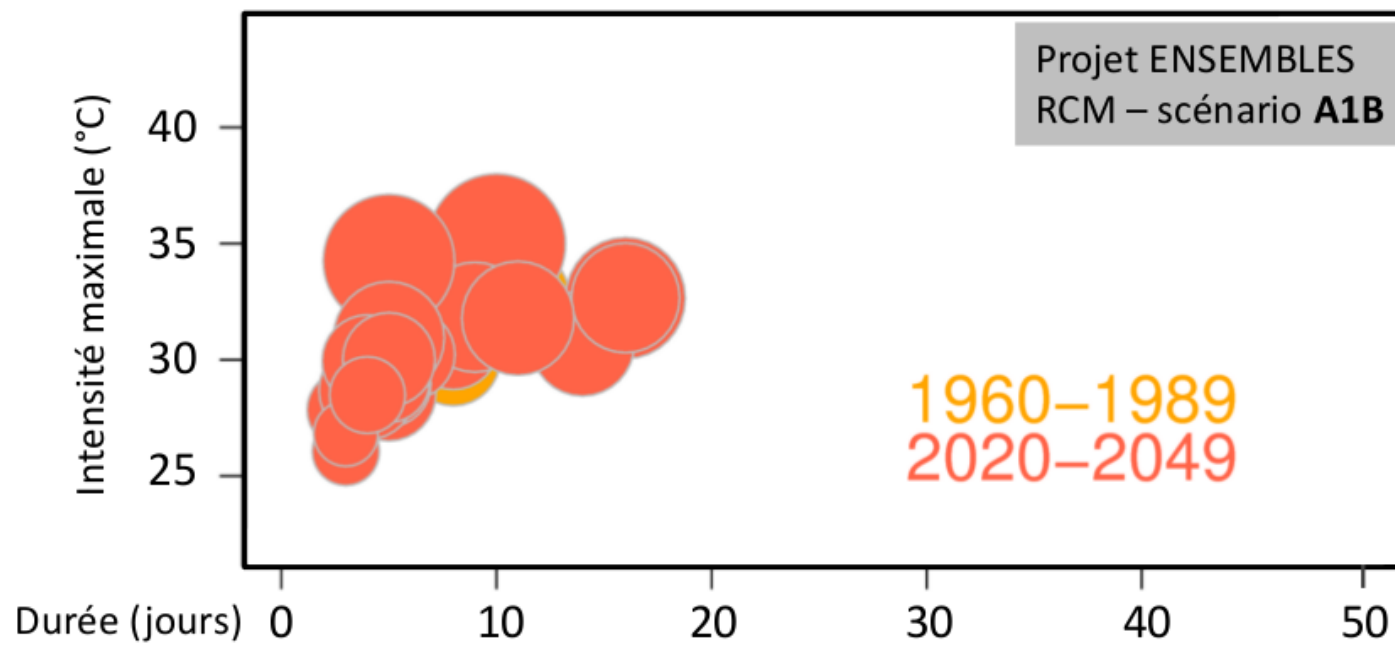


- Réchauffement moyen des T_{min}/max marqué : + 3.5 / + 5 °C été
+ 2 / 2.4 °C hiver
- Augmentation du nbre de jours chauds / canicules

Changement climatique et conséquences en ville ?

Lemonsu et al. (2013b) *VURCA*

Exemple d'extraction de canicules sur la région parisienne

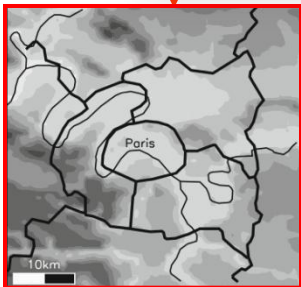
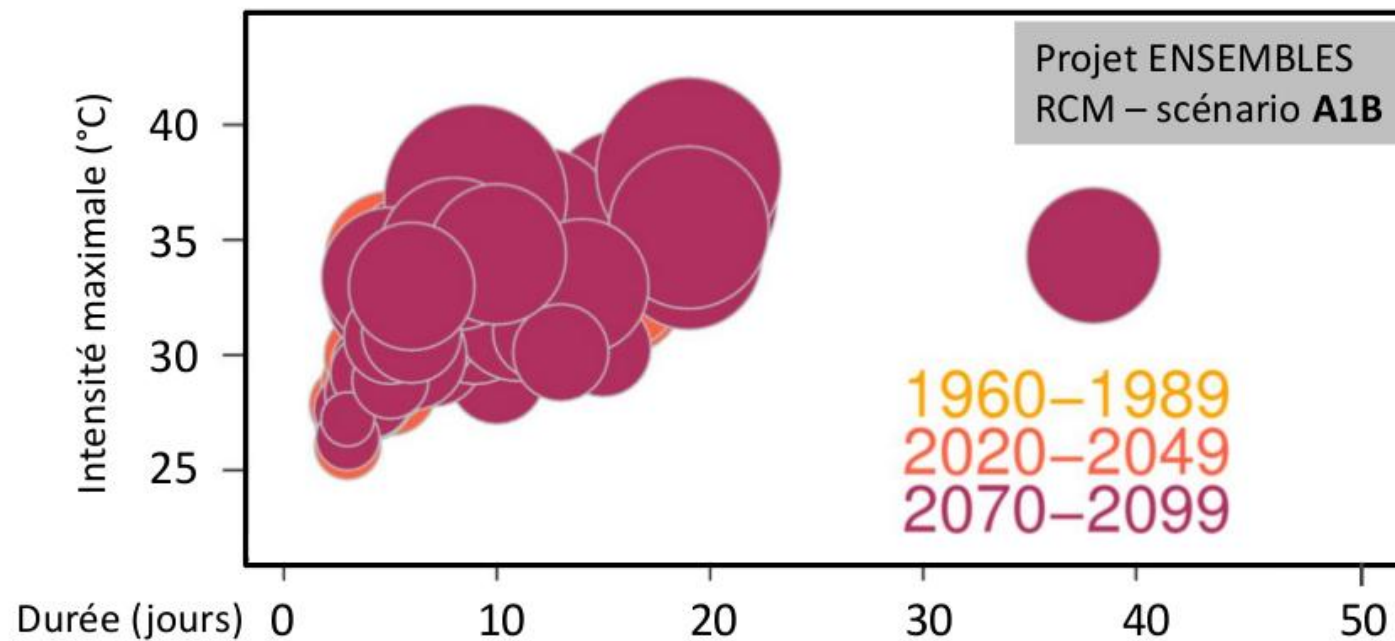


- Réchauffement moyen des T_{min}/max marqué : + 3.5 / + 5 °C été
+ 2 / 2.4 °C hiver
- Augmentation du nbre de jours chauds / canicules

Changement climatique et conséquences en ville ?

Lemonsu et al. (2013b) VURCA

Exemple d'extraction de canicules sur la région parisienne

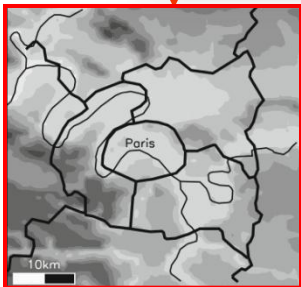
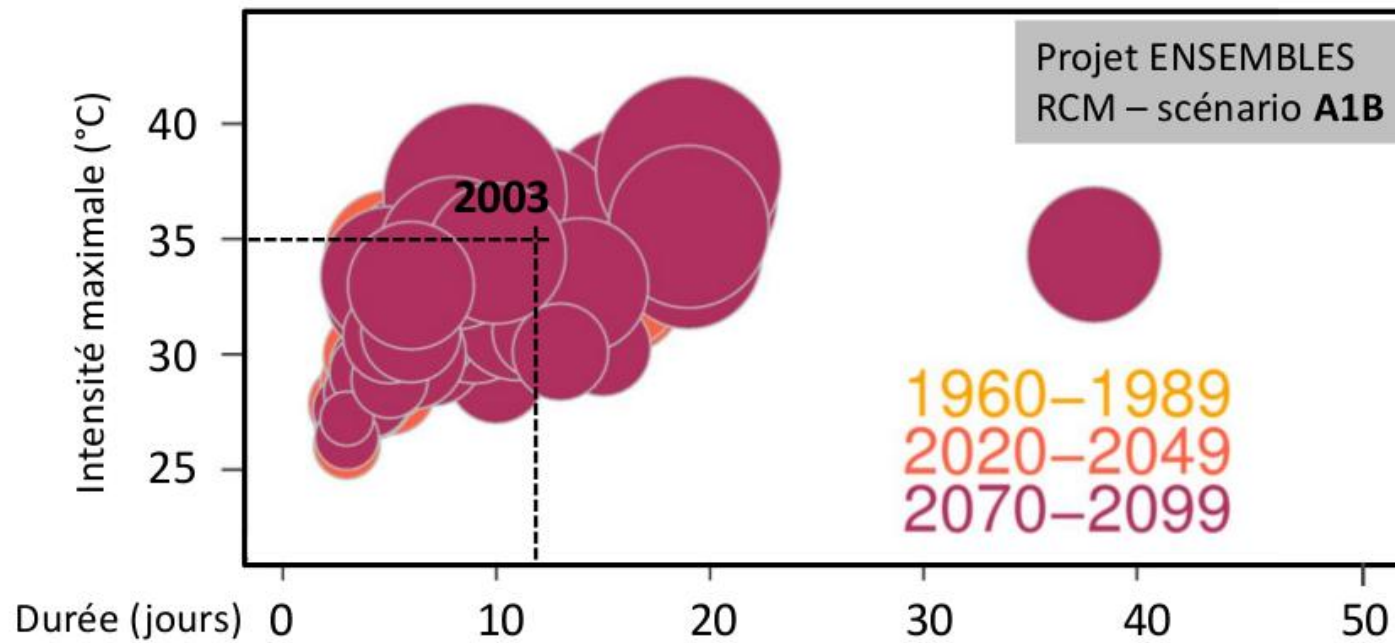


- Réchauffement moyen des T_{min}/max marqué : **+ 3.5 / + 5 °C été**
+ 2 / 2.4 °C hiver
- Augmentation du nbre de jours chauds / canicules

Changement climatique et conséquences en ville ?

Lemonsu et al. (2013b) VURCA

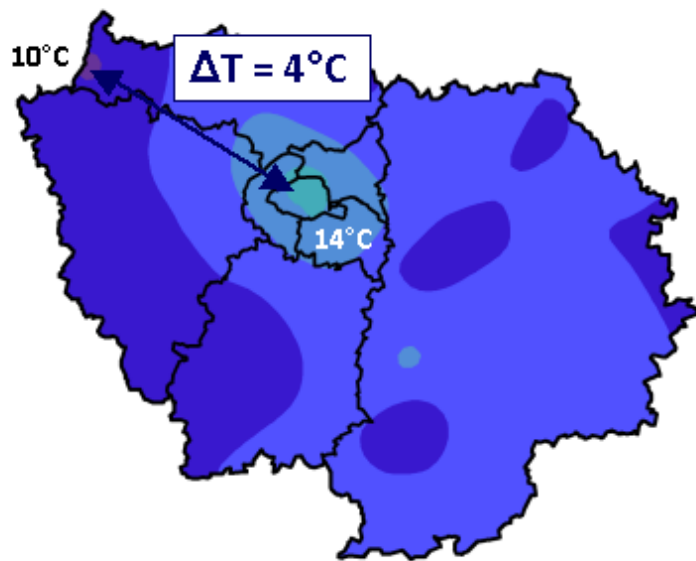
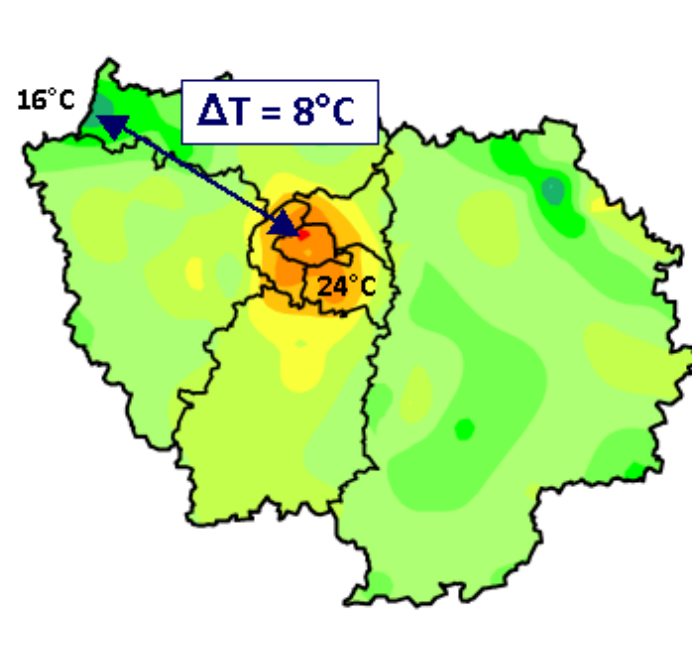
Exemple d'extraction de canicules sur la région parisienne



- Réchauffement moyen des T_{min}/max marqué : + 3.5 / + 5 °C été
+ 2 / 2.4 °C hiver
- Augmentation du nbre de jours chauds / canicules

Conséquences de la canicule 2003

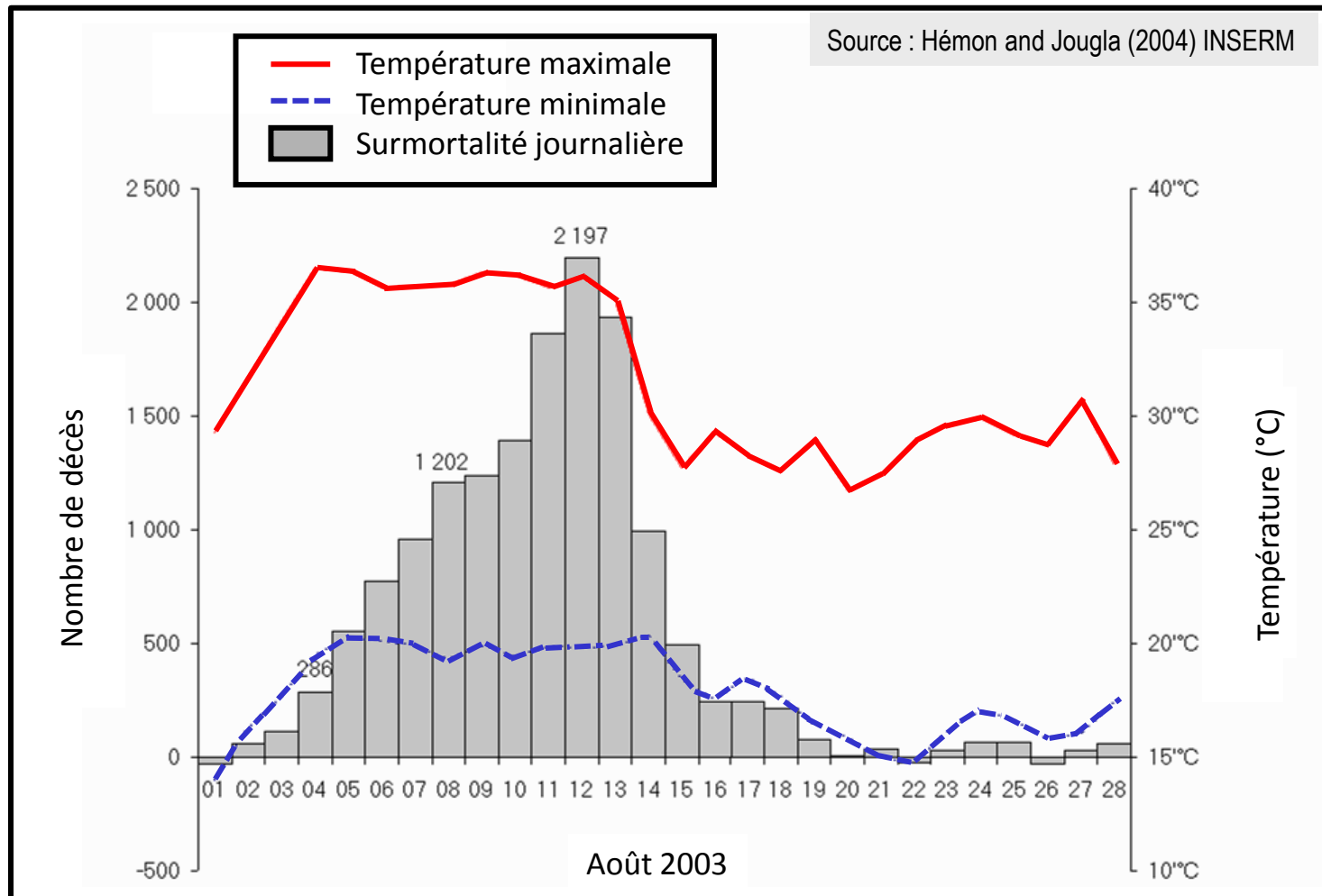
- intensification de l'îlot de chaleur

Températures minimales
(Juillet 2000)Températures minimales
(8-13 août 2003)

Source : Météo France, DIRIC

Conséquences de la canicule 2003

- intensification de l'îlot de chaleur
- **aggravation des impacts sanitaires**



Conséquences de la canicule 2003

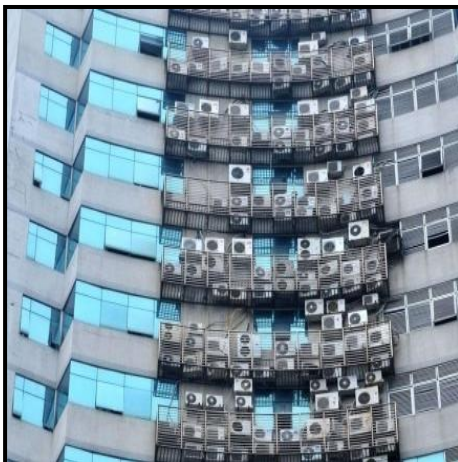
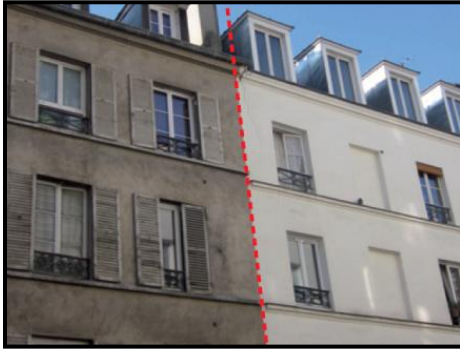
- intensification de l'îlot de chaleur
- aggravation des impacts sanitaire
- **surconsommation d'énergie** + 5 à 10 % (demande de froid)

Source : senat.fr



Face à de telles conséquences, des stratégies d'atténuation et d'adaptation sont envisagées pour les villes d'aujourd'hui et de demain

Des stratégies pour s'adapter au climat urbain et au changement climatique en ville



En période de fortes chaleurs ou de canicule

Personne âgée
 Je dors/le soir dans une chambre fraîche pour être en mesure de mieux supporter la chaleur et ...

- Je ne suis pas seul à la maison
- Je prends des pauses régulières dans un endroit frais
- Je bois beaucoup d'eau (au moins 1,5 litre par jour)
- Je ne sors pas en plein soleil
- Je ne fais pas de sport
- Je ne bois pas d'alcool
- Je ne fais pas de sieste
- Je ne dors pas dans une chambre trop chaude
- Je ne fais pas de sieste dans une chambre trop chaude
- Je ne fais pas de sieste dans une chambre trop chaude

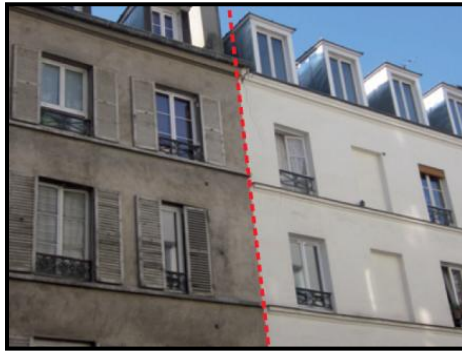
Enfant et adulte
 Je bois beaucoup d'eau et ...

- Je ne suis pas seul à la maison
- Je prends des pauses régulières dans un endroit frais
- Je bois beaucoup d'eau (au moins 1,5 litre par jour)
- Je ne sors pas en plein soleil
- Je ne fais pas de sport
- Je ne bois pas d'alcool
- Je ne fais pas de sieste
- Je ne dors pas dans une chambre trop chaude
- Je ne fais pas de sieste dans une chambre trop chaude
- Je ne fais pas de sieste dans une chambre trop chaude

En cas de malaise ou de coup de chaleur, j'appelle le 15.

Pour plus d'informations : 0 800 90 90 90 ou sur www.paris.gouv.fr/canicule ou www.paris.fr

Des stratégies pour s'adapter au climat urbain et au changement climatique en ville



En période de fortes chaleurs ou de canicule

Personne âgée
 Je travaille ou suis présente toute une journée en extérieur sans grande ventilation et ...

- Je ne suis pas malade ou plus souffrante.
- Je porte (idéalement) une tenue légère et blanche.
- Je maintiens ma maison à l'air frais et ventilé.
- Je change souvent (tous les jours) mes vêtements.
- Je bois souvent (au moins 1,5 l par jour) de l'eau fraîche.
- Je dors dans une chambre bien ventilée.
- Je change souvent (tous les jours) mes vêtements.
- Je bois souvent (au moins 1,5 l par jour) de l'eau fraîche.
- Je dors dans une chambre bien ventilée.

Enfant et adulte
 Je suis beaucoup d'heures et ...

- Je ne suis pas malade ou plus souffrante.
- Je porte (idéalement) une tenue légère et blanche.
- Je maintiens ma maison à l'air frais et ventilé.
- Je change souvent (tous les jours) mes vêtements.
- Je bois souvent (au moins 1,5 l par jour) de l'eau fraîche.
- Je dors dans une chambre bien ventilée.
- Je change souvent (tous les jours) mes vêtements.
- Je bois souvent (au moins 1,5 l par jour) de l'eau fraîche.
- Je dors dans une chambre bien ventilée.

En cas de malaise ou de coup de chaleur, j'appelle le 15.

Pour plus d'informations : 0 800 30 30 30 (numéro vert) www.paris.gouv.fr/canicule / www.15.paris.fr ou 33 90 00 00 00

Des stratégies pour s'adapter au climat urbain et au changement climatique en ville

**Climatiseurs air/air**

Rejets « secs » (chaleur sensible)

**Climatisation****Climatiseurs air/eau**

Rejets « humides » (chaleur latente)

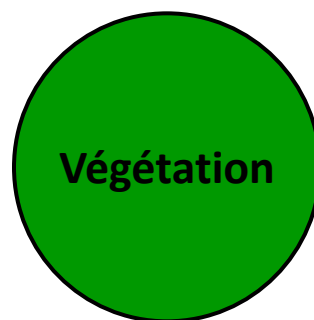
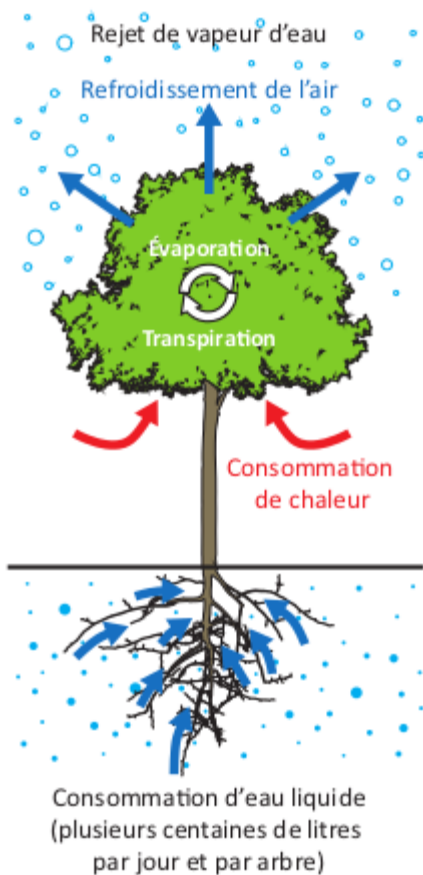
*Ex : tours aéroréfrigérantes***Réseau d'eau glacée**

Rejets dans la Seine

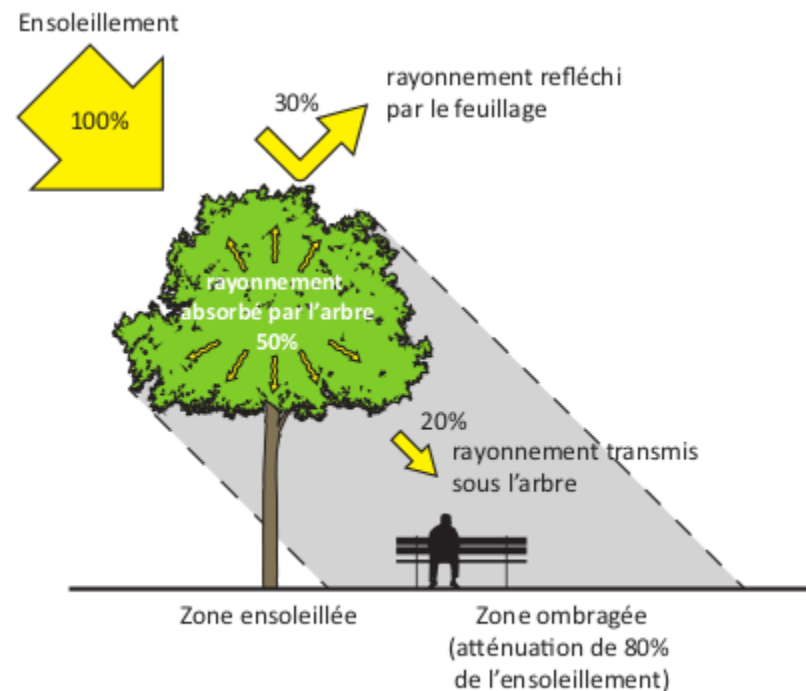
Température de
consigne

Des stratégies pour s'adapter au climat urbain et au changement climatique en ville

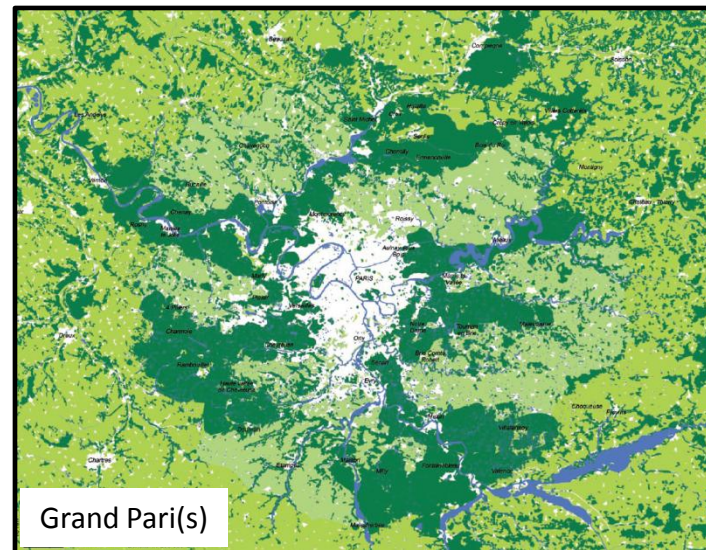
Evapotranspiration



Effets d'ombrage



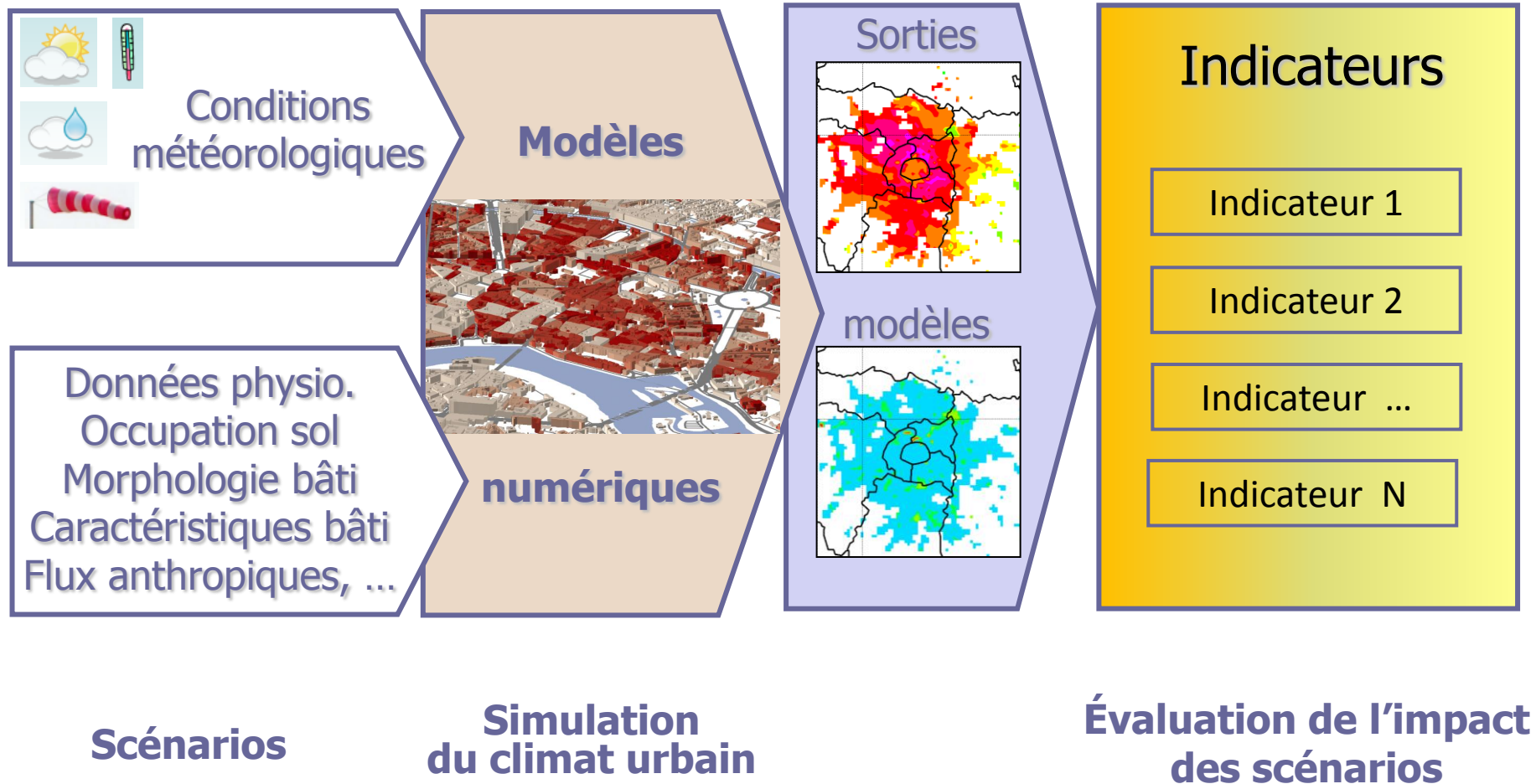
Des stratégies pour s'adapter au climat urbain et au changement climatique en ville



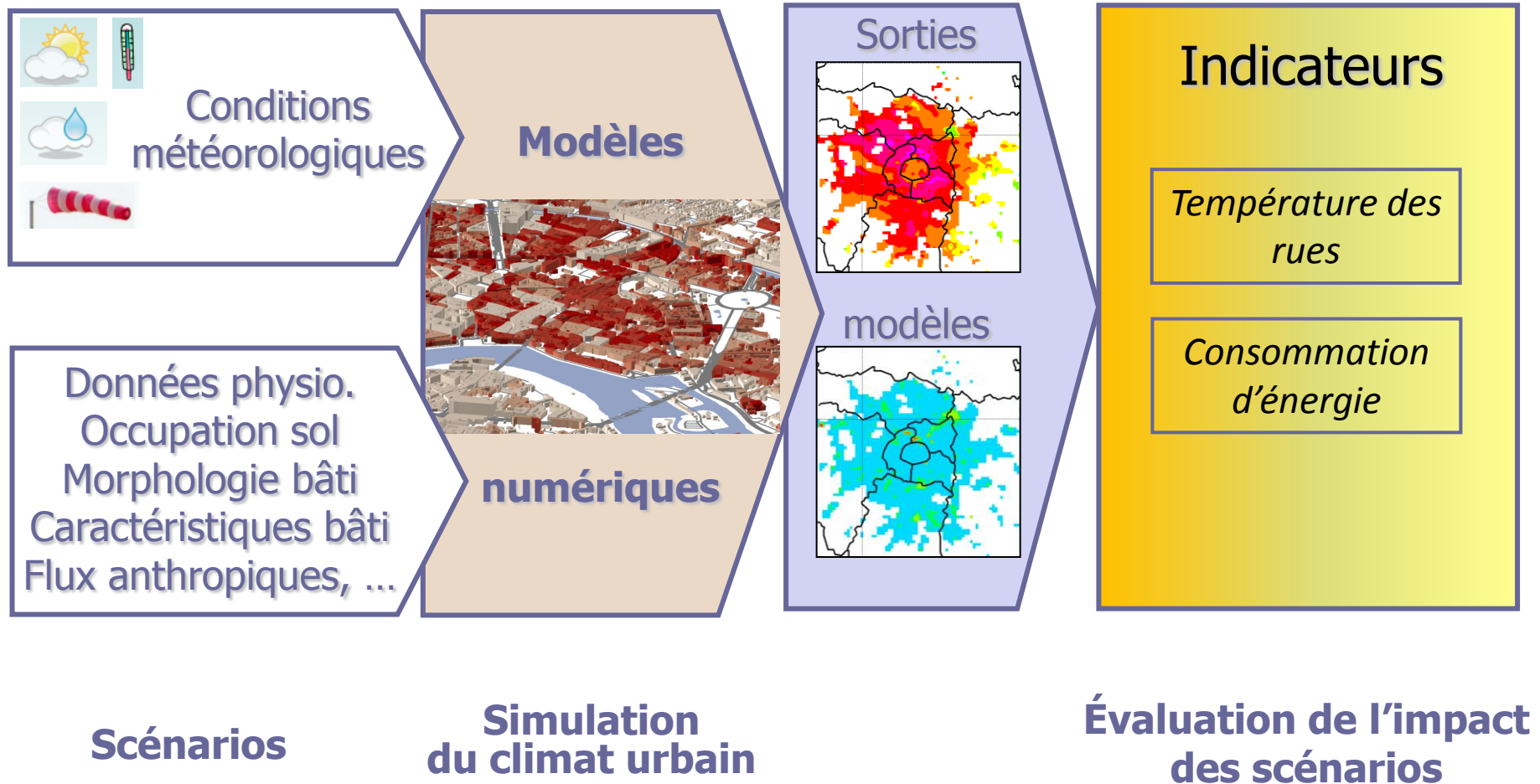
Végétation



Une approche par la modélisation pour réaliser des études d'impact

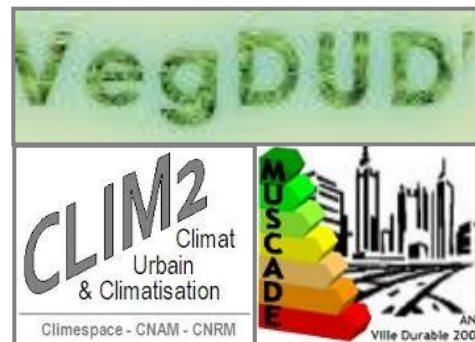


Une approche par la modélisation pour réaliser des études d'impact



Objectifs de la thèse

Évaluer l'impact de la climatisation sur le climat extérieur et la consommation énergétique

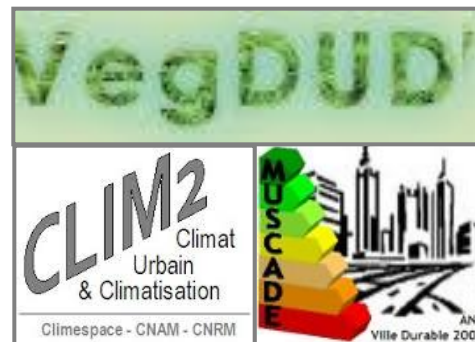


Évaluer les performances de la végétation pour l'amélioration du climat extérieur, du confort thermique, et de la consommation énergétique des bâtiments

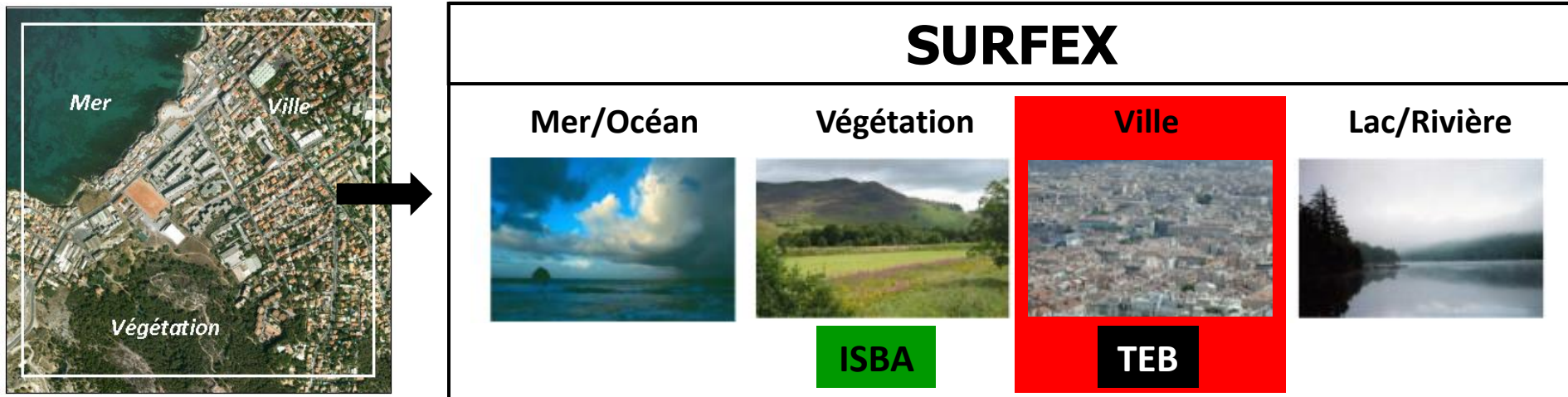
Objectifs de la thèse

Évaluer l'impact de la climatisation sur le climat extérieur et la consommation énergétique

Améliorer la description de la végétation urbaine dans le modèle de canopée urbaine utilisé au GAME



Évaluer les performances de la végétation pour l'amélioration du climat extérieur, du confort thermique, et de la consommation énergétique des bâtiments

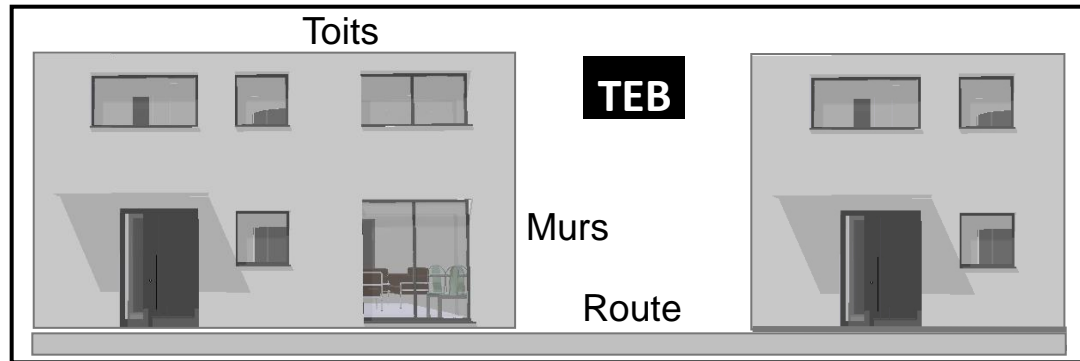


- Surface définie comme une mosaïque de différents types de couverts
- Chaque type de couvert dispose d'une paramétrisation spécifique
- Flux d'énergie, d'eau et de quantité de mouvement calculés pour chaque type de surface au sein de chaque paramétrisation, puis agrégés à l'échelle de la maille

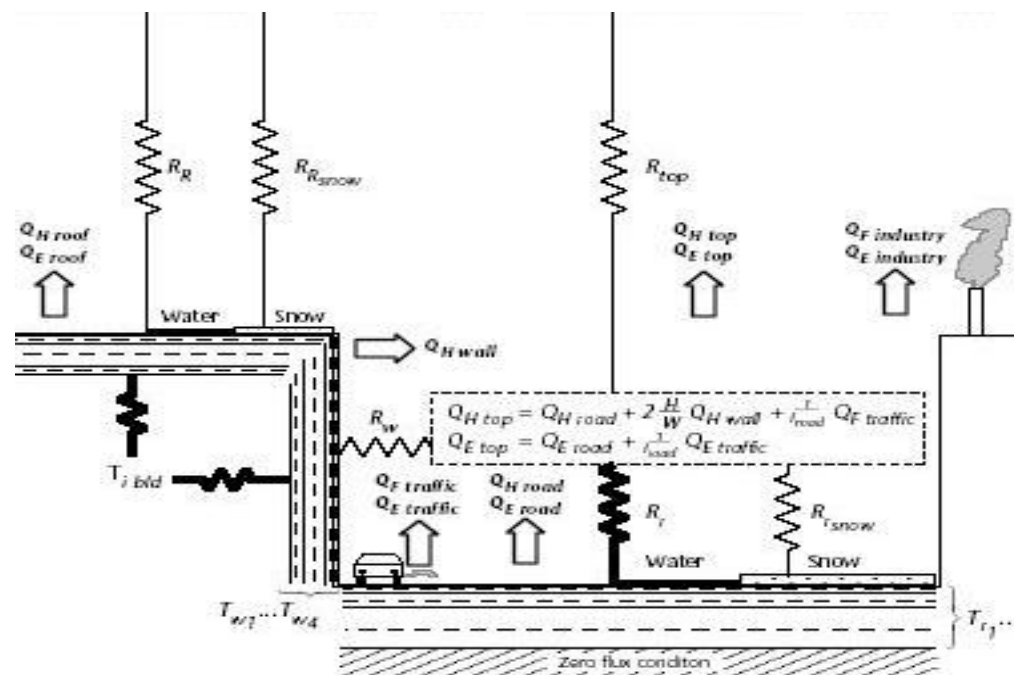
Modélisation du micro-climat urbain : TEB (Town Energy Balance)

Masson (2000) *Bound. Lay. Meteorol.*

- Canopée urbaine représentée par un réseau de **rues canyon**
- **Canyon urbain moyen** (murs, toits, routes) défini à partir de :



- caractéristiques géométriques
- propriétés radiatives et thermiques des matériaux
- Utilisé couplé à un modèle atmosphérique ou forcé par des observations
- Echelle spatiale : de quelques km à une centaine de m

Ta, Qa, Ua, Precip, ...Niveau atmosphérique

1 – Contexte

- ◆ Micro-climat urbain
- ◆ Ville et changement climatique
- ◆ Stratégies d'adaptation : climatisation et verdissement
- ◆ Approche par la modélisation utilisée au GAME

2 – Adaptation par la climatisation


- ◆ Impacts de la climatisation sur le micro-climat extérieur (Paris)


3 – Adaptation par la végétation

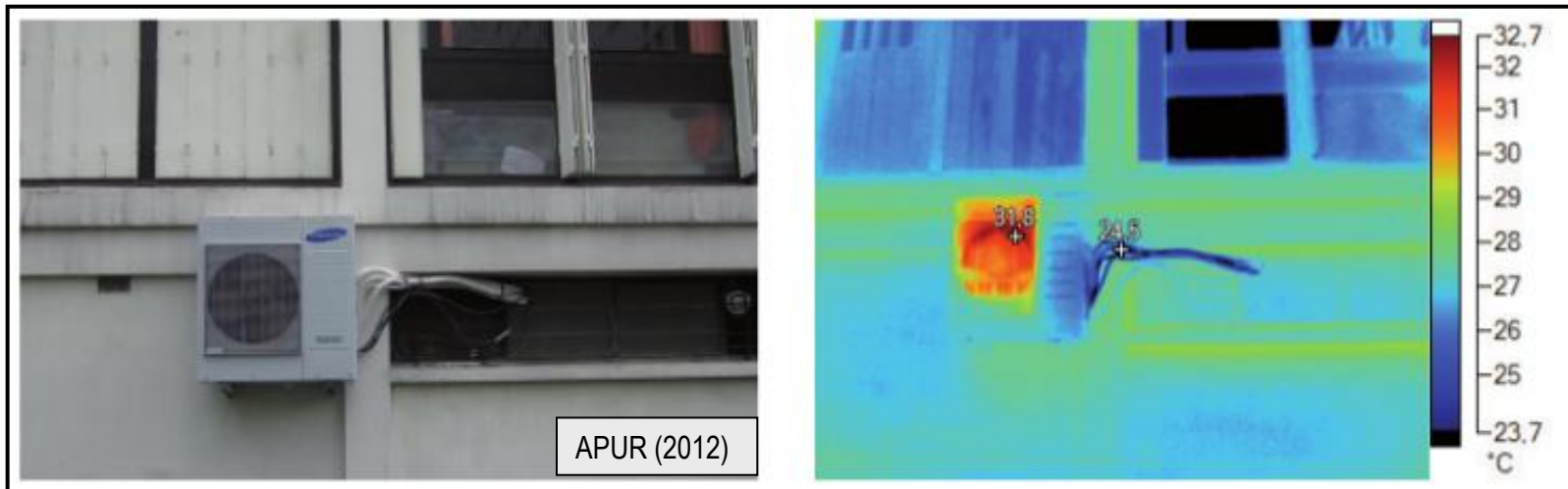
- ◆ Modélisation des toitures végétalisées dans TEB
- ◆ Paramétrisation de l'arrosage estival
- ◆ Impacts de différents scénarios de verdissement en contexte de canicule (Paris)
- ◆ Conséquences du verdissement à l'échelle saisonnière

4 – Conclusions et perspectives

Points clés

 Mesure d'adaptation rapide et efficace pour assurer le confort thermique intérieur

 Consomme de l'énergie
Rejette de la chaleur dans les couches basses de l'atmosphère



Quel est l'effet des systèmes de refroidissement à plus grande échelle ?

Certains systèmes affectent-ils plus le climat urbain que d'autres ?

Différents scénarios de climatisation



REEL
(PRESENT)



Systemes de refroidissement recensés dans la ville :

- ceux qui rejettent de la chaleur sous forme SECHE
- ceux qui rejettent de la chaleur sous forme HUMIDE
- ceux qui rejettent de la chaleur dans la Seine



Différents scénarios de climatisation



REEL
(PRESENT)



Systèmes de refroidissement recensés dans la ville :

- ceux qui rejettent de la chaleur sous forme SECHE
- ceux qui rejettent de la chaleur sous forme HUMIDE
- ceux qui rejettent de la chaleur dans la Seine



SEC
(PRESENT)

Toute la climatisation est assurée par des systèmes secs



Différents scénarios de climatisation



REEL
(PRESENT)

Systèmes de refroidissement recensés dans la ville :

- ceux qui rejettent de la chaleur sous forme SECHE
- ceux qui rejettent de la chaleur sous forme HUMIDE
- ceux qui rejettent de la chaleur dans la Seine



SEC
(PRESENT)

Toute la climatisation est assurée par des systèmes secs








SEC x 2
(2030)

**Toute la climatisation est assurée par des systèmes secs.
Rejets doublés.**

Adnot (2003) *Rapport UE*



Différents scénarios de climatisation

REF	Sans climatisation	
REEL (PRESENT) 	Systèmes de refroidissement recensés dans la ville : <ul style="list-style-type: none"> • ceux qui rejettent de la chaleur sous forme SECHE • ceux qui rejettent de la chaleur sous forme HUMIDE • ceux qui rejettent de la chaleur dans la Seine 	
SEC (PRESENT)	Toute la climatisation est assurée par des systèmes secs	
SEC x 2 (2030)	Toute la climatisation est assurée par des systèmes secs. Rejets doublés.	

Méthode numérique

METEO

Canicule
2003

Bâtiments



Espaces verts



Hydrologie



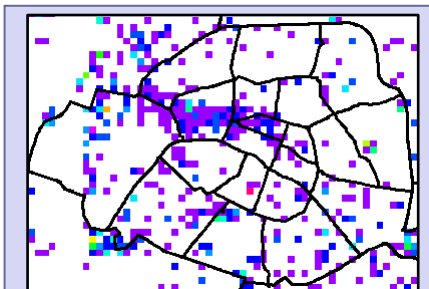
Trafic



Climatisation

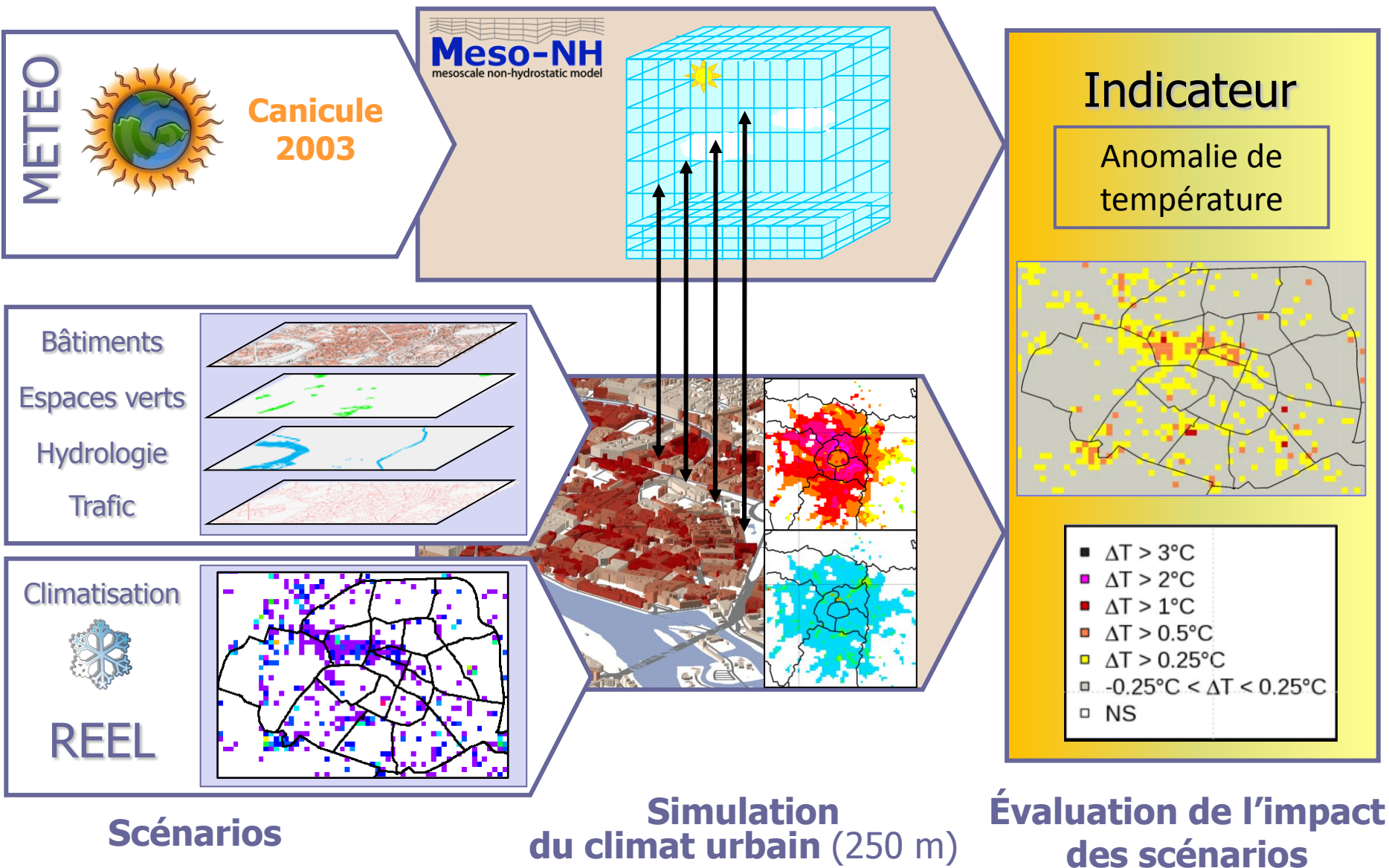


REEL

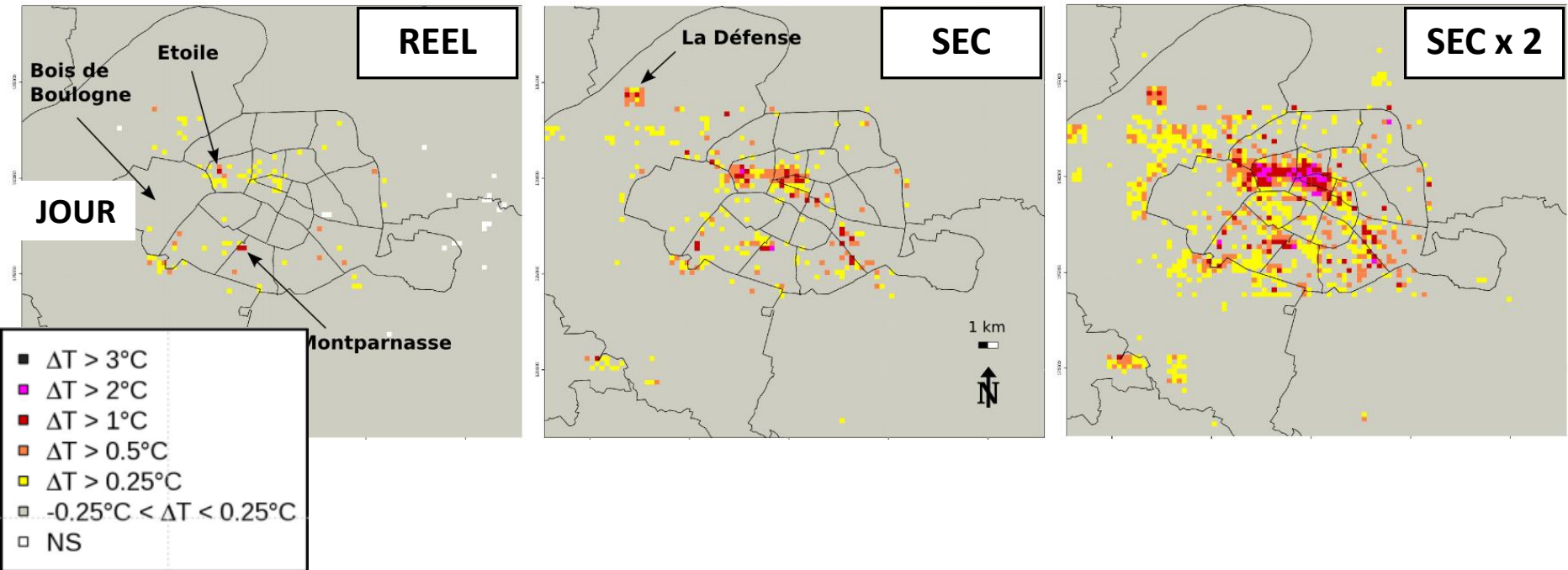


Scénarios

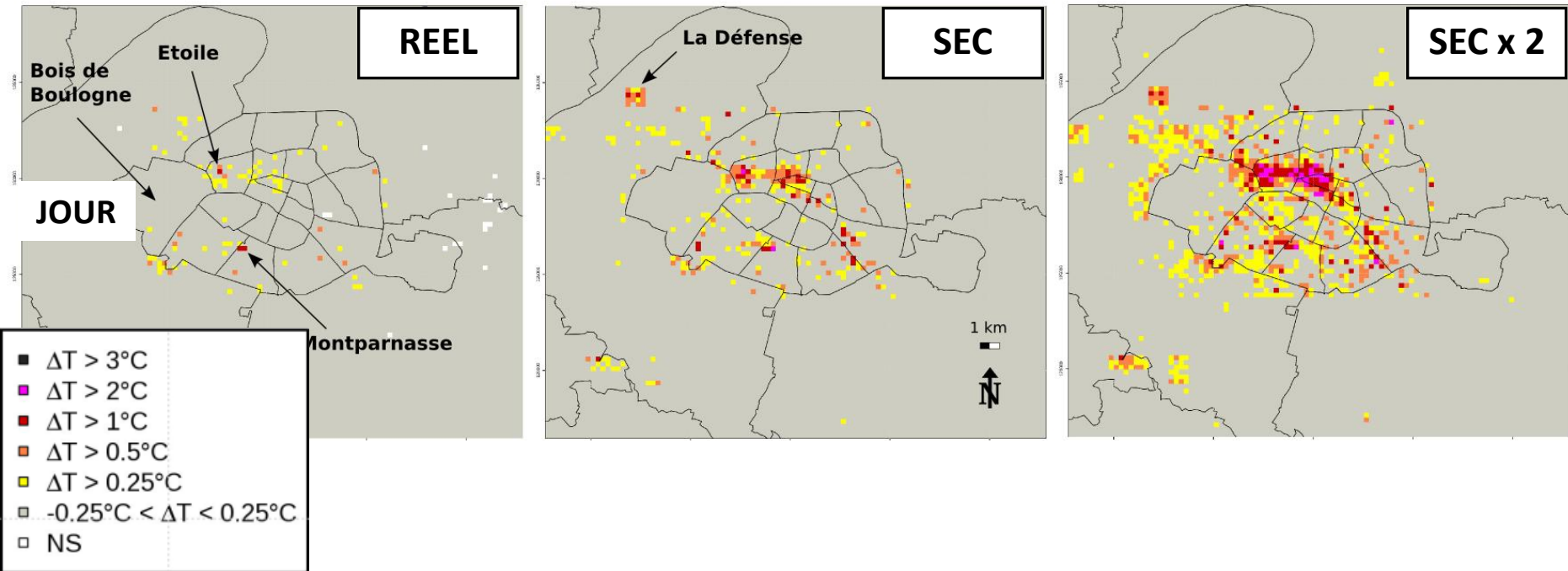
Méthode numérique



Augmentation des températures diurnes et nocturnes engendrée par la climatisation



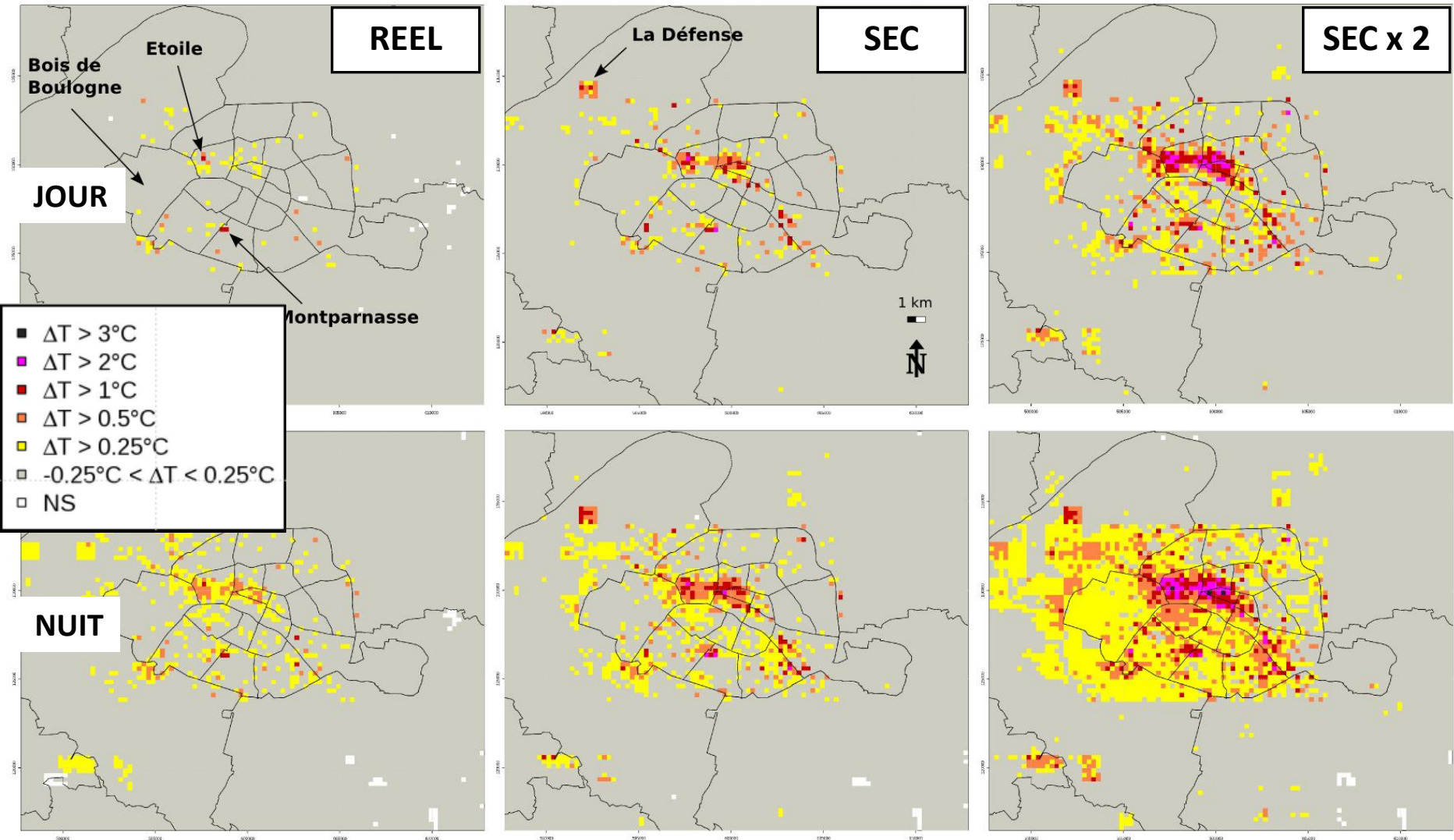
Augmentation des températures diurnes et nocturnes engendrée par la climatisation



⇒ Réchauffement plus marqué quand les rejets de chaleur sont secs

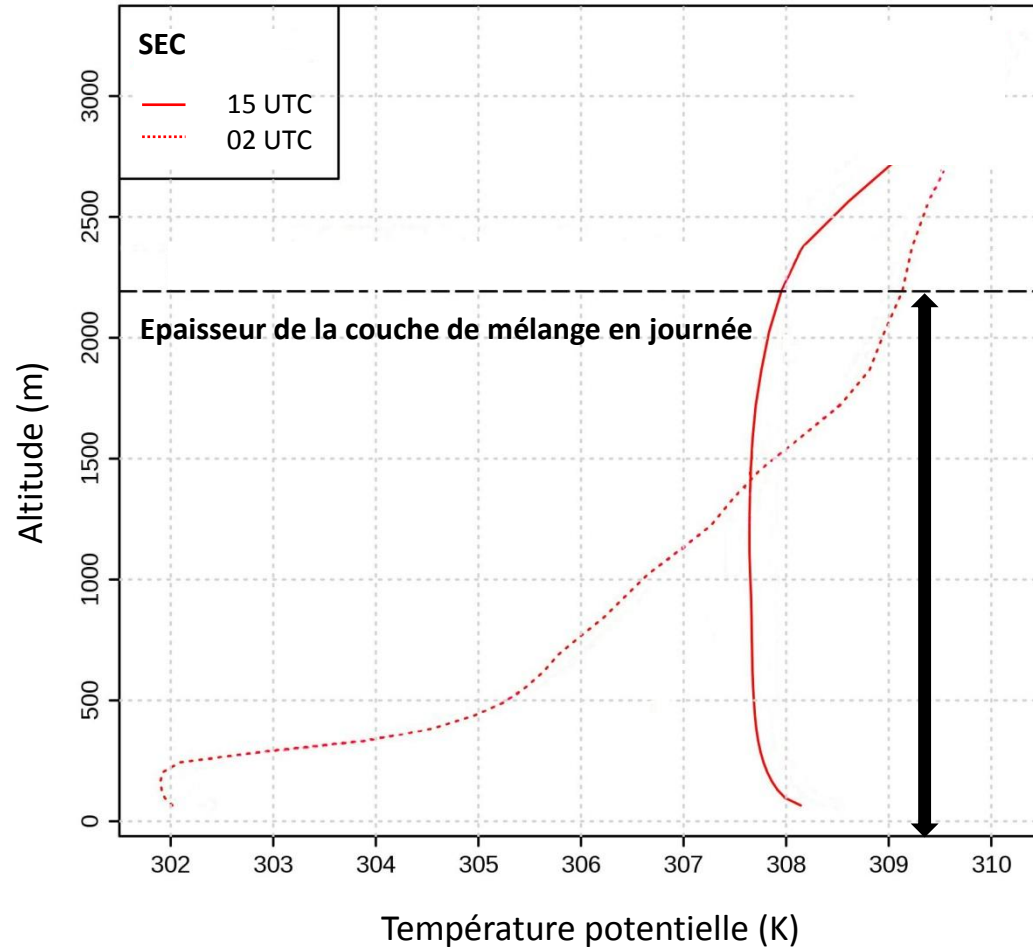
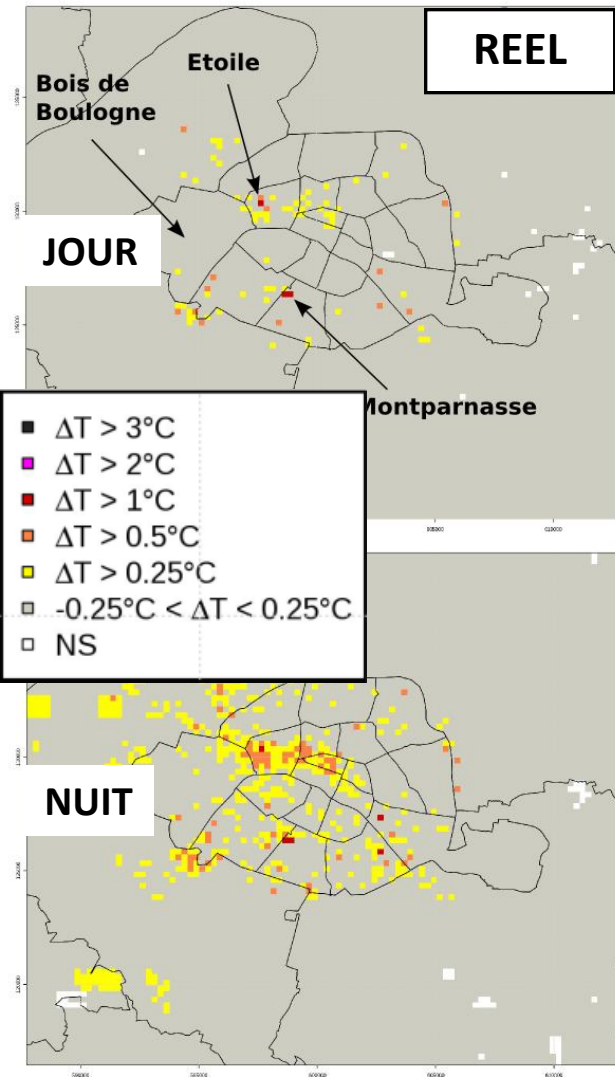
⇒ Réchauffement augmente avec la puissance des rejets de chaleur

Augmentation des températures diurnes et nocturnes engendrée par la climatisation



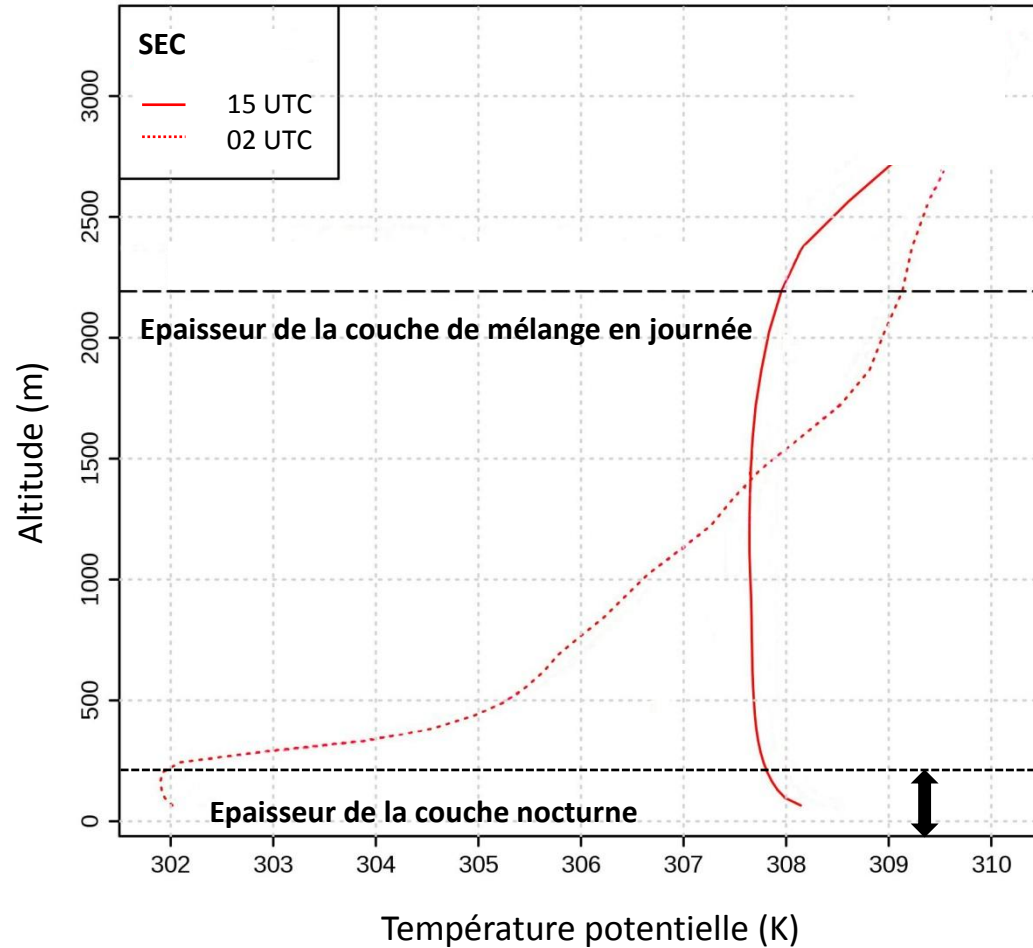
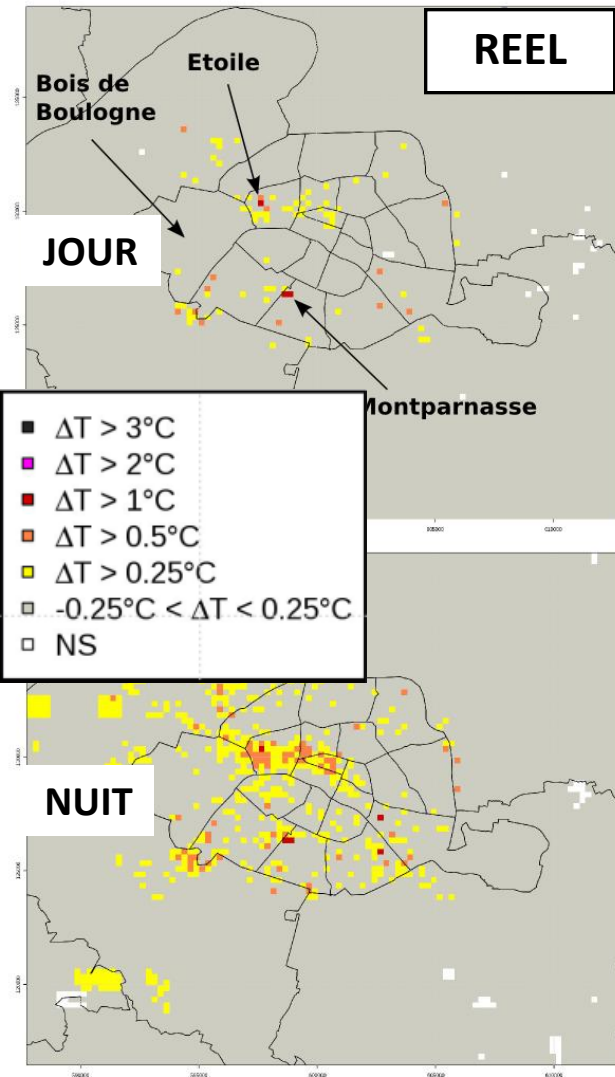
⇒ Réchauffement plus marqué la nuit

Augmentation des températures diurnes et nocturnes engendrée par la climatisation



⇒ Réchauffement plus marqué la nuit

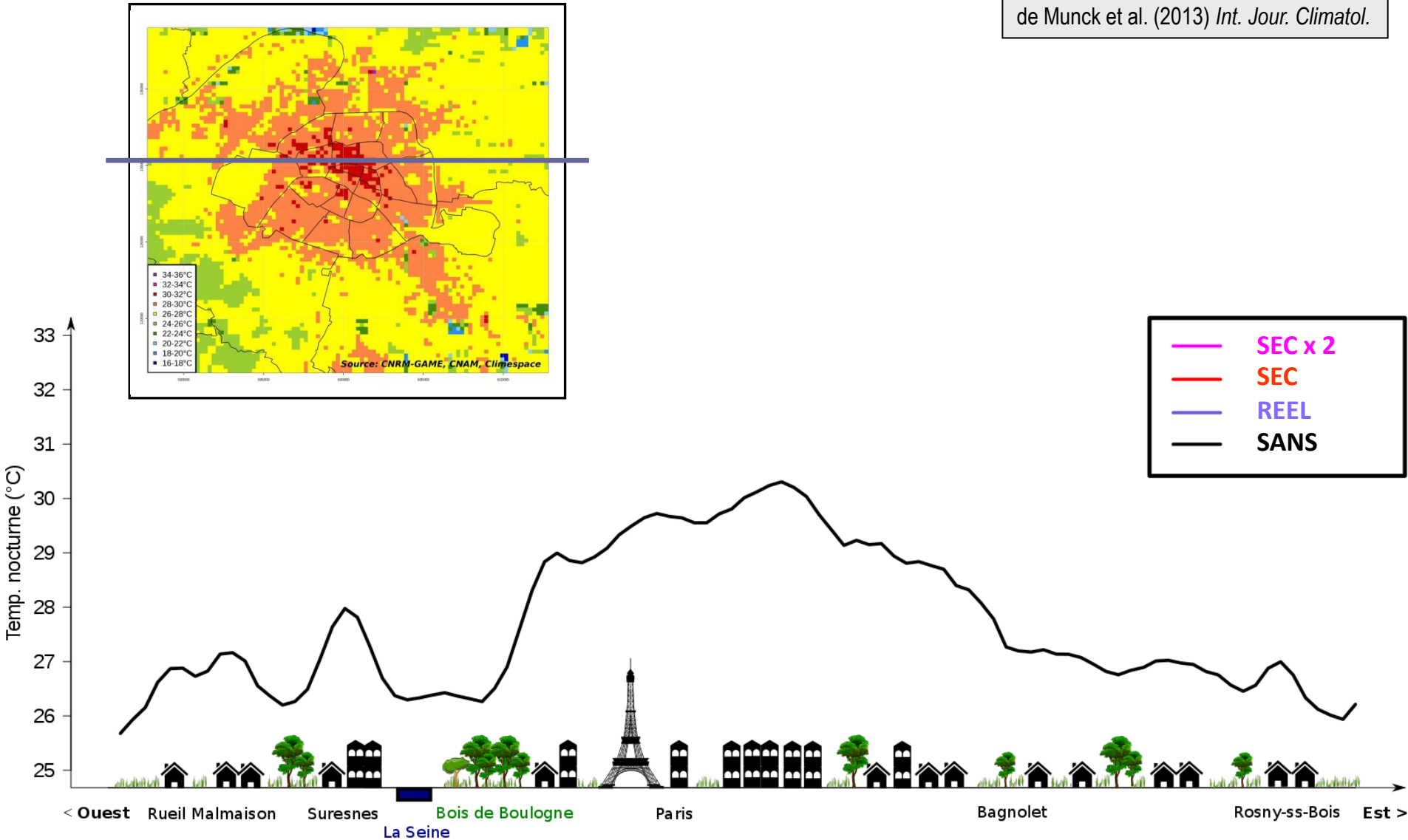
Augmentation des températures diurnes et nocturnes engendrée par la climatisation



⇒ Réchauffement plus marqué la nuit

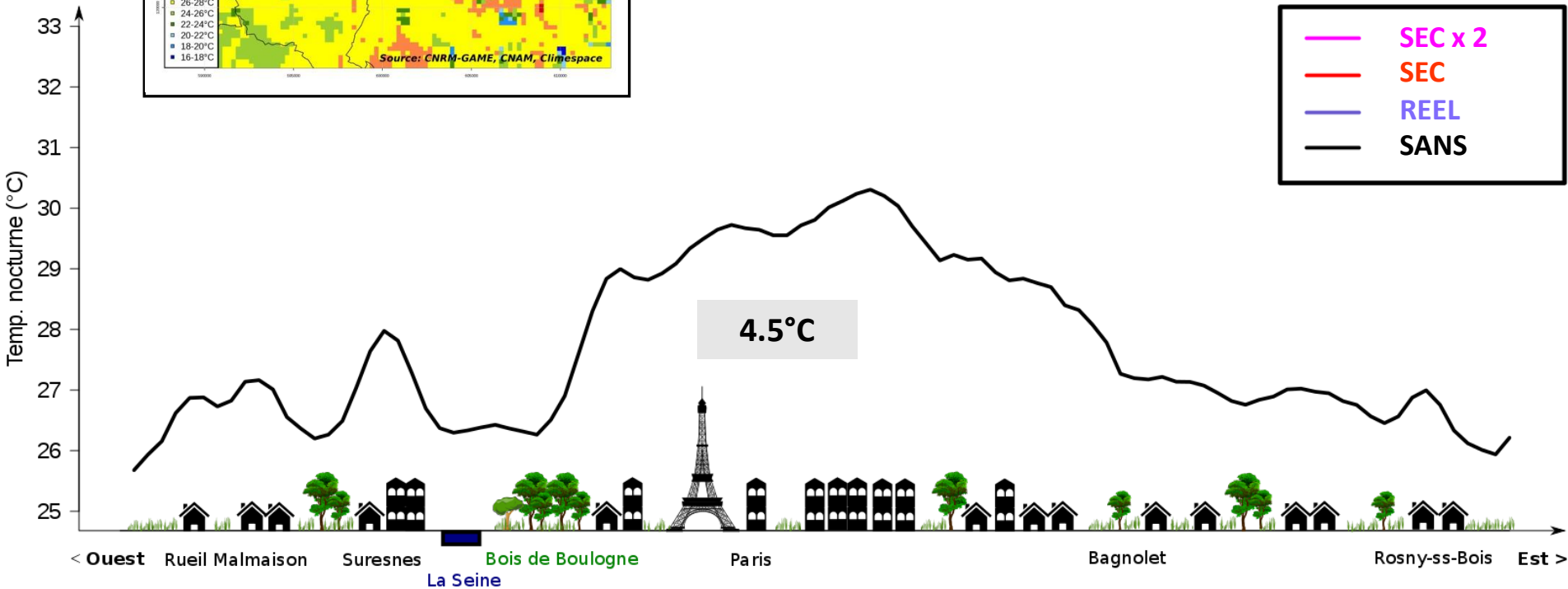
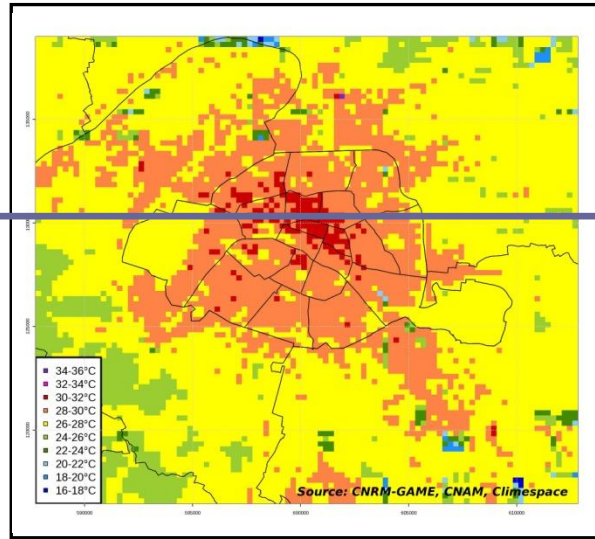
Augmentations des températures nocturnes engendrées par la climatisation

de Munck et al. (2013) *Int. Jour. Climatol.*



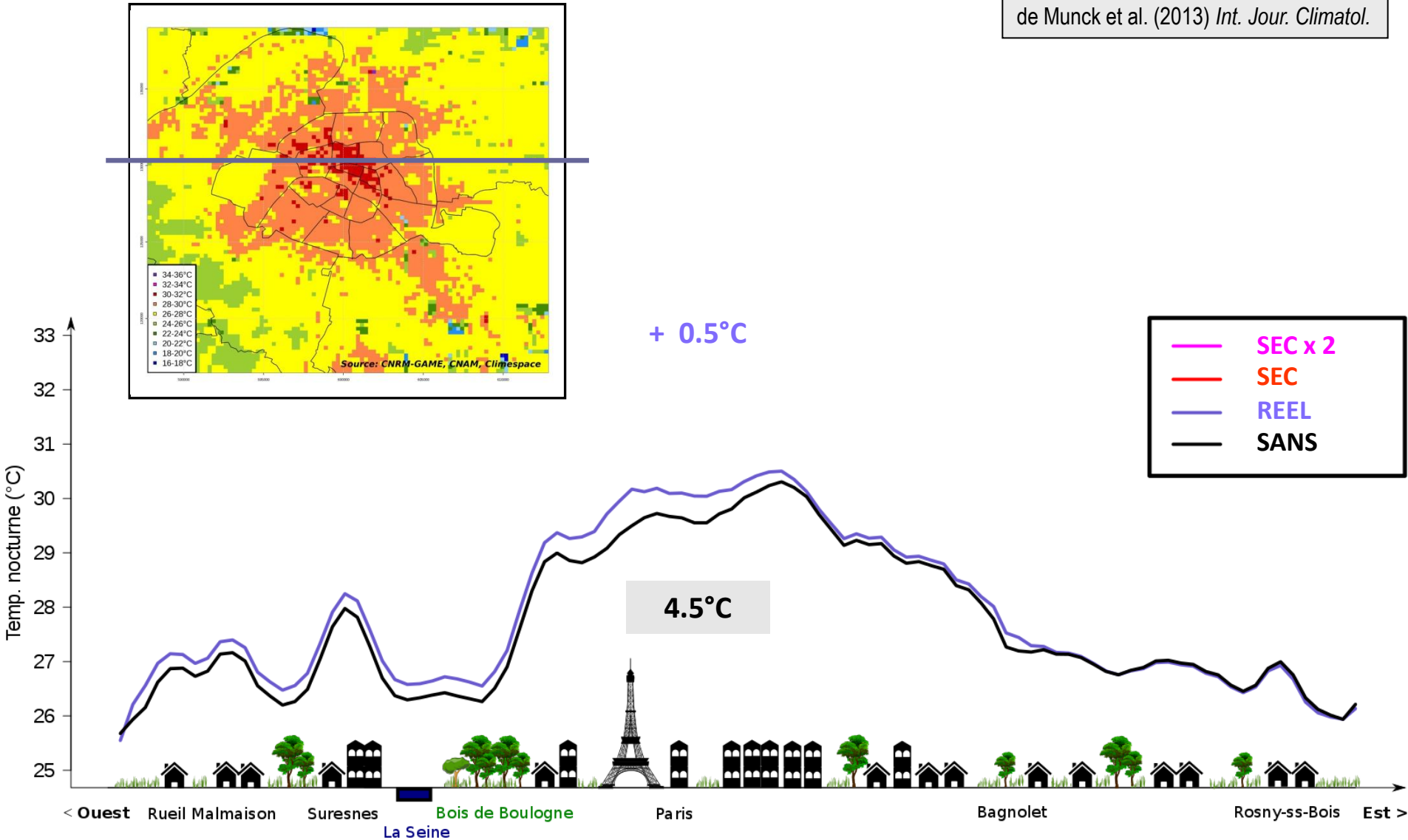
Augmentations des températures nocturnes engendrées par la climatisation

de Munck et al. (2013) *Int. Jour. Climatol.*



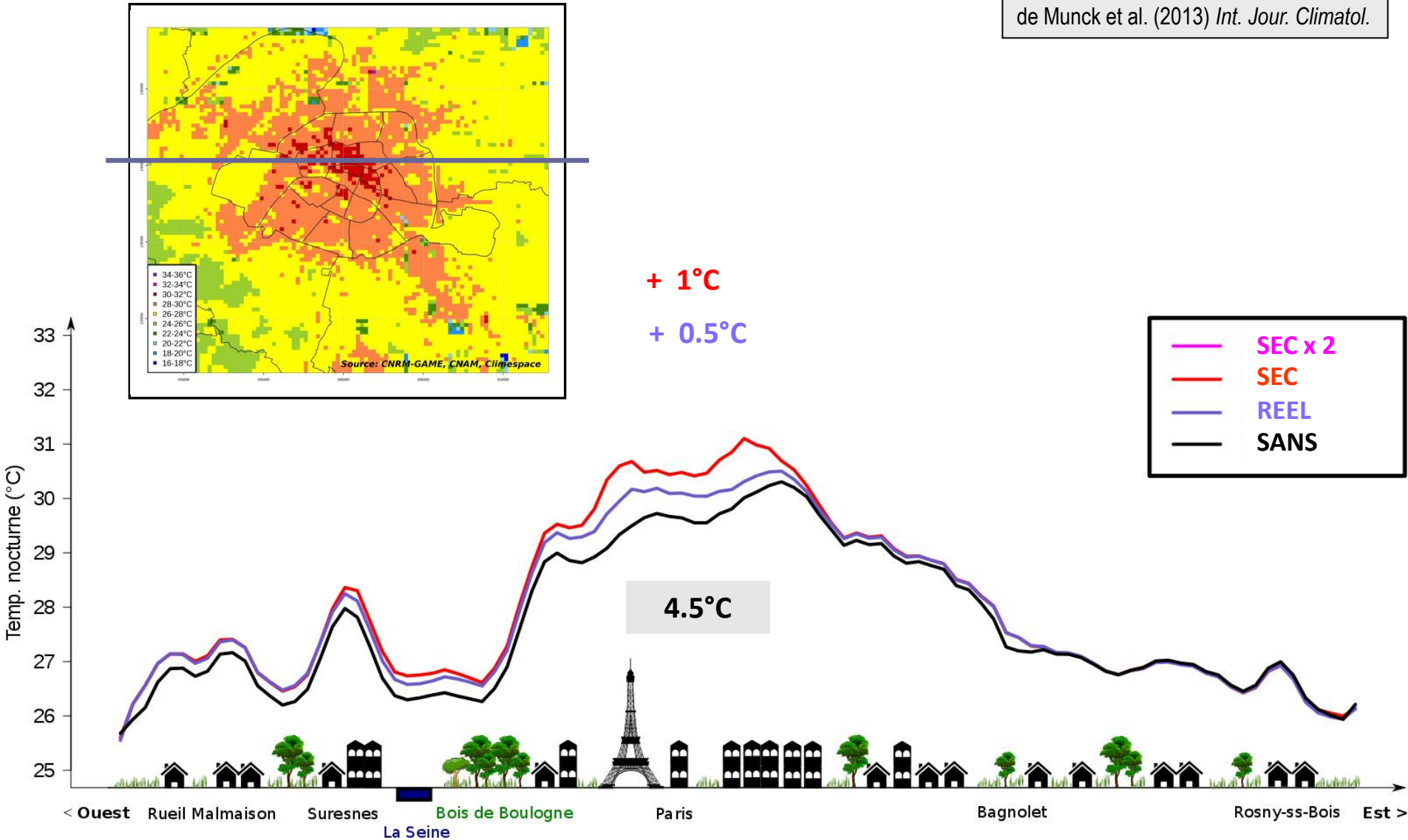
Augmentations des températures nocturnes engendrées par la climatisation

de Munck et al. (2013) *Int. Jour. Climatol.*



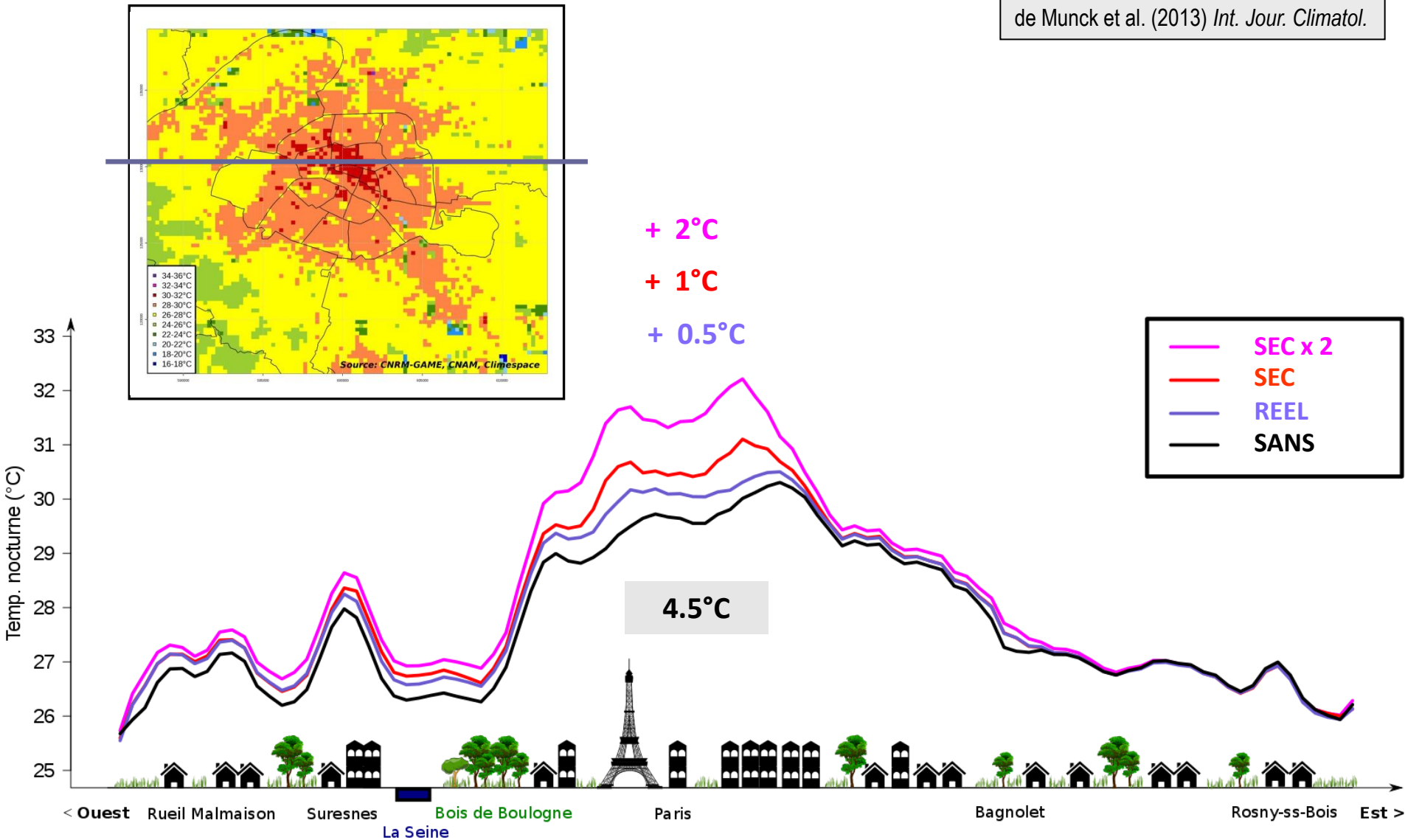
Augmentations des températures nocturnes engendrées par la climatisation

de Munck et al. (2013) *Int. Jour. Climatol.*



Augmentations des températures nocturnes engendrées par la climatisation

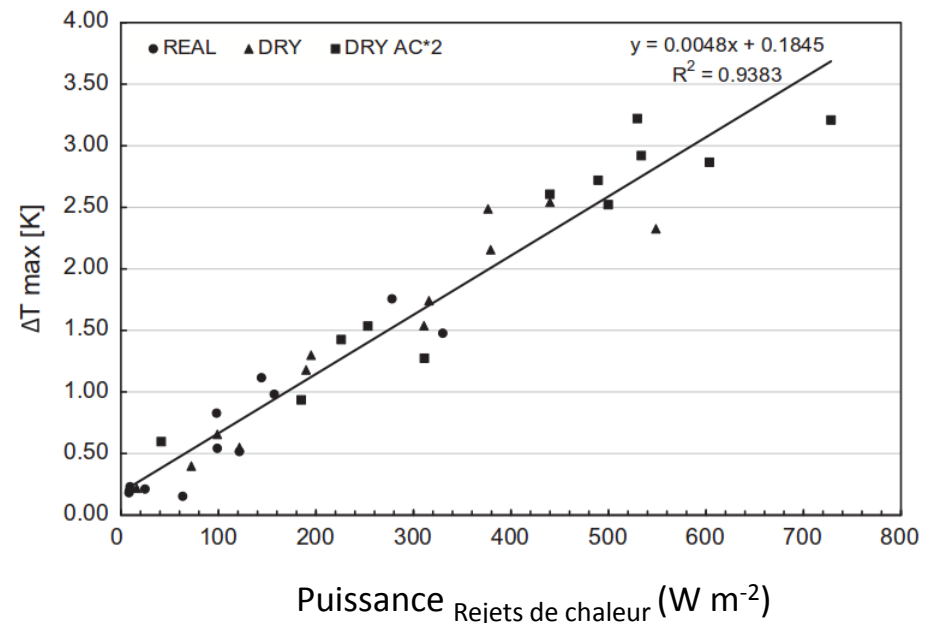
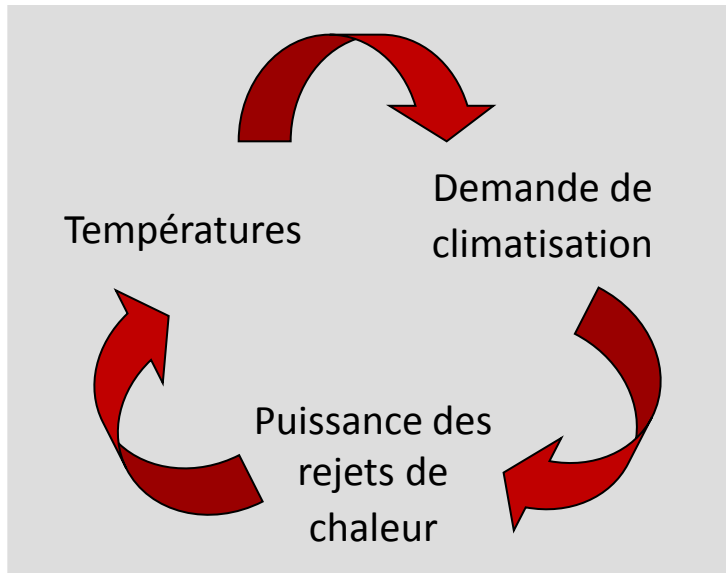
de Munck et al. (2013) *Int. Jour. Climatol.*



Conclusions

1. La climatisation engendre une augmentation de la température de l'air extérieur significative.
2. Cette augmentation de température est plus marquée la nuit que le jour.
3. L'augmentation de température est proportionnelle à la puissance des rejets de chaleur sensible.

Source : Tréméac et al.(2012) *Applied Energy*



La climatisation, mesure d'adaptation pour le confort intérieur, se fait au détriment du confort extérieur.

1 – Contexte

- ◆ Micro-climat urbain
- ◆ Ville et changement climatique
- ◆ Stratégies d'adaptation : climatisation et verdissement
- ◆ Outils de modélisation utilisés au GAME

2 – Adaptation par la climatisation

- ◆ Impacts de la climatisation sur le micro-climat extérieur (Paris)

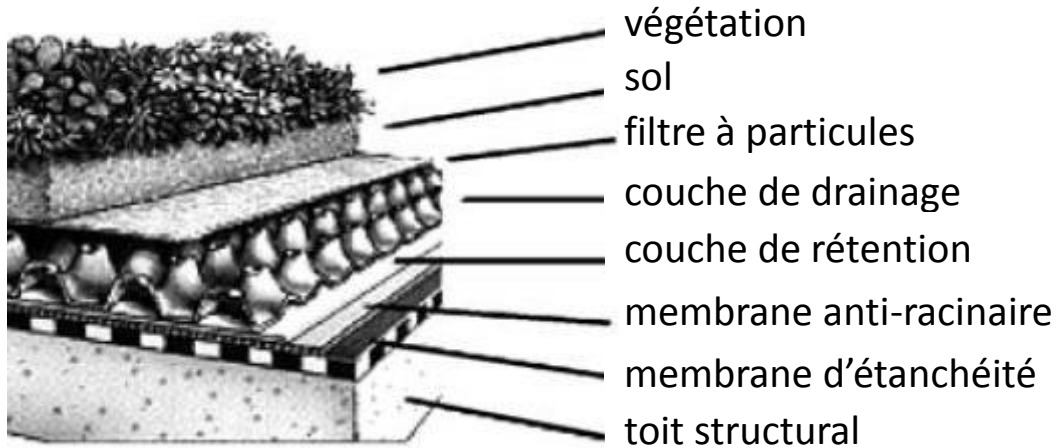
3 – Adaptation par la végétation

- ◆ Modélisation des toitures végétalisées dans TEB
- ◆ Paramétrisation de l'arrosage estival
- ◆ Impacts de différents scénarios de verdissement en contexte de canicule (Paris)
- ◆ Conséquences du verdissement à l'échelle saisonnière

4 – Conclusions et perspectives

Développement d'un modèle de toiture végétalisée pour TEB

De la réalité ...

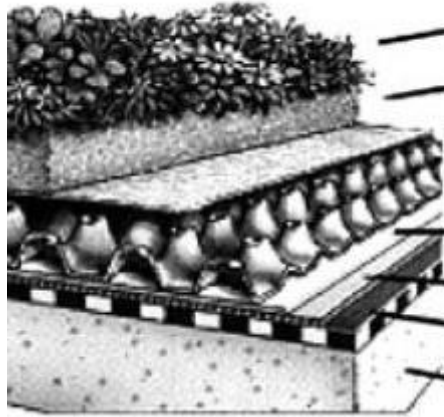


Toiture
Végétalisée
Extensive

Lazzarin et al.(2005) *Energy and Buildings*

Développement d'un modèle de toiture végétalisée pour TEB

De la réalité ...



végétation

sol

filtre à particules

couche de drainage

couche de rétention

membrane anti racinaire

membrane d'étanchéité

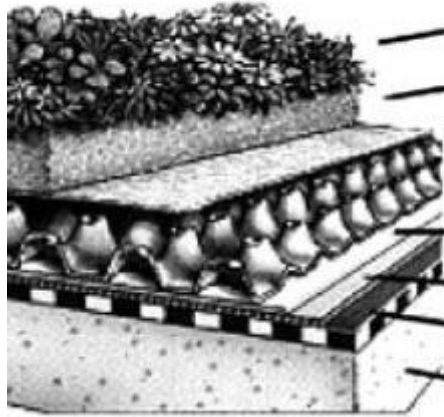
toit structural

Toiture
Végétalisée
Extensive

Lazzarin et al.(2005) *Energy and Buildings*

Développement d'un modèle de toiture végétalisée pour TEB

De la réalité ...



végétation

sol

filtre à particules

couche de drainage

couche de rétention

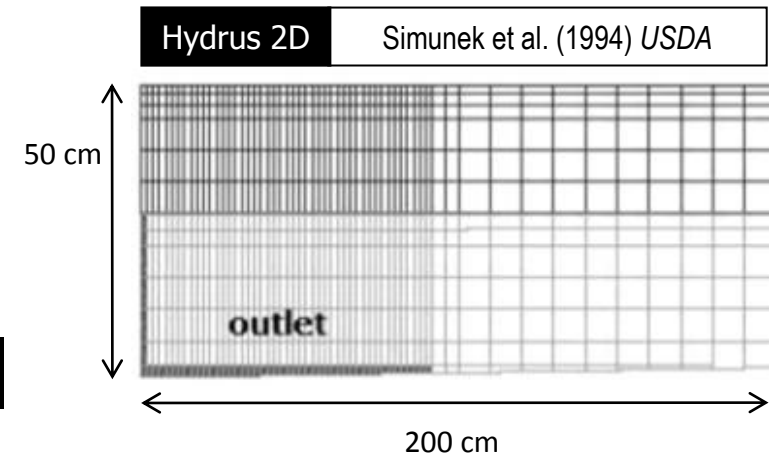
membrane anti racinaire

membrane d'étanchéité

toit structural

Lazzarin et al.(2005) *Energy and Buildings*

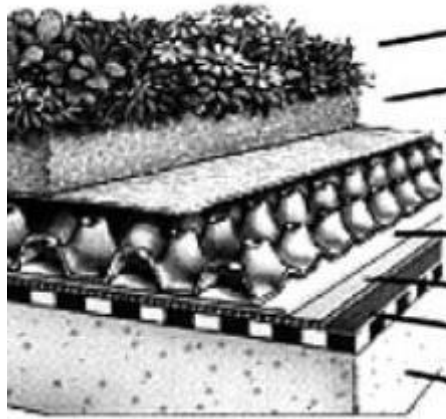
... aux modèles physiques existants



Palla et al.(2009) *Journal of Hydrology*

Développement d'un modèle de toiture végétalisée pour TEB

De la réalité ...



végétation

sol

filtre à particules

couche de drainage

couche de rétention

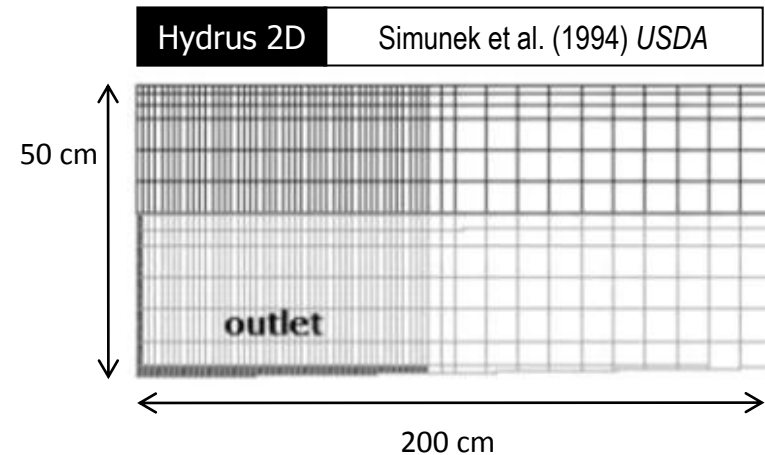
membrane anti racinaire

membrane d'étanchéité

toit structural

Lazzarin et al.(2005) *Energy and Buildings*

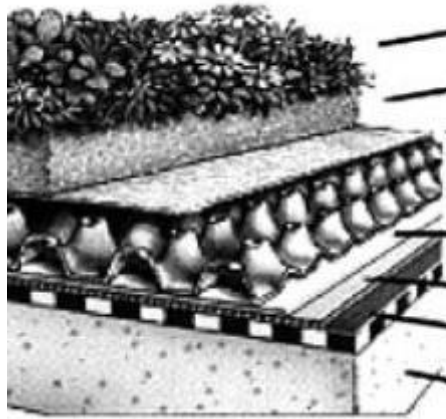
... aux modèles physiques existants

Palla et al.(2009) *Journal of Hydrology*

- Modélisation physique détaillée
- Sous différents climats
- A l'échelle de la ville
- Interactions thermo-énergétiques
 - TVE / atmosphère
 - TVE / bâti
- Transferts hydrologiques

Développement d'un modèle de toiture végétalisée pour TEB

De la réalité ...



végétation

sol

filtre à particules

couche de drainage

couche de rétention

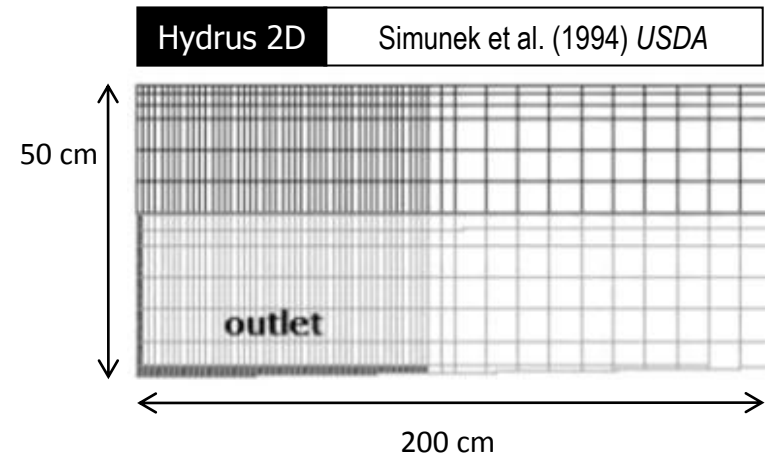
membrane anti racinaire

membrane d'étanchéité

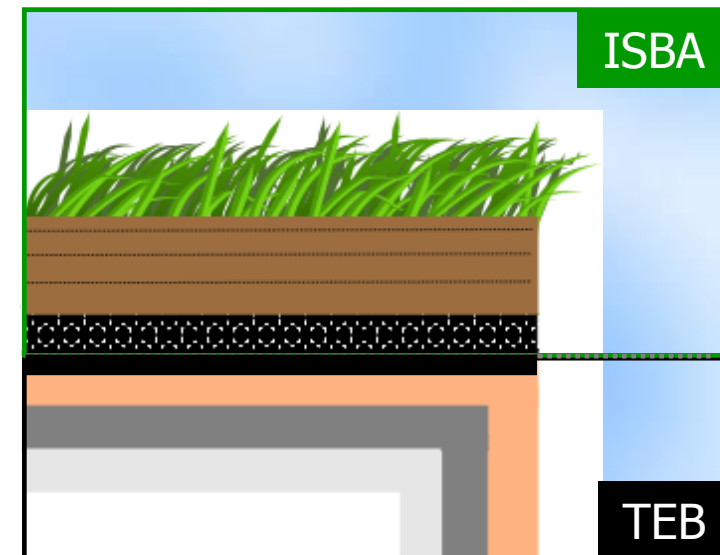
toit structural

Lazzarin et al. (2005) *Energy and Buildings*

... aux modèles physiques existants



... au modèle physique proposé

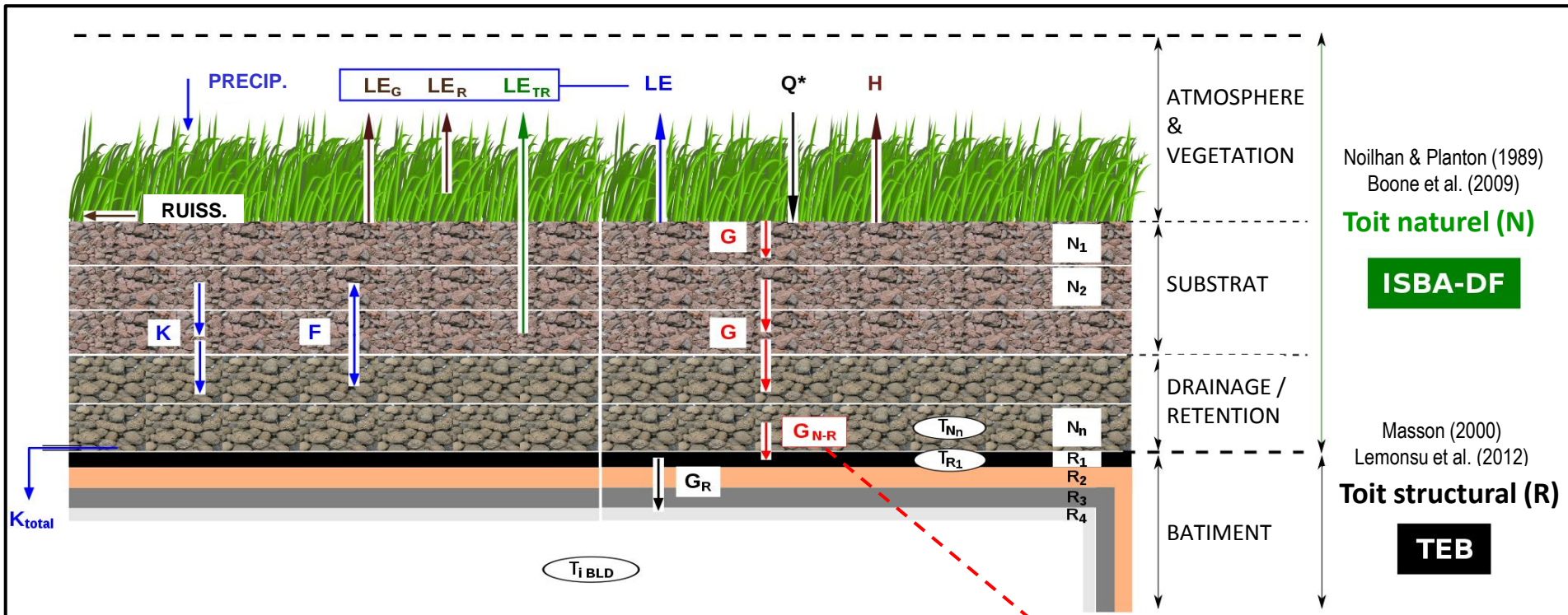


- Modélisation physique détaillée
- Sous différents climats
- A l'échelle de la ville
- Interactions thermo-énergétiques
 - TVE / atmosphère
 - TVE / bâti
- Transferts hydrologiques

Développement d'un modèle de toiture végétalisée pour TEB

de Munck et al. *GMD* (sous presse)

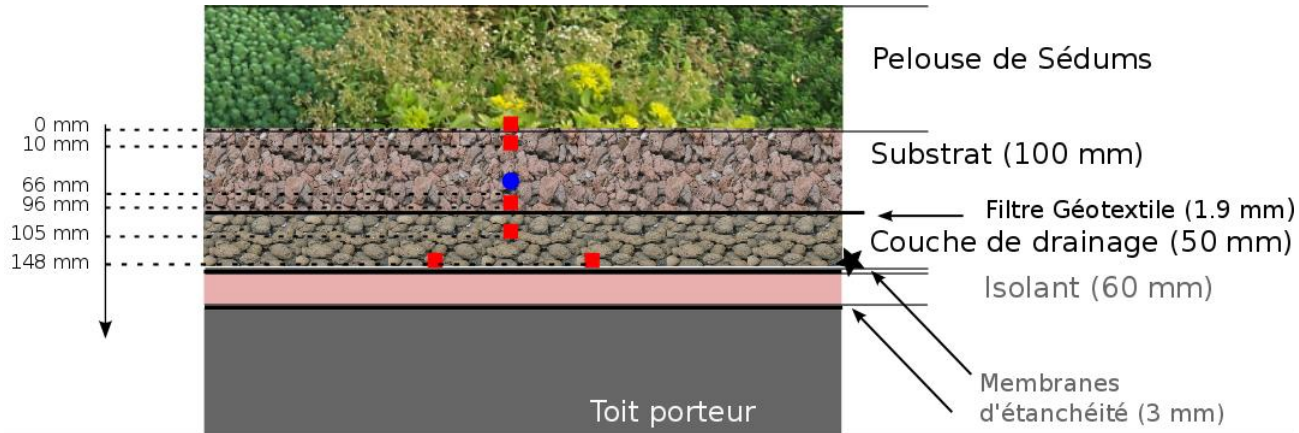
Processus physiques simulés



$$C_{R_1} \frac{\partial T_{R_1}}{\partial t} = \frac{(1 - f_{GR})}{d_{R_1}} (Q_{R_1}^* - H_{R_1} - LE_{R_1} - G_{R_1-R_2}) + \frac{f_{GR}}{d_{R_1}} (G_{N-R} - G_{R_1-R_2})$$

$$G_{N-R} = \bar{\lambda}_{N-R} (T_{N_n} - T_{R_1})$$

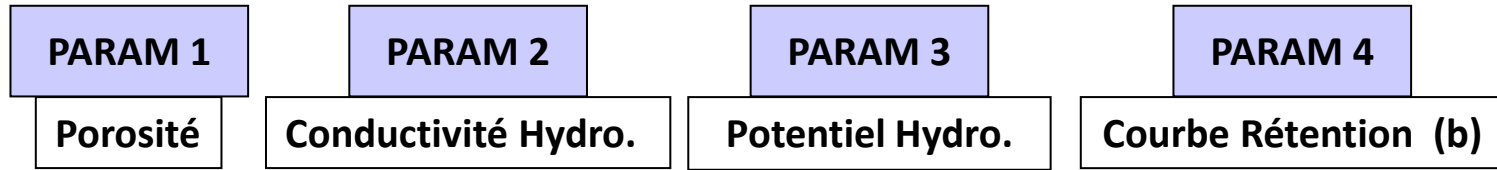
Calibration du comportement hydrologique du modèle / un cas d'étude



- teneur en eau (& potentiel matriciel)
- ★ débit d'eau en sortie
- températures

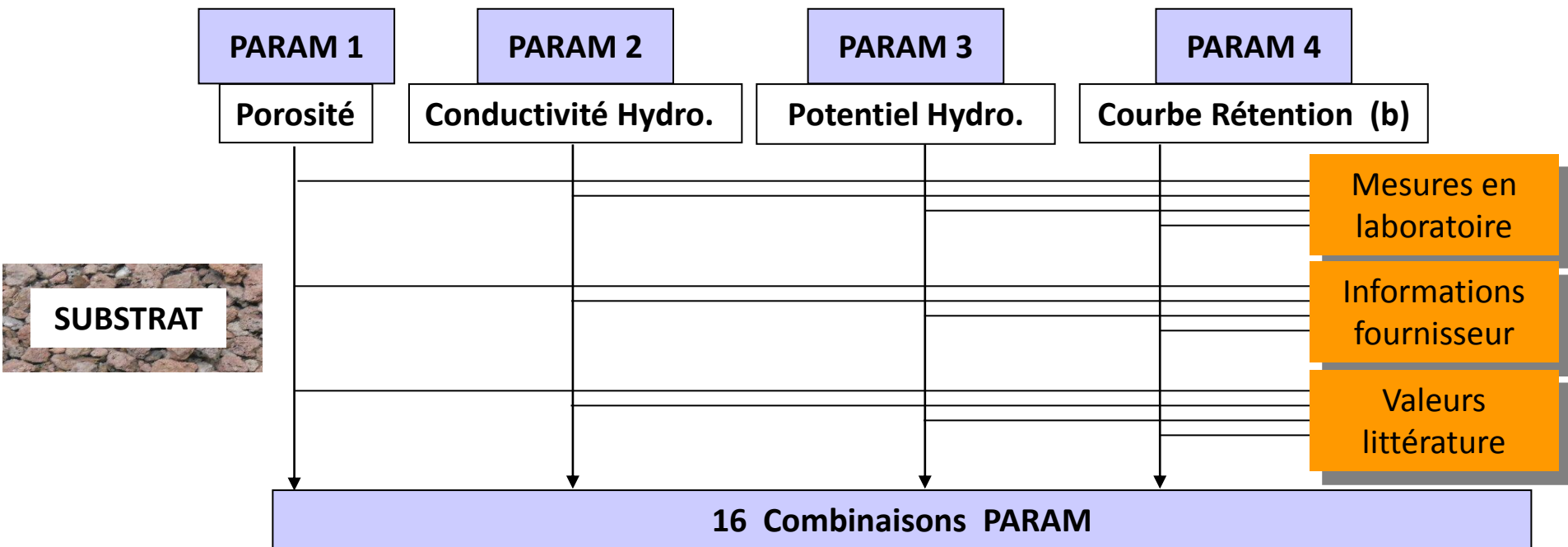
5 mois : du 07/2011 au 11/2011

Méthodologie pour la calibration du modèle de TVE

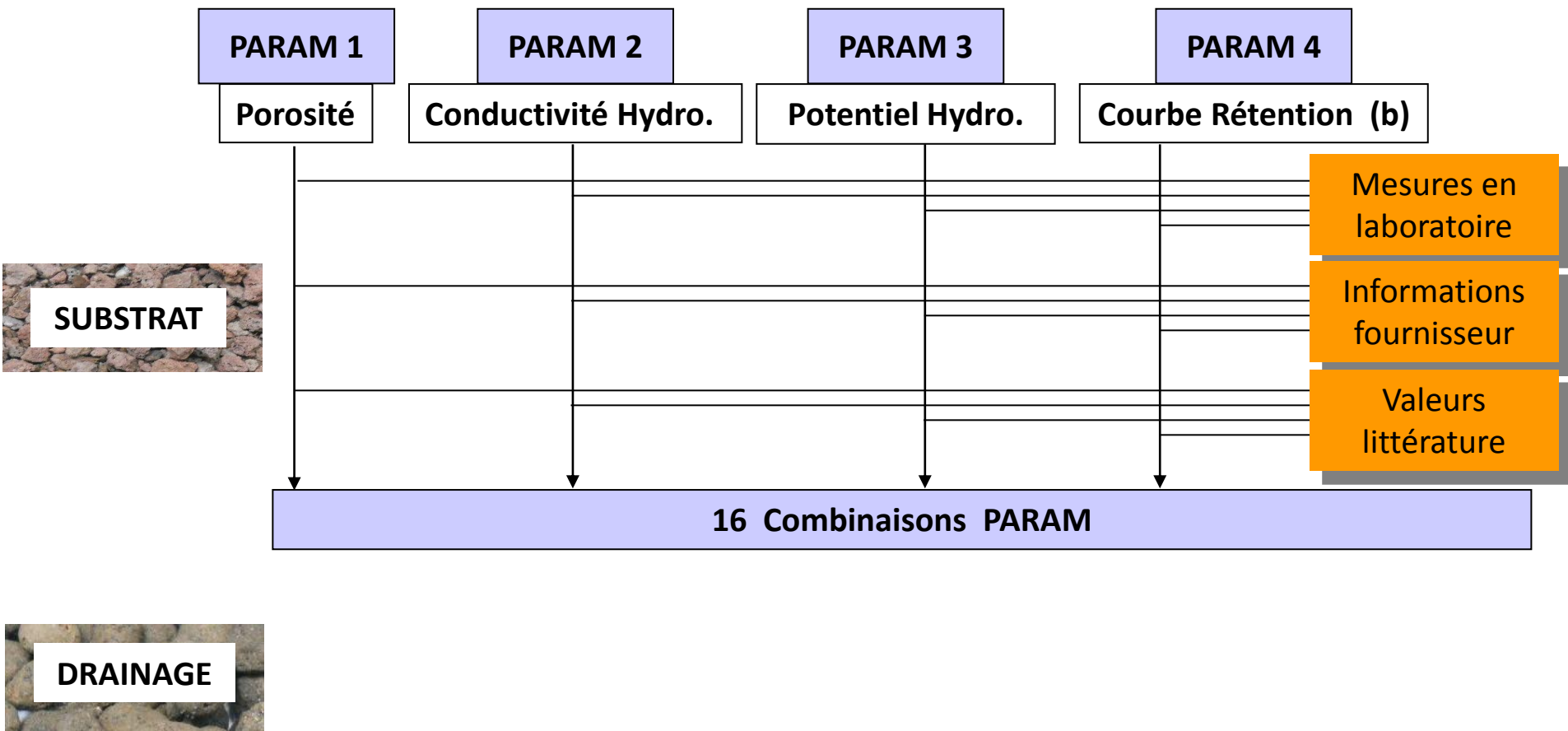


SUBSTRAT

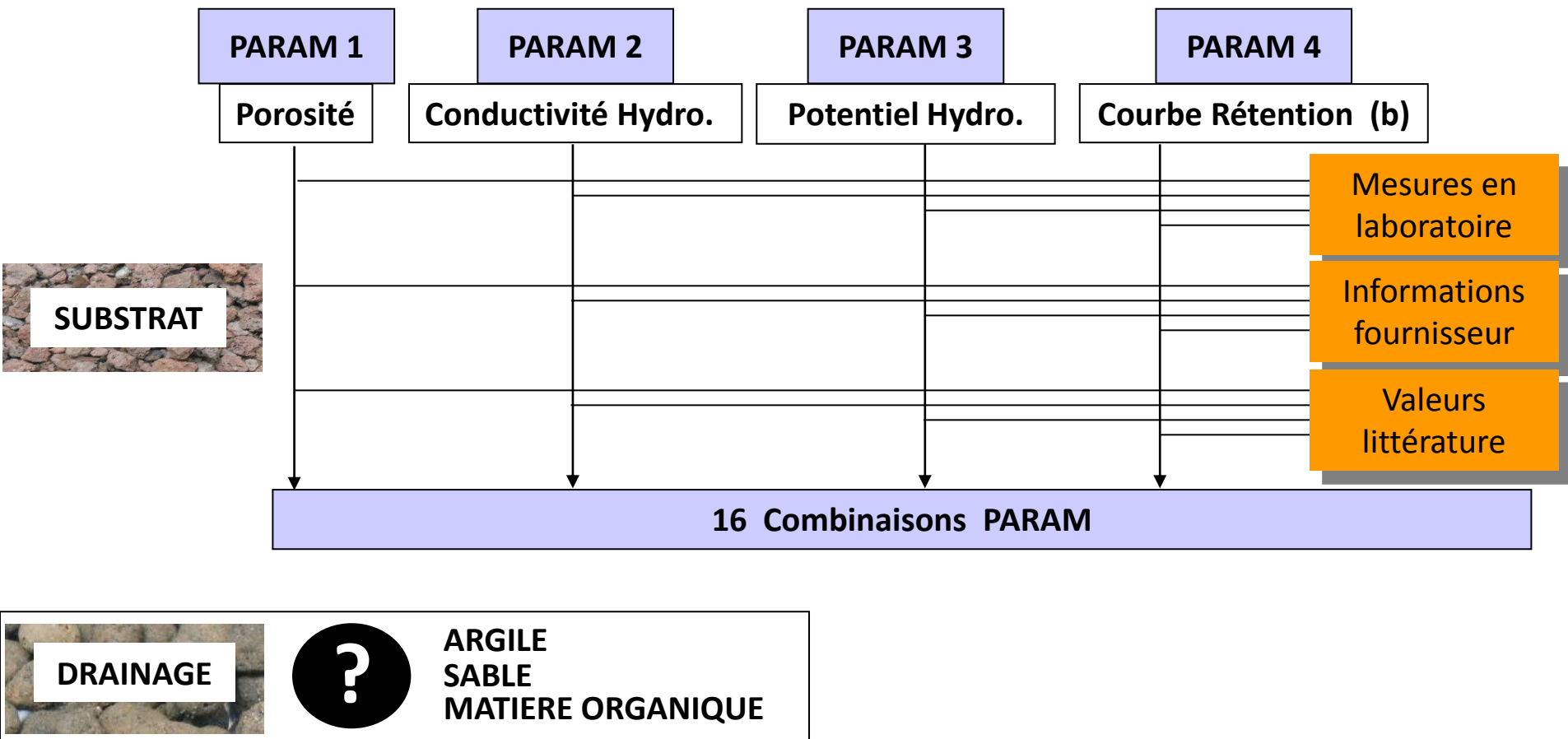
Méthodologie pour la calibration du modèle de TVE



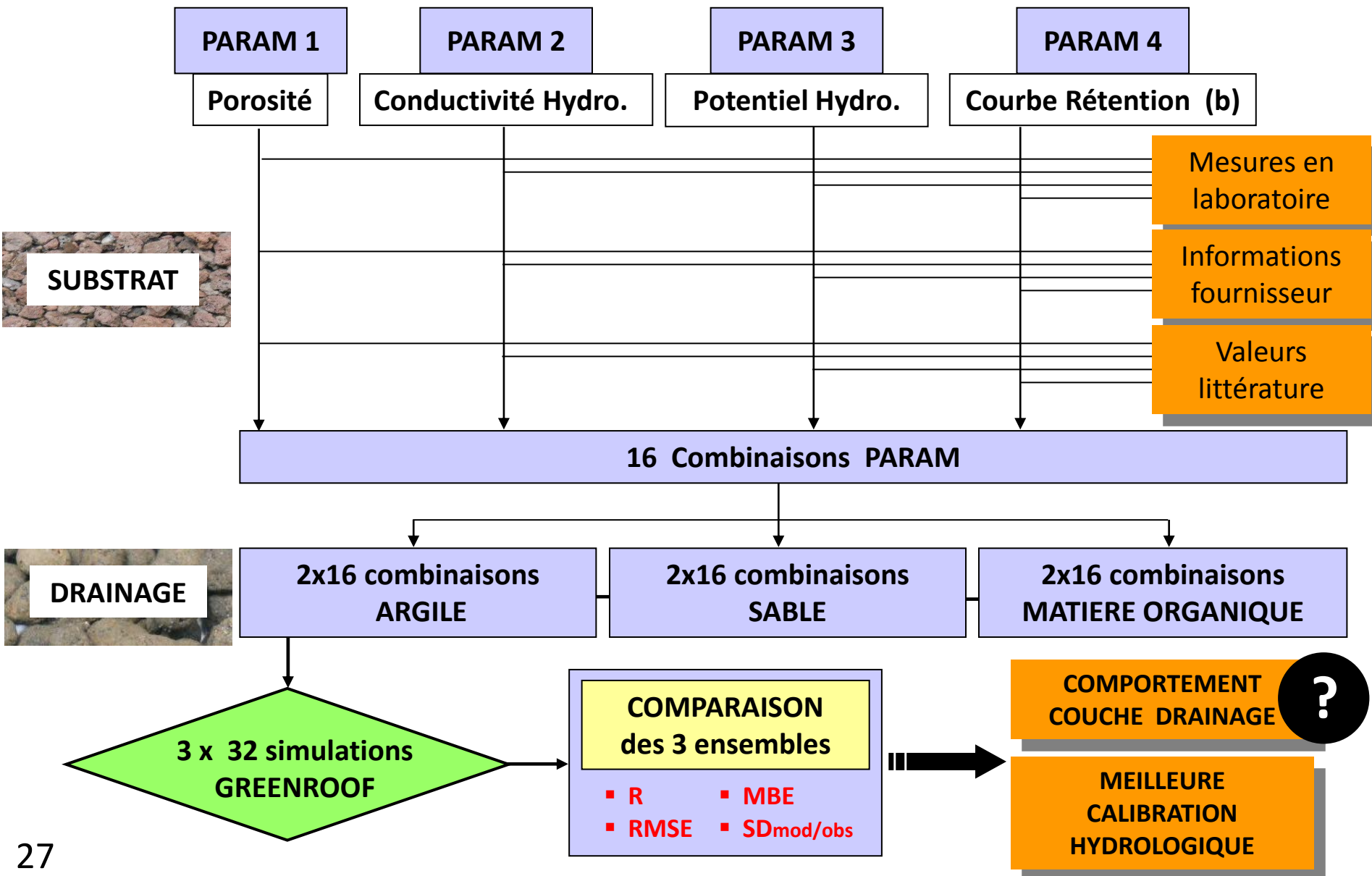
Méthodologie pour la calibration du modèle de TVE



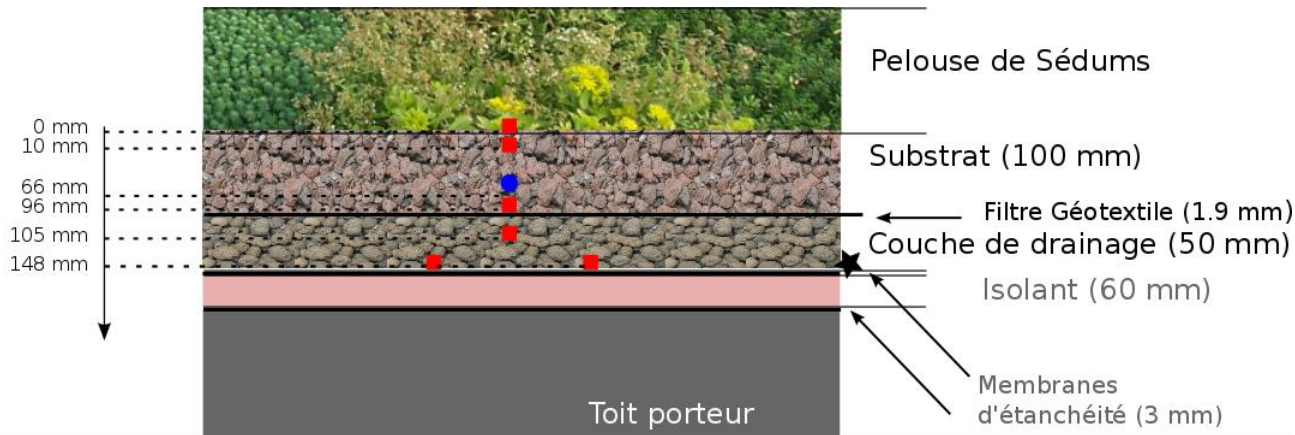
Méthodologie pour la calibration du modèle de TVE



Méthodologie pour la calibration du modèle de TVE



Calibration du comportement hydrologique du modèle / un cas d'étude

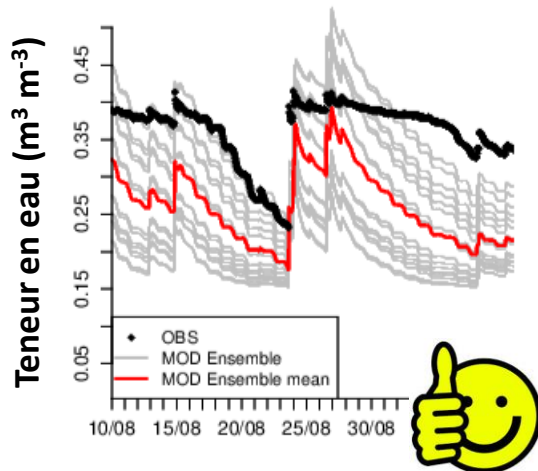
de Munck et al. *GMD* (sous presse)

?

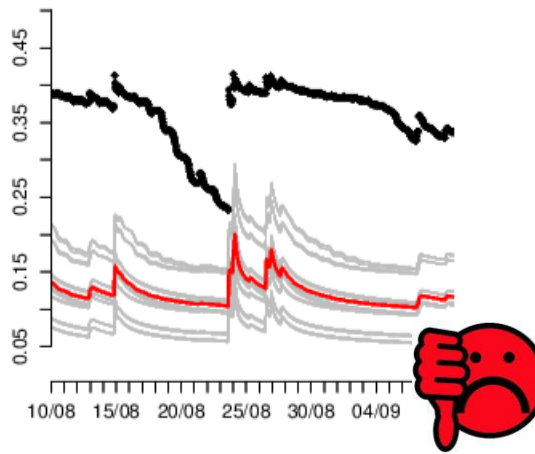
DRAINAGE : MO

DRAINAGE : SABLE

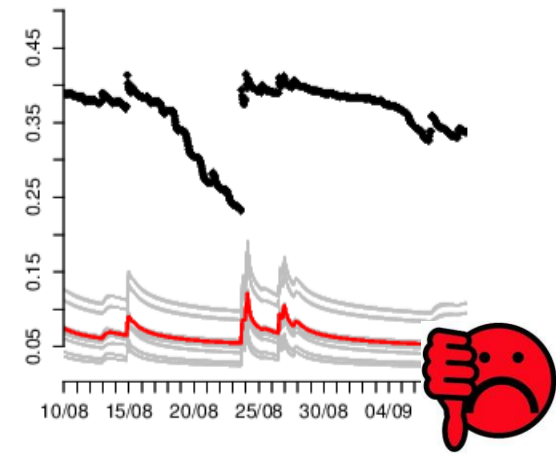
DRAINAGE : ARGILE



$R = 0.78$
 $RMSE = 0.11$
 $MBE = -0.10$

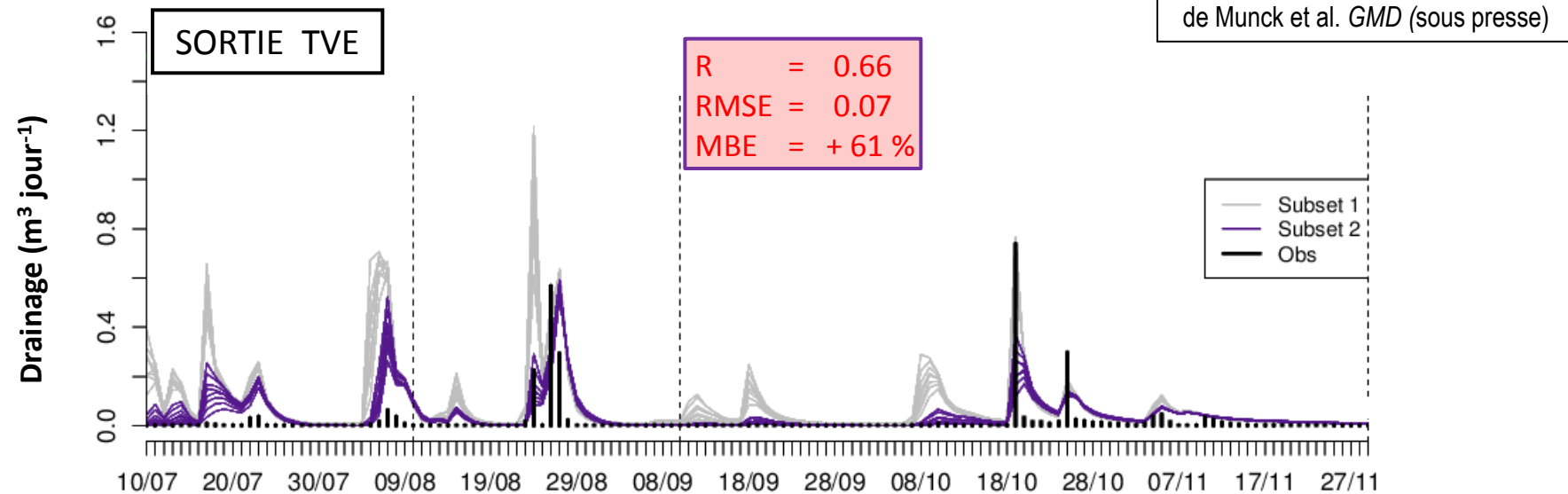
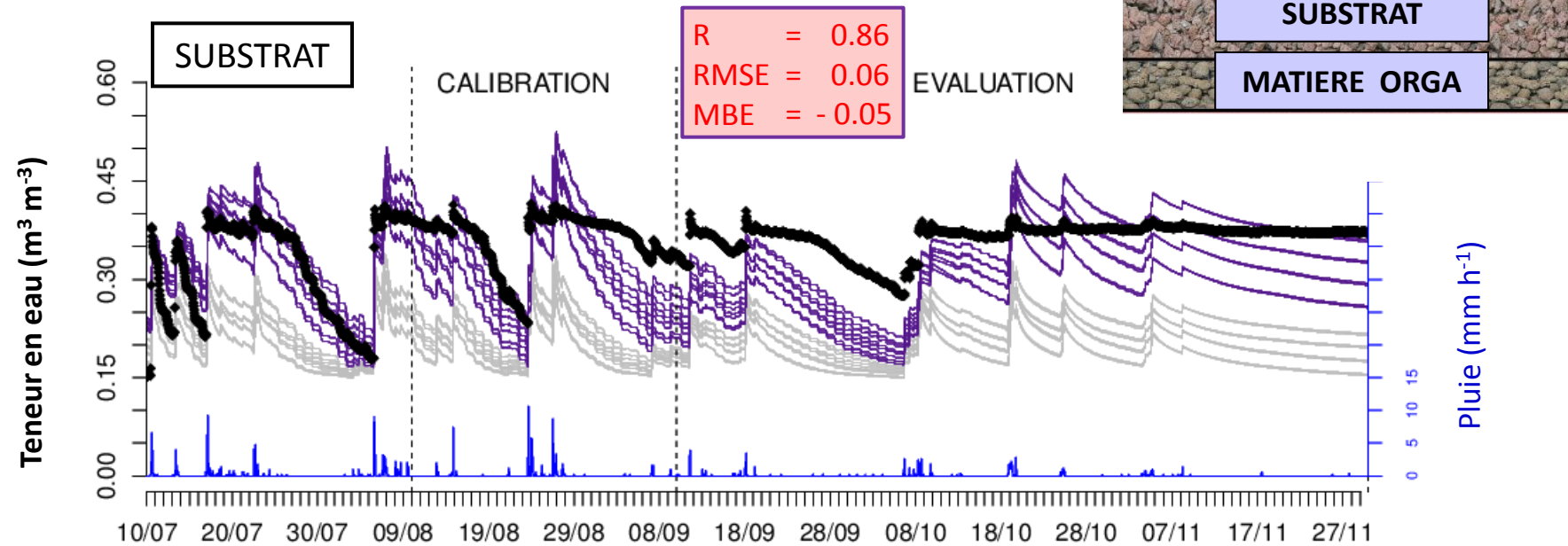


$R = 0.59$
 $RMSE = 0.29$
 $MBE = -0.24$

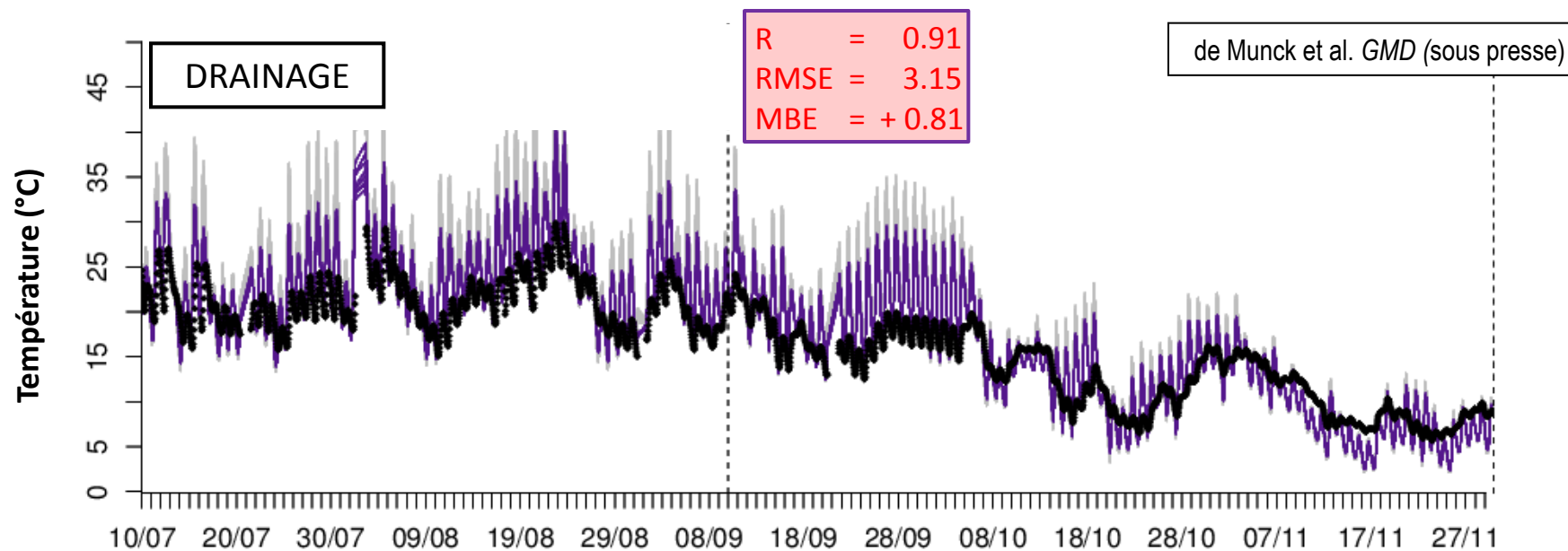
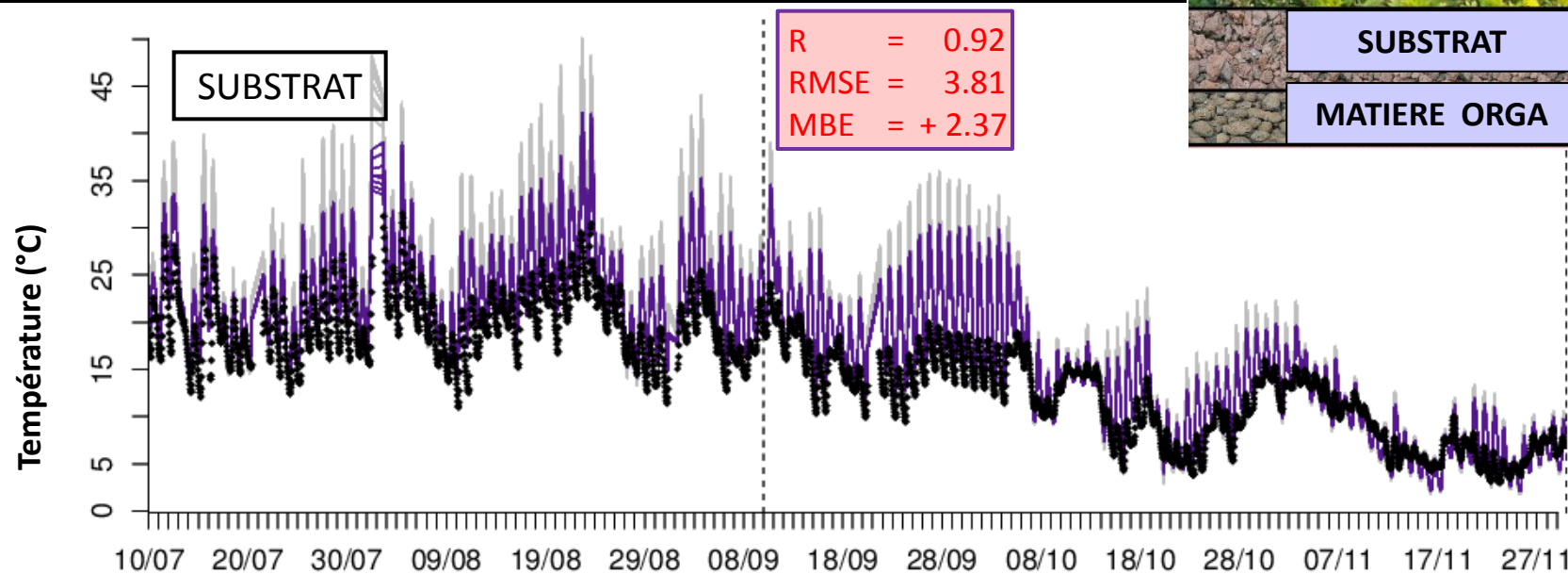


$R = 0.57$
 $RMSE = 0.30$
 $MBE = -0.30$

Evaluation du modèle sur le cas d'étude : transferts de masse



Evaluation du modèle sur le cas d'étude : températures



Paramétrisation pour l'arrosage de la végétation urbaine



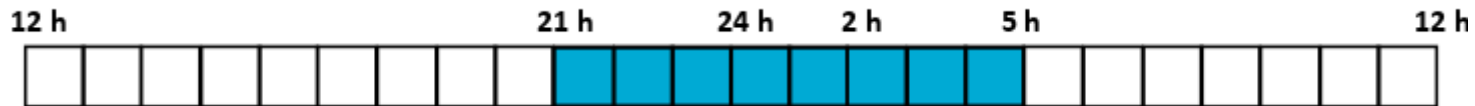
- Arrosage estival

SOPREMA (2011)

- Automatique

$$Irrig = 25 \text{ L m}^{-2} \text{ sem}^{-1}$$

$$\Delta t_{Irrig} = 8 \text{ heures de nuit}$$



Végétation de pleine terre



Végétation en toiture



$$P_{global} = P + \left(Irrig \times \frac{24}{\Delta t_{Irrig}} \right) = P_{feuillage} + P_{sol}$$

$$P_{sol} = P_{nat} - f_{veg} P_{nat} + R_{veg} + Irrig \times \frac{24}{\Delta t_{Irrig}}$$

1 – Contexte

- ◆ Micro-climat urbain
- ◆ Ville et changement climatique
- ◆ Stratégies d'adaptation : climatisation et verdissement
- ◆ Outils de modélisation utilisés au GAME : SURFEX et TEB
- ◆ Projets de recherche et domaine d'étude

2 – Adaptation par la climatisation

- ◆ Impacts de la climatisation sur le micro-climat extérieur (Paris)

3 – Adaptation par la végétation

- ◆ Modélisation des toitures végétalisées dans TEB
- ◆ Paramétrisation de l'arrosage estival
- ◆ Impacts de différents scénarios de verdissement en contexte de canicule (Paris)
- ◆ Conséquences du verdissement à l'échelle saisonnière

4 – Conclusions et perspectives

Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

METEO



Canicule
2003

VEG



USAGE



Scénarios

Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

METEO

Canicule
2003

METEO

1998-2008



VEG



USAGE



Scénarios

Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

Impact de la ville sur le forçage atm. Forçage de température 2D

METEO



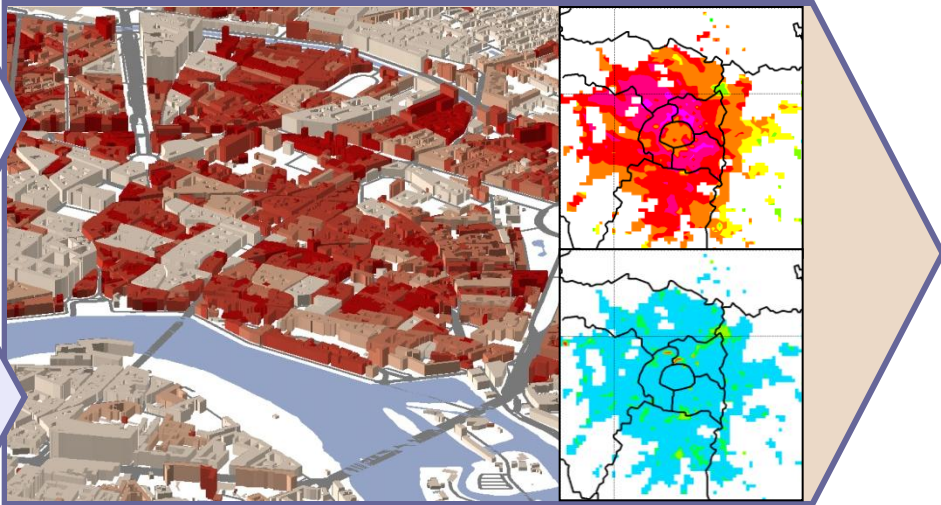
Canicule 2003

METEO

1998-2008




VEG

USAGE



Scénarios

Modélisation du climat urbain (1km)
TEB

Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

Impact de la ville sur le forçage atm. Forçage de température 2D

METEO



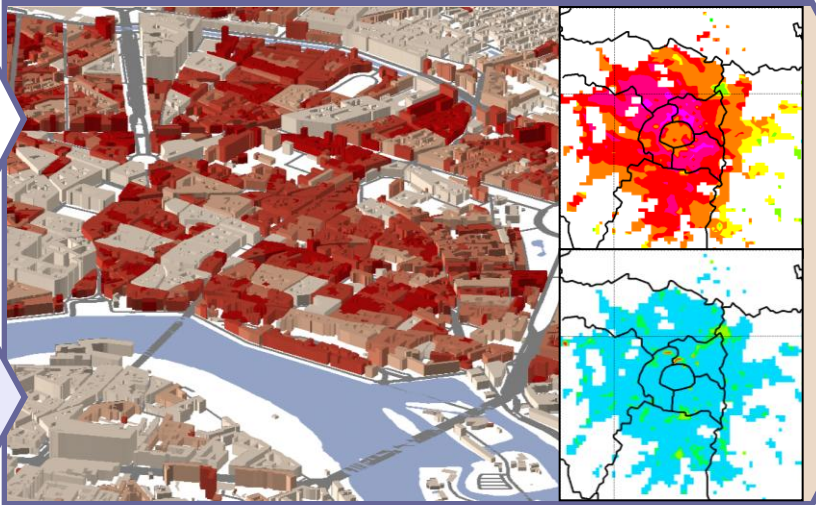
Canicule 2003

METEO

1998-2008




VEG

USAGE



Indicateurs

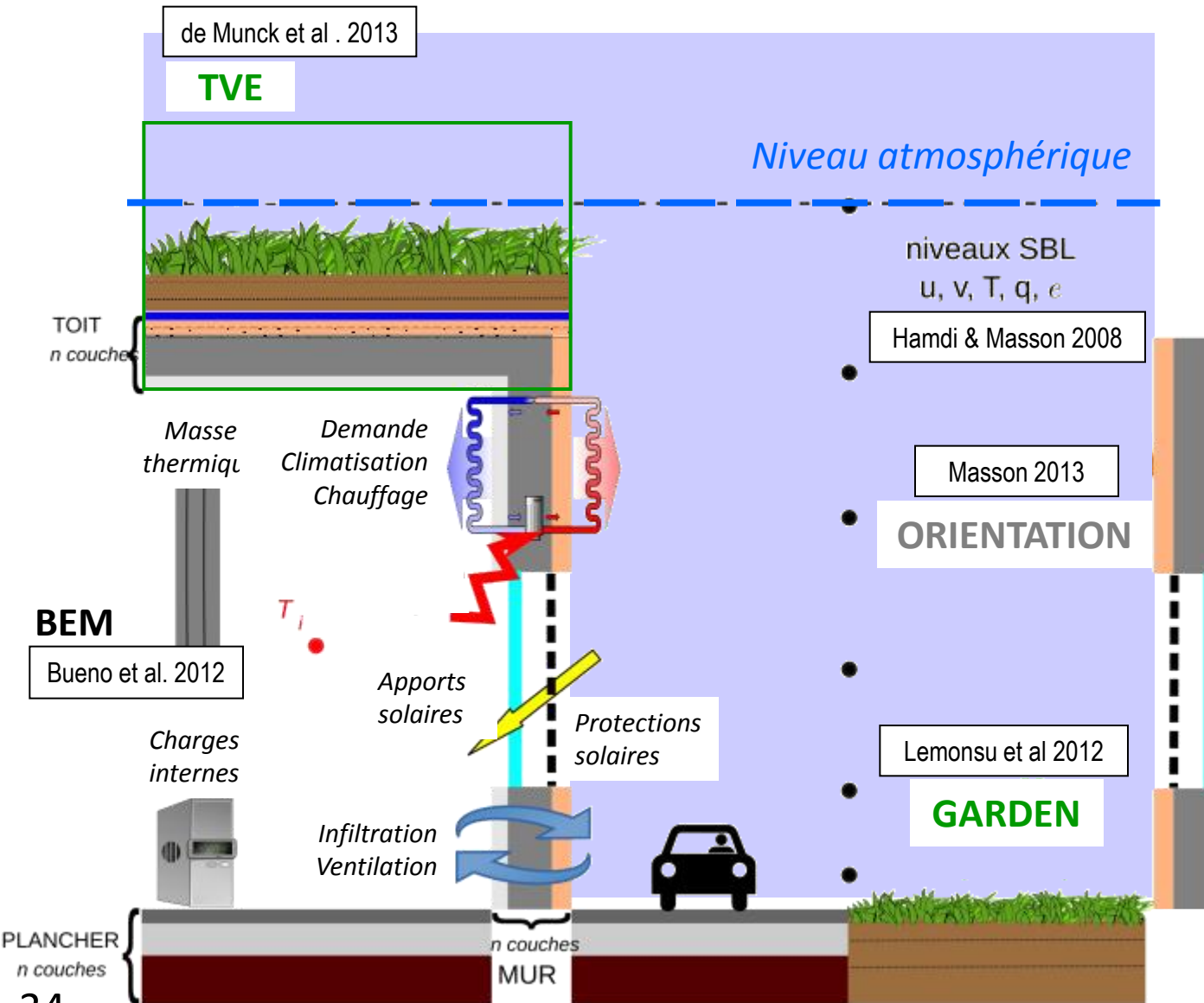
- Confort/stress thermique
- Consommation d'énergie
- Ressources en eau

Scénarios

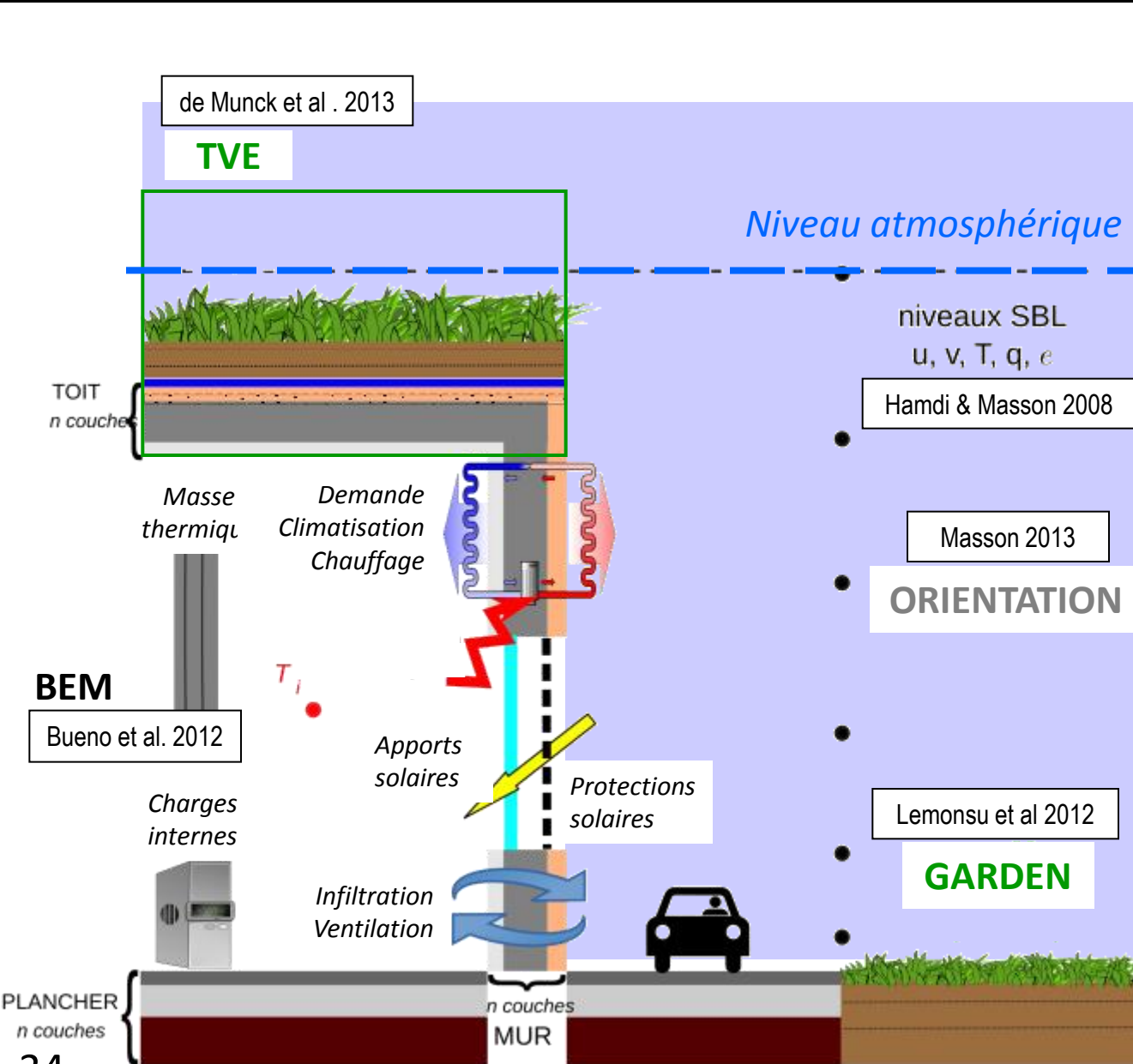
Modélisation du climat urbain (1km)
TEB

Évaluation des scénarios

Configuration de TEB utilisée

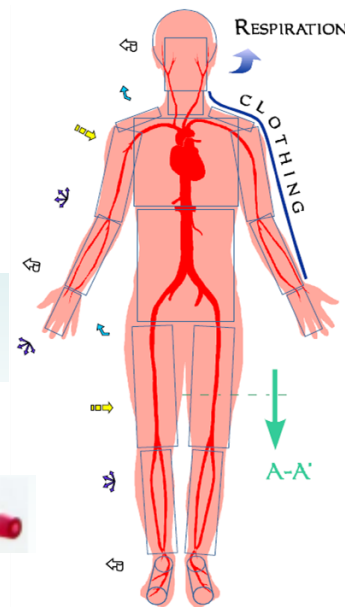


Configuration de TEB utilisée



Pigeon 2011

Température ressentie
UTCI



Echelle UTCI (°C)	Niveau de stress
au-dessus de + 46	Stress thermique extrême
+ 38 à + 46	Stress thermique très élevé
+ 32 à + 38	Stress thermique élevé
+ 26 à + 32	Stress thermique modéré
+ 9 à + 26	Pas de stress thermique

Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

Verdissement des surfaces urbaines disponibles trottoirs, parkings, places, ronds-points, ..

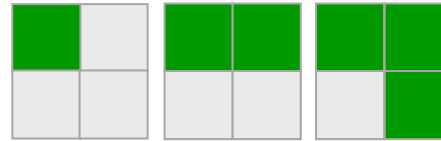
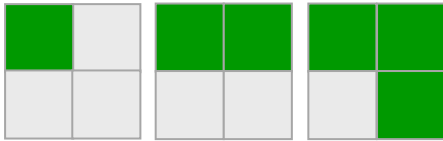
Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

Verdissement des surfaces urbaines disponibles trottoirs, parkings, places, ronds-points, ..

VEG



Surfaces
disponibles
verdiées



USAGE



VEG
sol



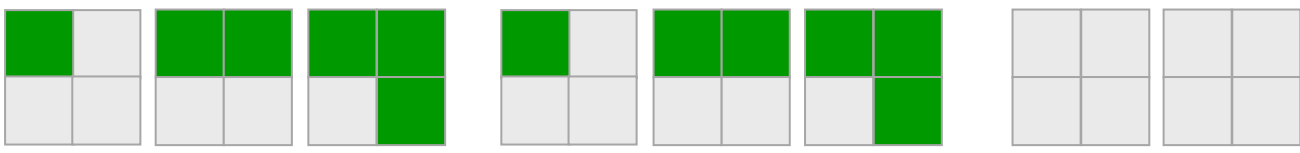
Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

Verdissement des surfaces urbaines disponibles trottoirs, parkings, places, ronds-points, ..

VEG



Surfaces disponibles verdies



USAGE VEG sol

USAGE VEG toit



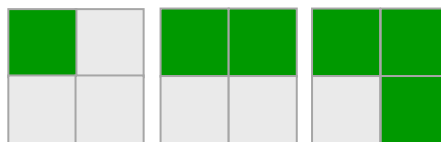
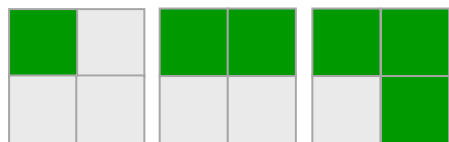
Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

Verdissement des surfaces urbaines disponibles trottoirs, parkings, places, ronds-points, ..

VEG



Surfaces disponibles verdies



USAGE VEG sol



USAGE VEG toit



USAGE



Températures de consigne « vertueuses » : 26 °C  19 °C

Températures de consigne « vertueuses » :

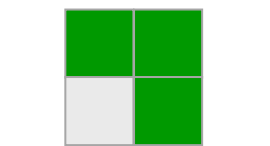
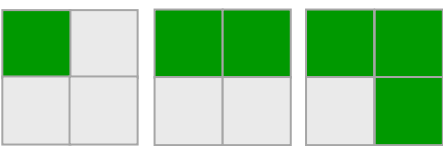
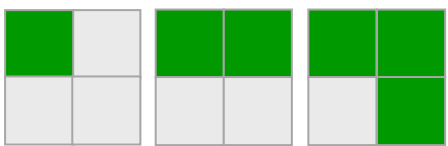
Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

Verdissement des surfaces urbaines disponibles trottoirs, parkings, places, ronds-points, ..

VEG



Surfaces disponibles vertes



USAGE VEG sol



USAGE VEG toit



USAGE



Températures de consigne « vertueuses » :

26 °C

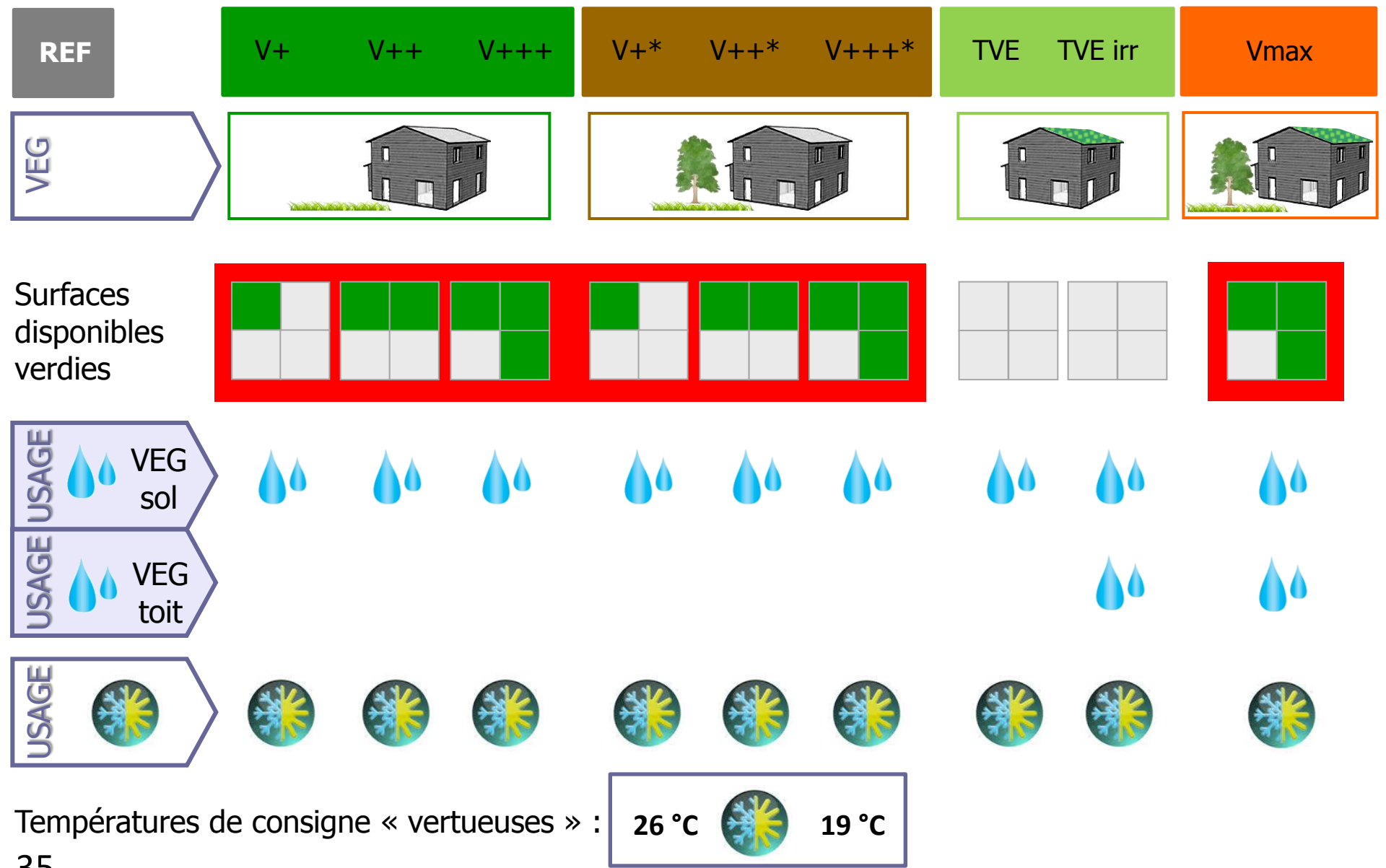


19 °C

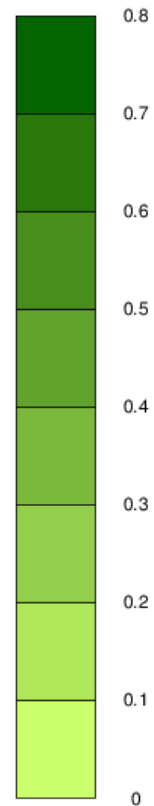
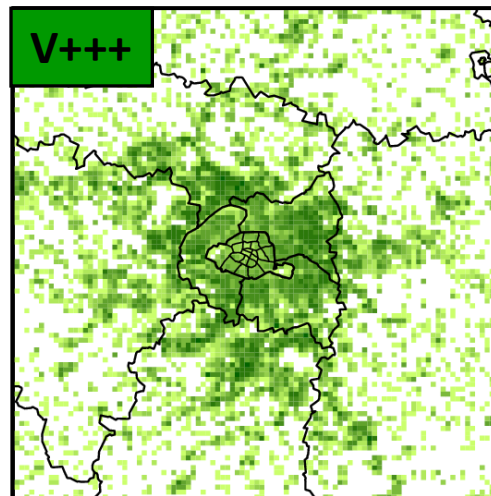
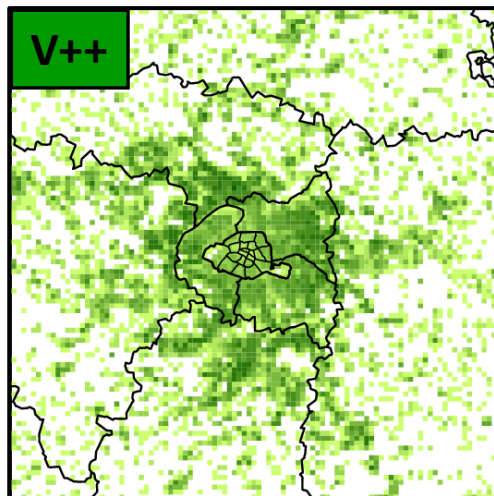
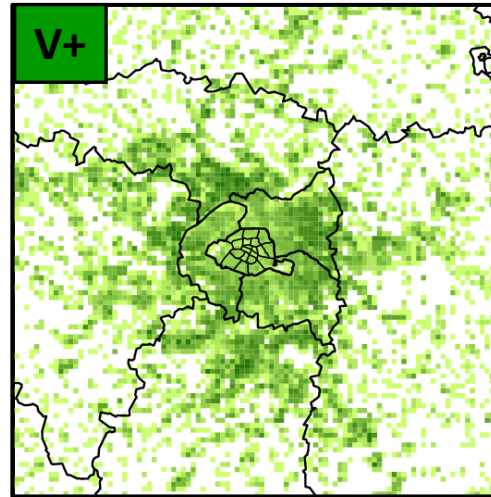
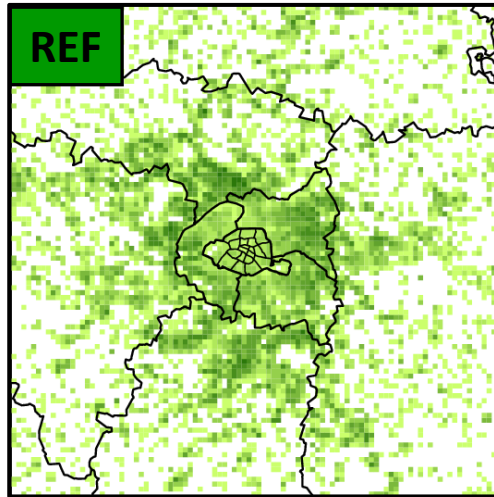
Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

REF	V+ V++ V+++			V+* V++* V+++*			TVE TVE irr	Vmax
VEG								
Surfaces disponibles vertes								
USAGE VEG sol								
USAGE VEG toit								
USAGE								
Températures de consigne « vertueuses » :	26 °C				19 °C			

Evaluation de stratégies de verdissement pour la ville de Paris

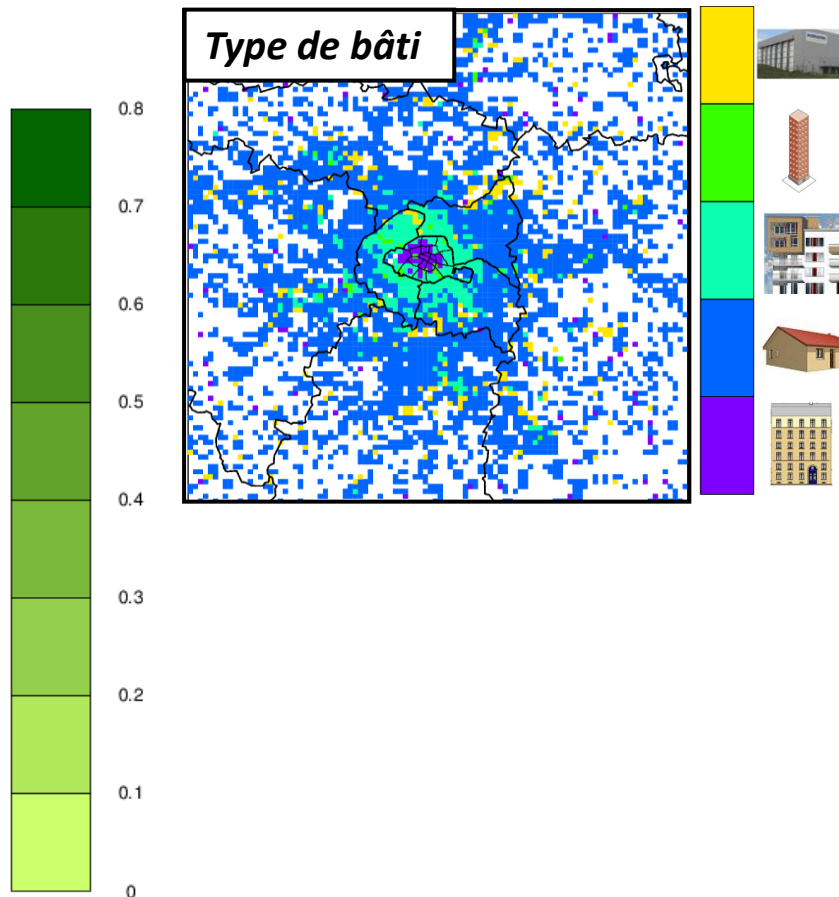
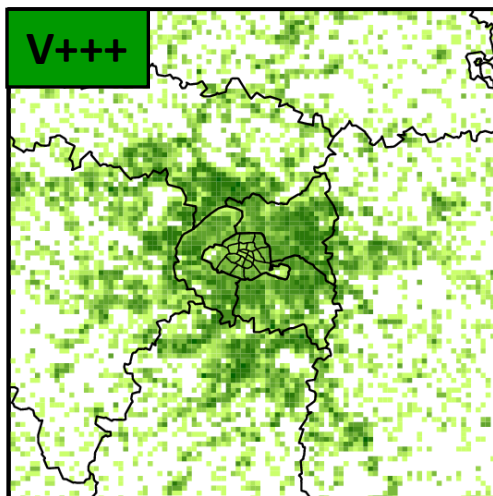
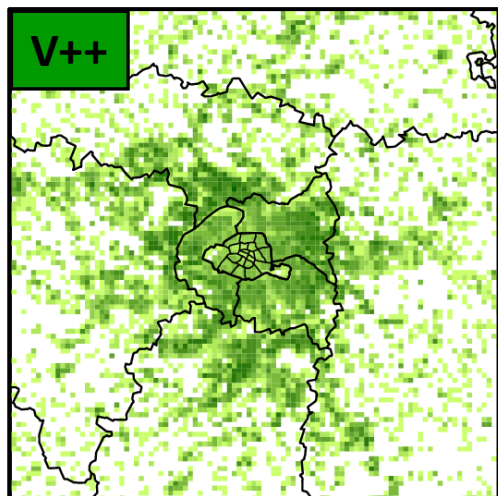
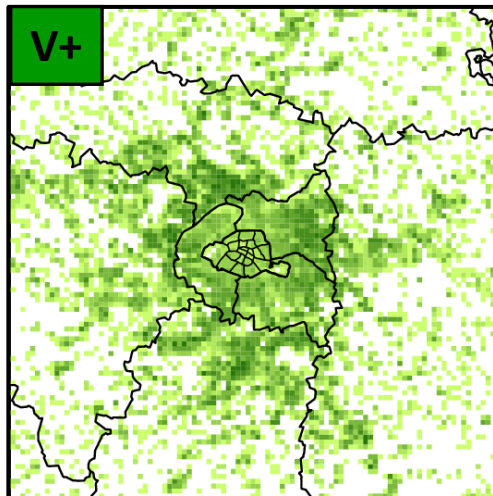
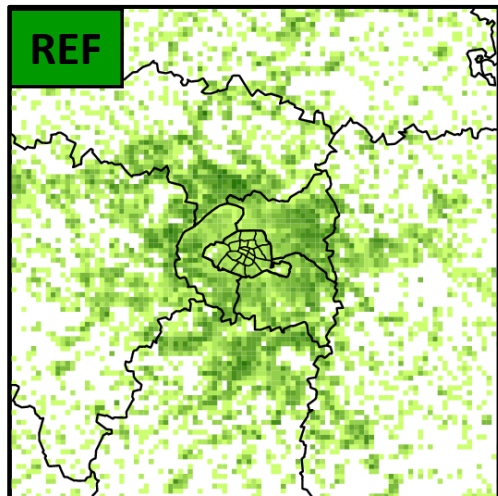
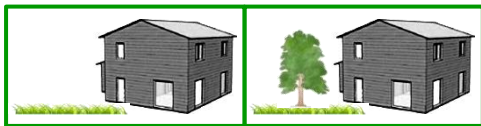


Densités de végétation urbaine au km² engendrées par le verdissement

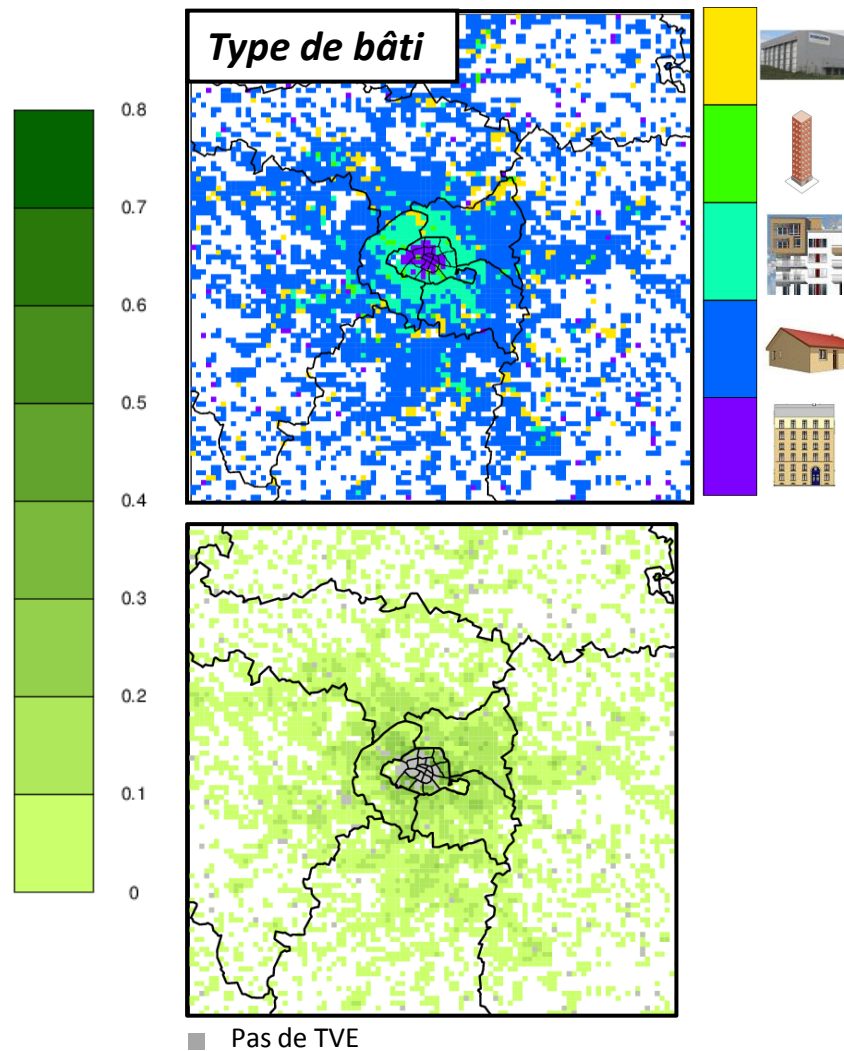
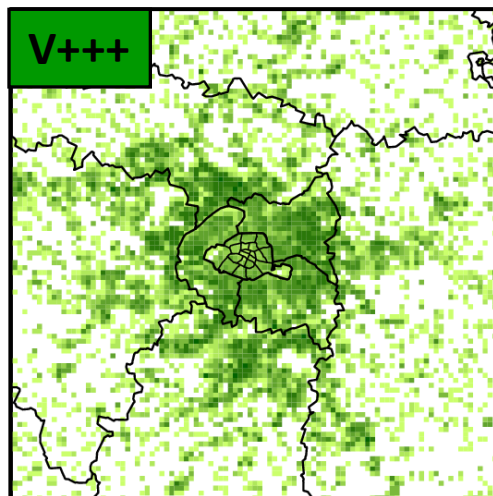
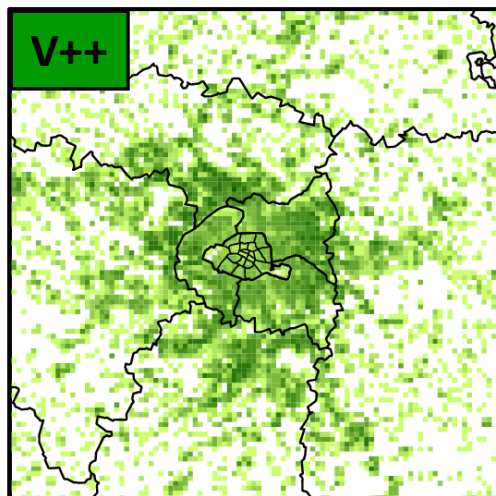
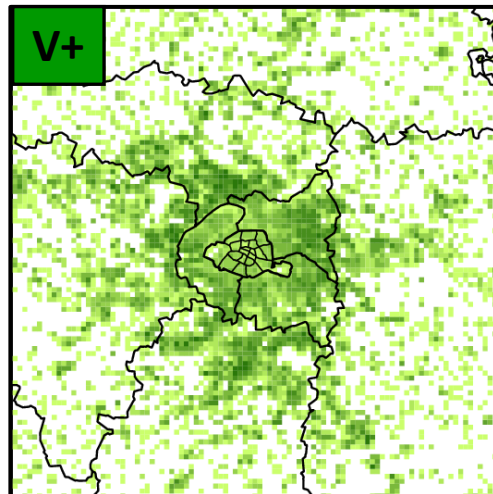
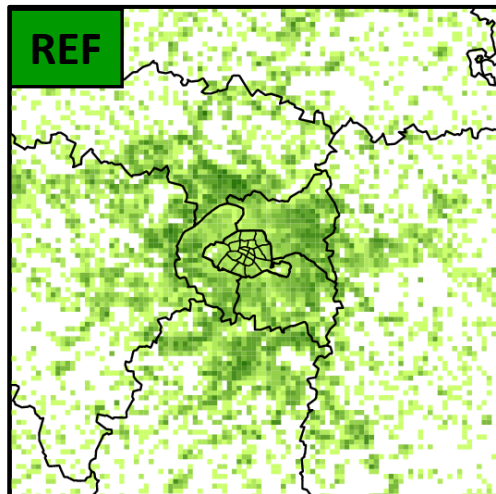
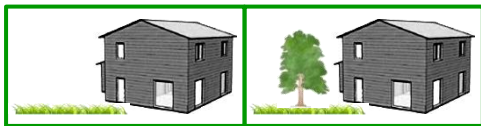


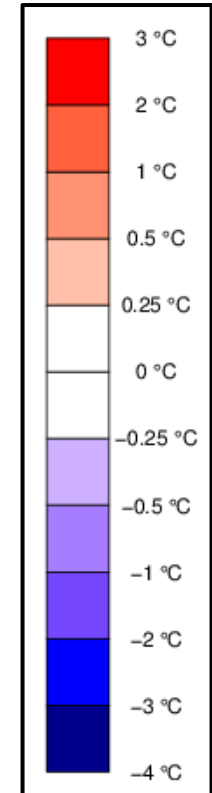
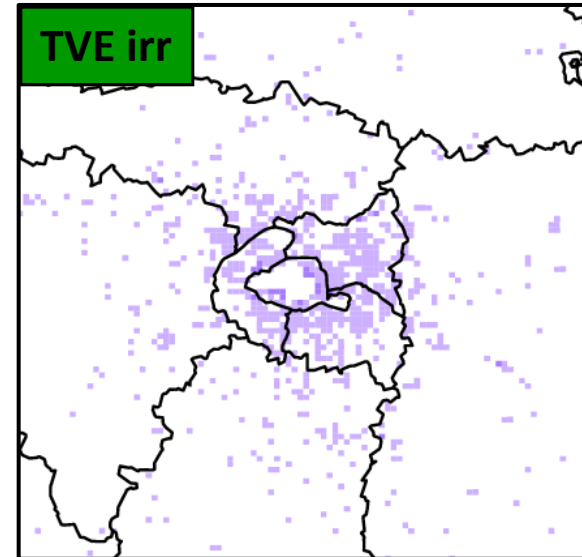
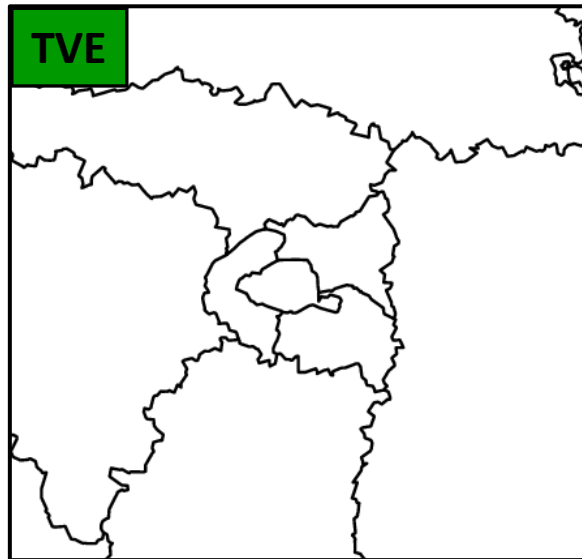
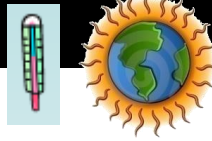
	Verdissement surfaces disponibles	Végétation urbaine
+	25 %	+ 11 %
++	50 %	+ 22 %
+++	75 %	+ 34 %

Densités de végétation urbaine au km² engendrées par le verdissement

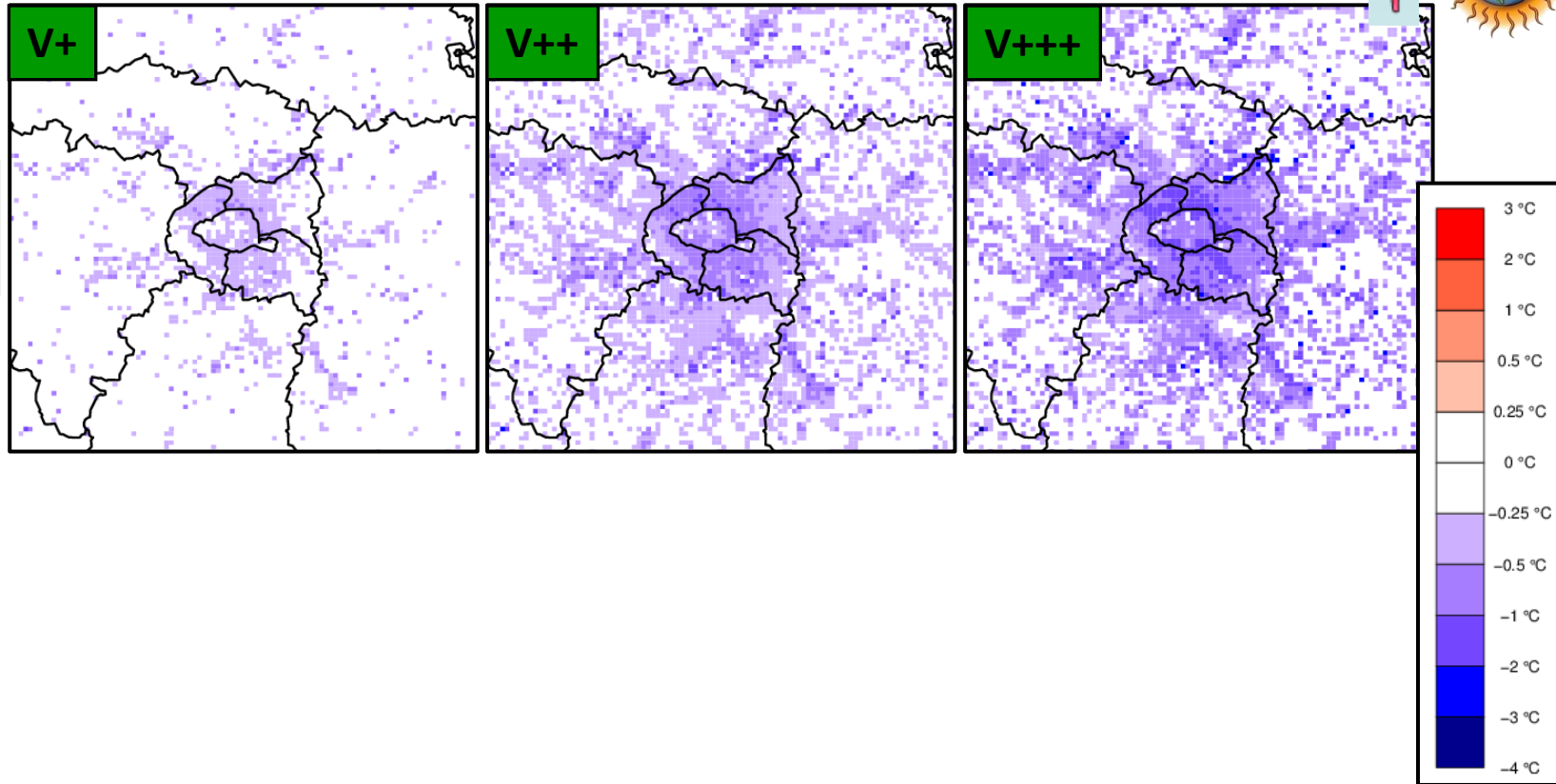


Densités de végétation urbaine au km² engendrées par le verdissement



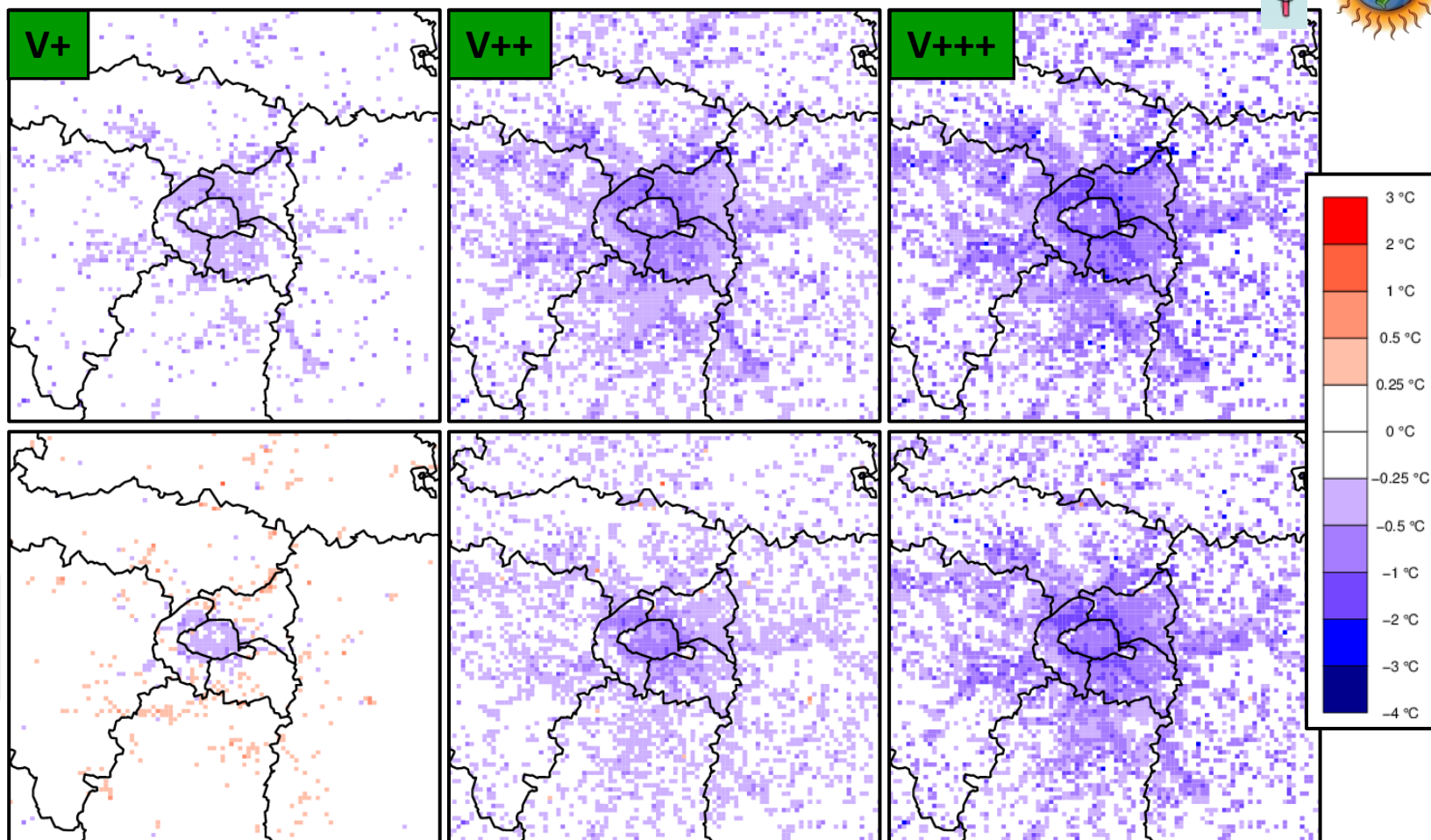
Impacts sur les températures des rues $\Rightarrow \Delta T_{MAX}$ 

- \Rightarrow les TVE n'ont aucun impact sur les températures des rues si elles ne sont pas arrosées
- \Rightarrow leur impact reste limité (de l'ordre de -0.25 / -0.5 °C)

Impacts sur les températures des rues $\Rightarrow \Delta T_{MAX}$ 

\Rightarrow le rafraîchissement est d'autant plus marqué que le taux de verdissement est élevé :
de l'ordre de - 0.25 à -2 °C

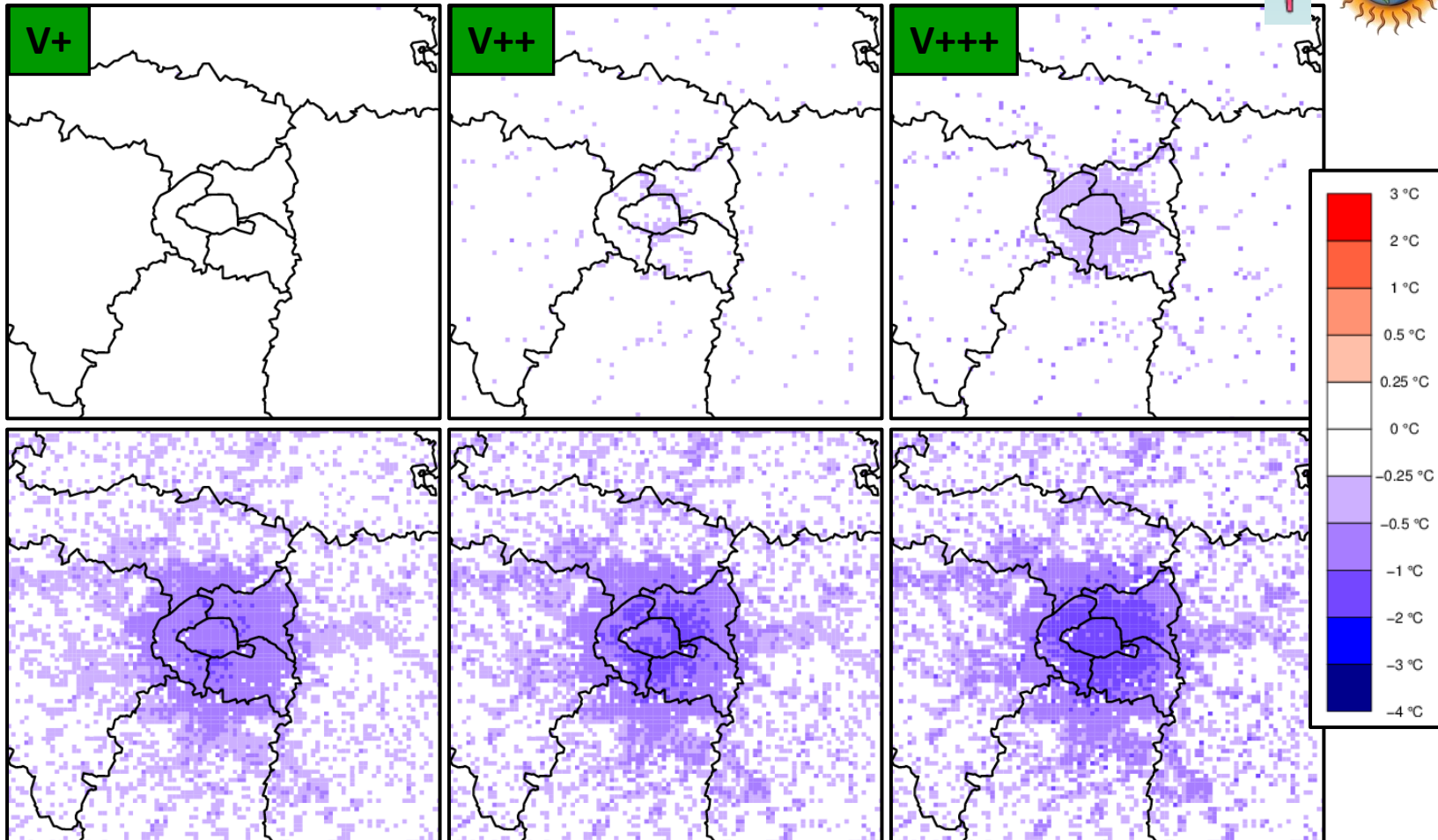
Impacts sur les températures des rues $\Rightarrow \Delta T_{MAX}$



\Rightarrow le rafraîchissement est d'autant plus marqué que le taux de verdissement est élevé :

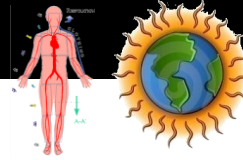
de l'ordre de - 0.25 à - 2 °C

\Rightarrow de jour, la végétation basse est sensiblement plus efficace que la végétation mixte arborée

Impacts sur les températures des rues $\Rightarrow \Delta T_{\text{MIN}}$ 

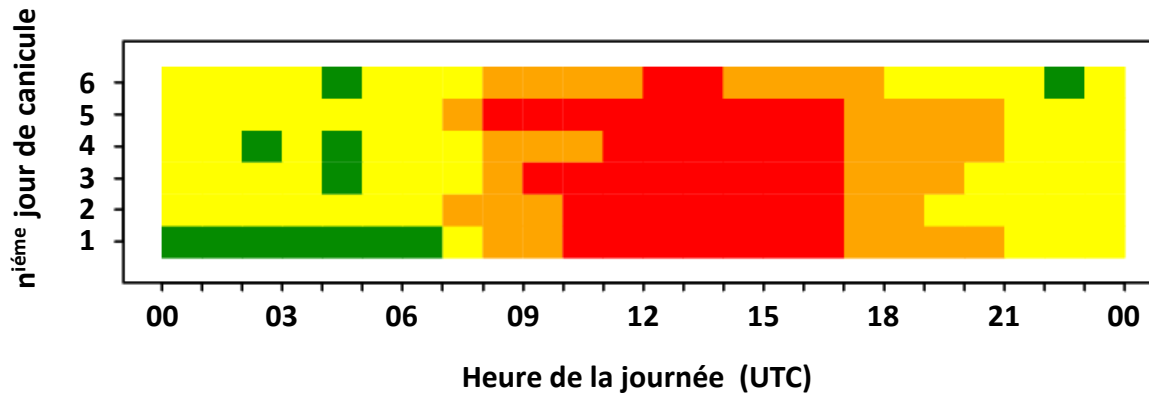
\Rightarrow de nuit, la végétation mixte arborée est nettement plus efficace que la végétation basse (arrosage)

Evolution du confort thermique extérieur au cours de la canicule



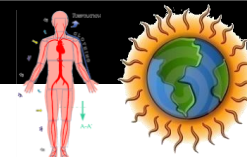
Individu à l'ombre
REF

Température ressentie



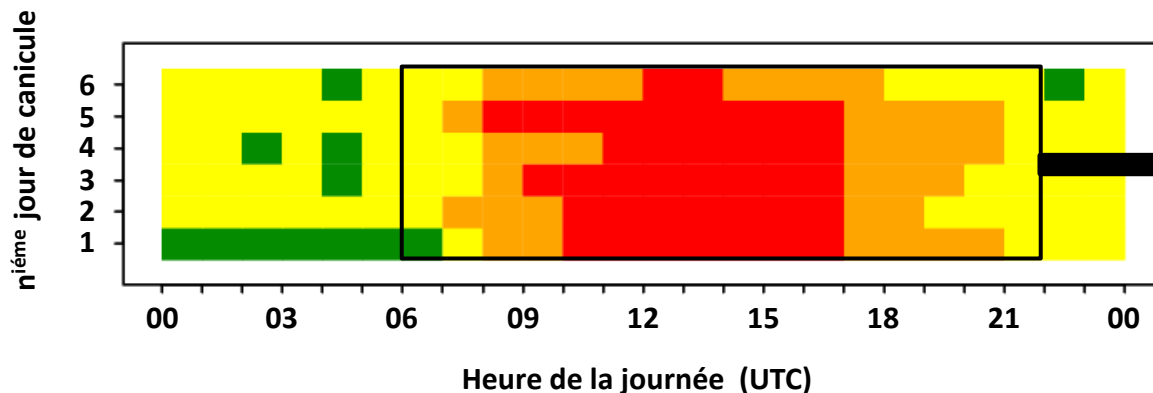
Echelle UTCI (°C)	Niveau de stress
au-dessus de + 46	Stress thermique extrême STEX
+ 38 à + 46	Stress thermique très élevé STTE
+ 32 à + 38	Stress thermique élevé STE
+ 26 à + 32	Stress thermique modéré STM
+ 9 à + 26	Pas de stress thermique PST

Evolution du confort thermique extérieur au cours de la canicule

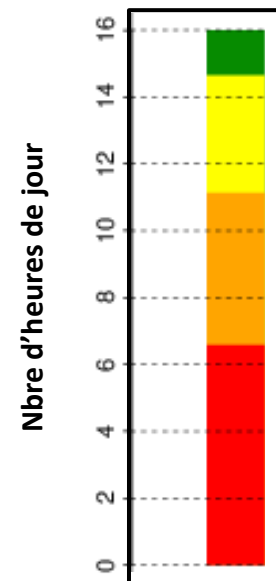


Individu à l'ombre
REF

Température ressentie



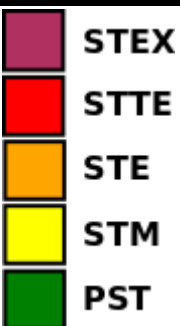
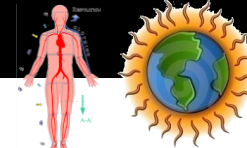
Intégration
temporelle
06 - 22 h



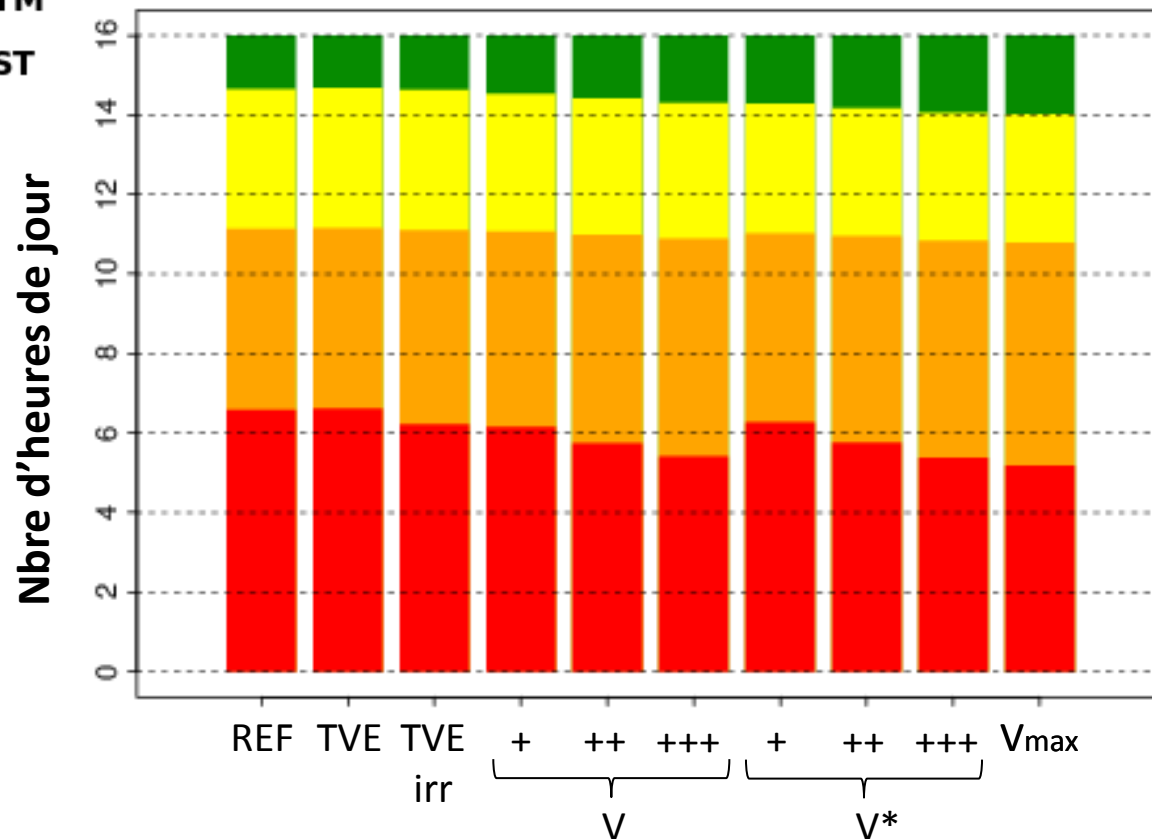
Echelle UTCI (°C)	Niveau de stress	
au-dessus de + 46	Stress thermique extrême	STEX
+ 38 à + 46	Stress thermique très élevé	STTE
+ 32 à + 38	Stress thermique élevé	STE
+ 26 à + 32	Stress thermique modéré	STM
+ 9 à + 26	Pas de stress thermique	PST

REF

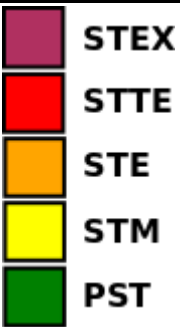
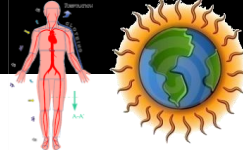
Impact du verdissage sur le confort thermique extérieur



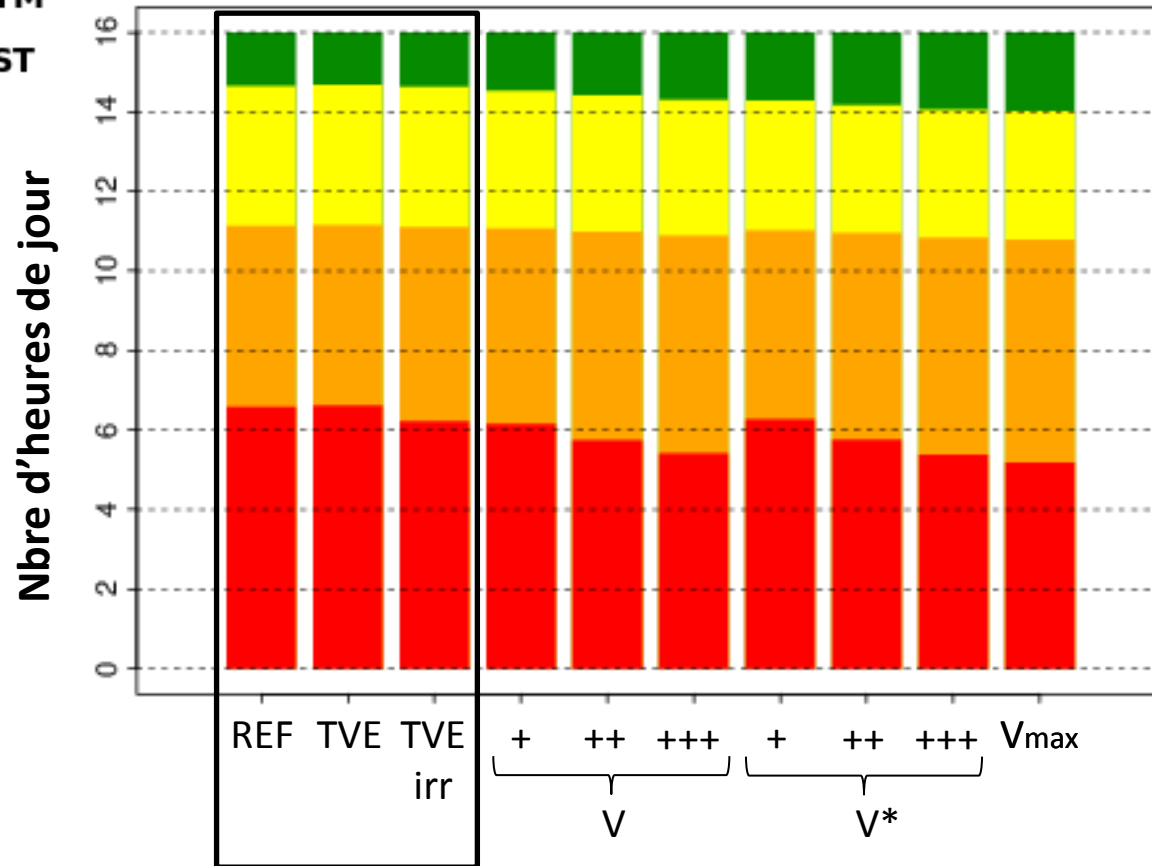
Tissu urbain Collectif – Individu à l'ombre



Impact du verdissement sur le confort thermique extérieur

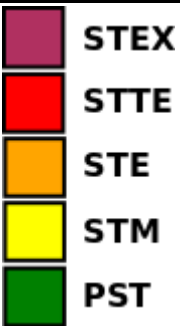
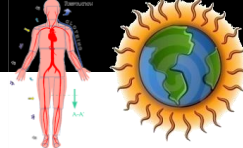


Tissu urbain Collectif – Individu à l'ombre

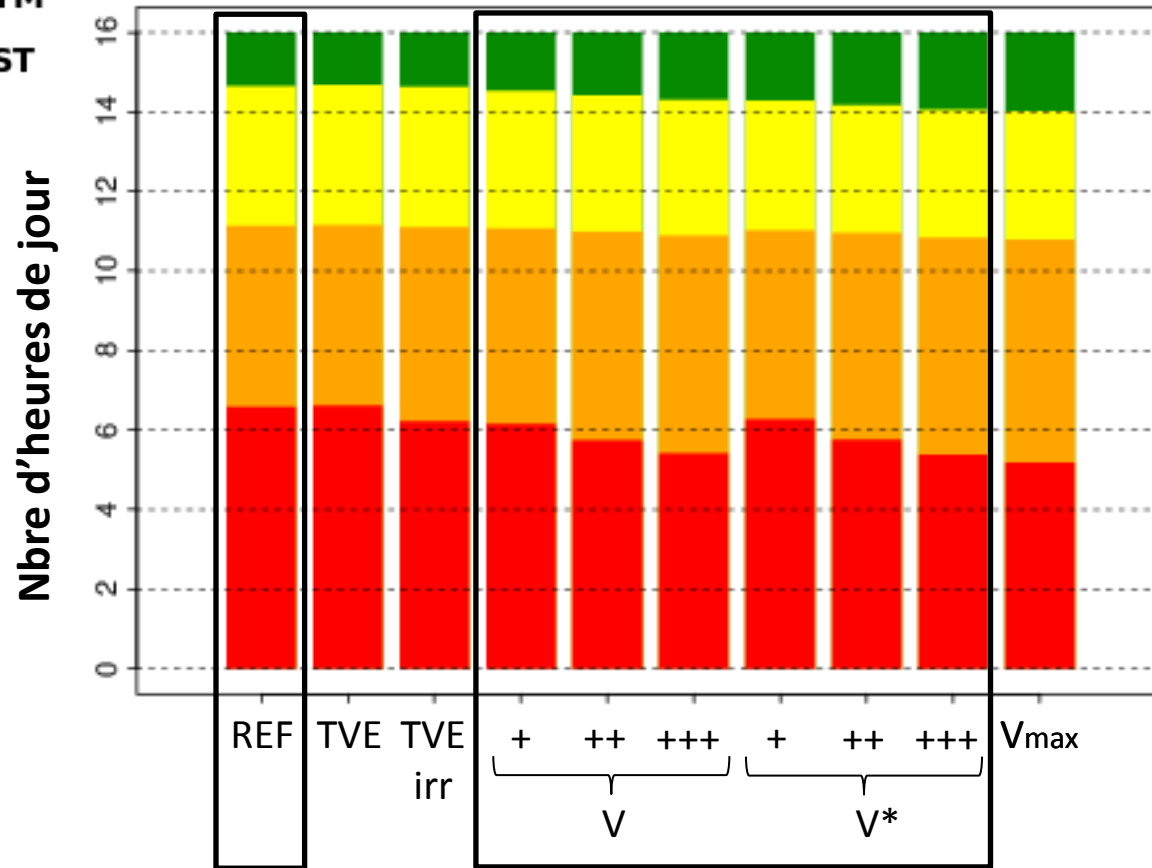


⇒ Les TVE ont un effet très limité sur le confort thermique extérieur

Impact du verdissement sur le confort thermique extérieur



Tissu urbain Collectif – Individu à l'ombre

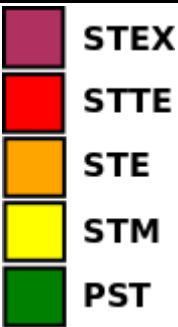
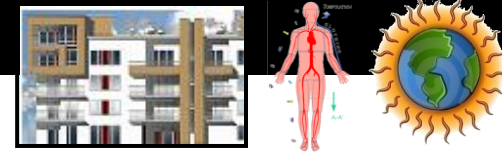


⇒ Les TVE ont un effet très limité sur le confort thermique extérieur

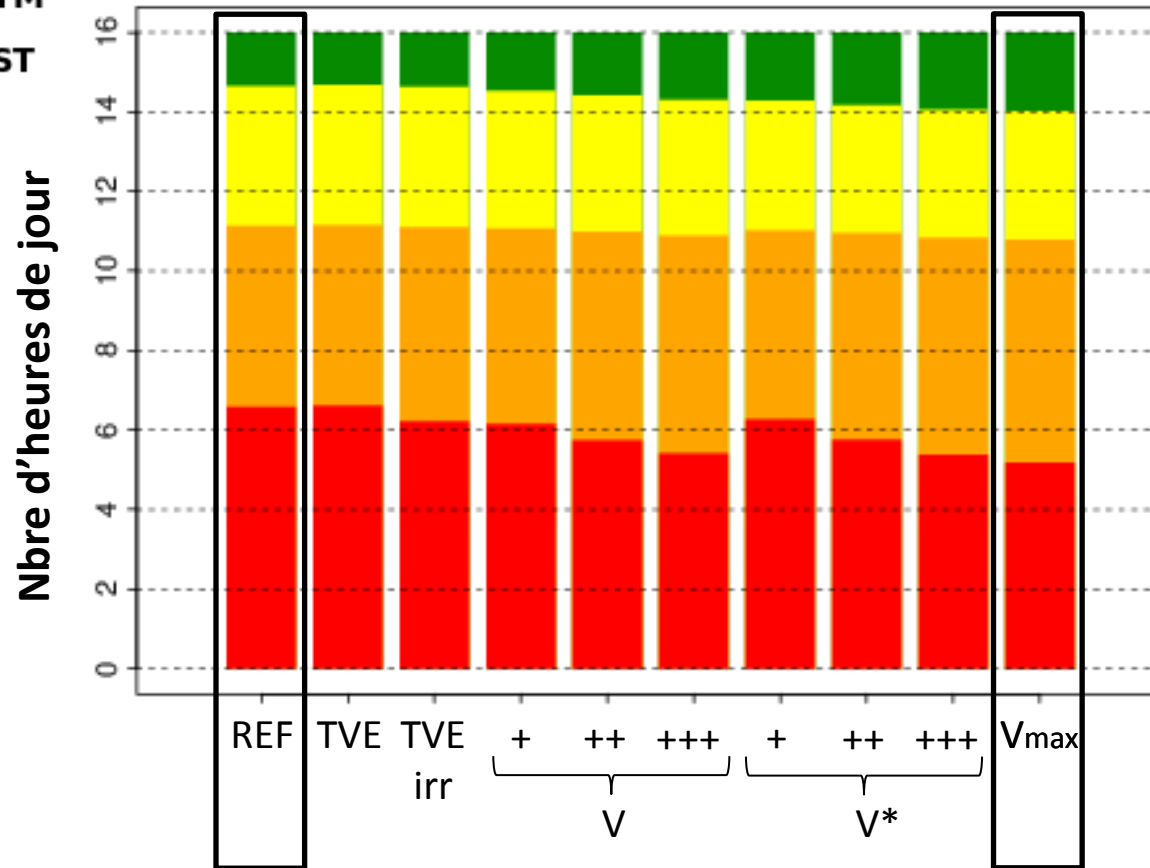
⇒ La végétation de pleine terre a un effet sur le confort thermique extérieur ...

⇒ ... effet d'autant plus marqué :
- que le taux de verdissement est élevé (gain 1h pour +++)
- en présence d'arbres

Impact du verdissement sur le confort thermique extérieur



Tissu urbain Collectif – Individu à l'ombre



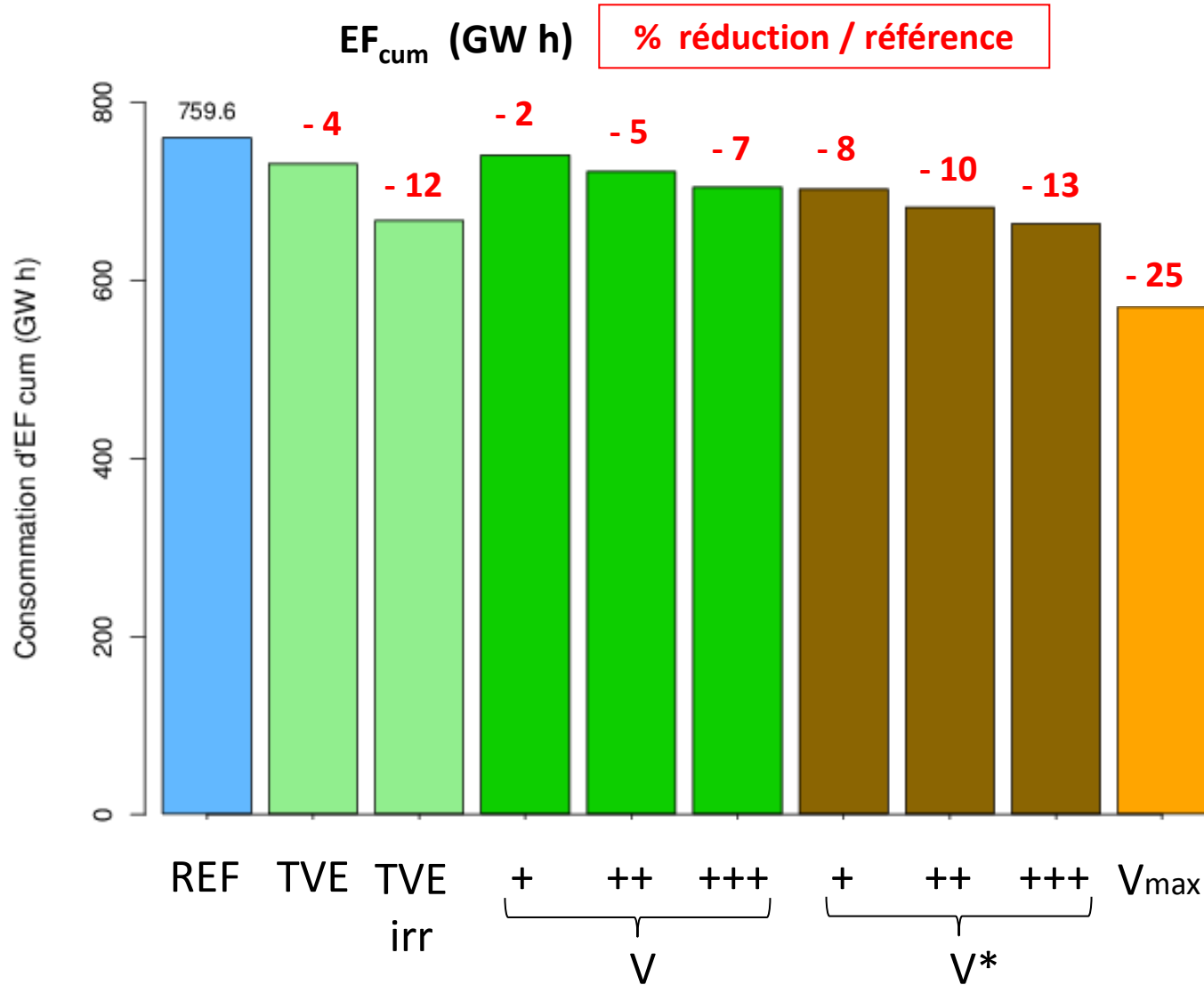
⇒ Les TVE ont un effet très limité sur le confort thermique extérieur

⇒ La végétation de pleine terre a un effet sur le confort thermique extérieur ...

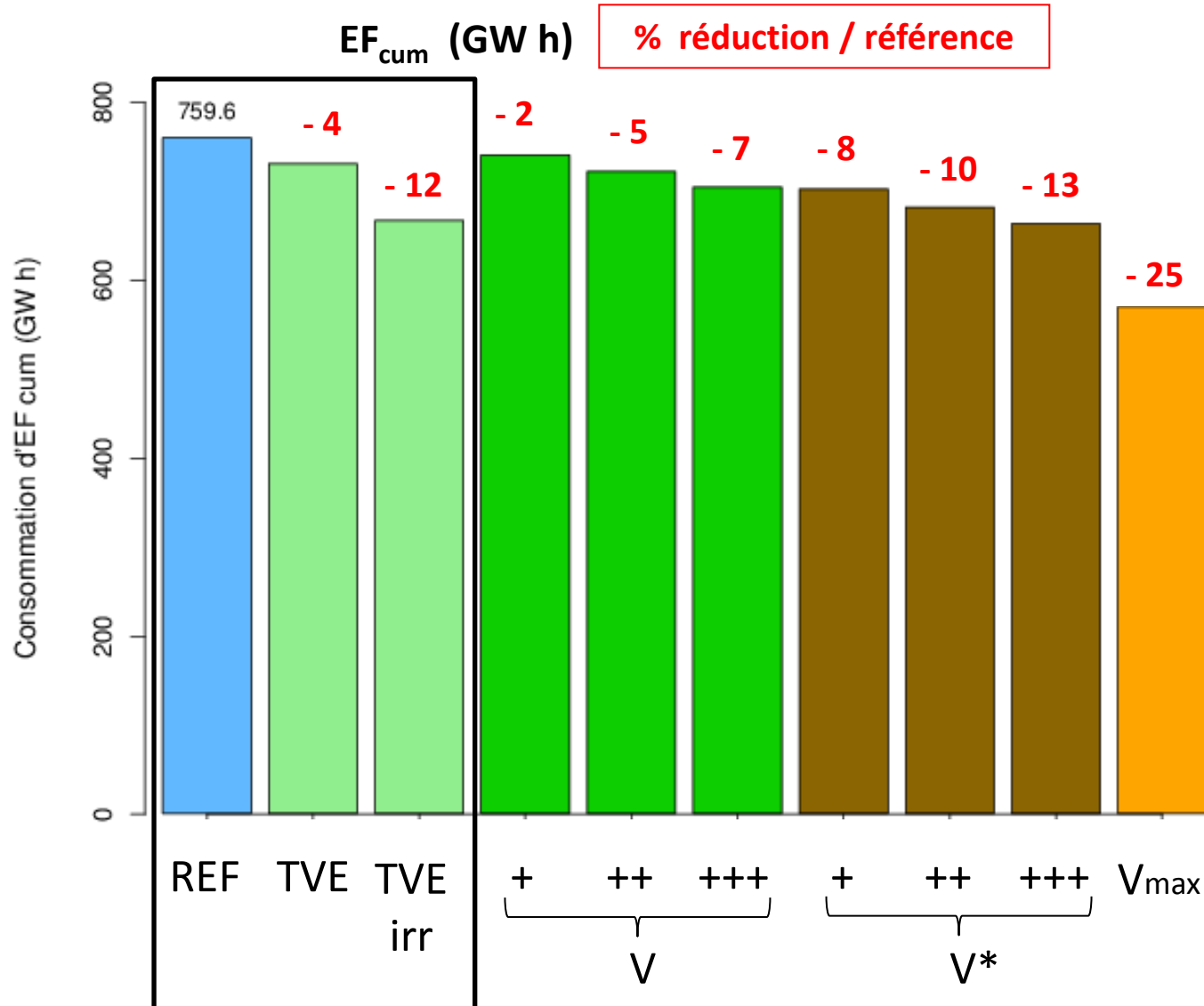
⇒ ... effet d'autant plus marqué :
- que le taux de verdissement est élevé (gain 1h pour +++)
- en présence d'arbres

⇒ Effet maximal pour V_{max}

Impact du verdissement sur la consommation d'énergie liée à la climatisation

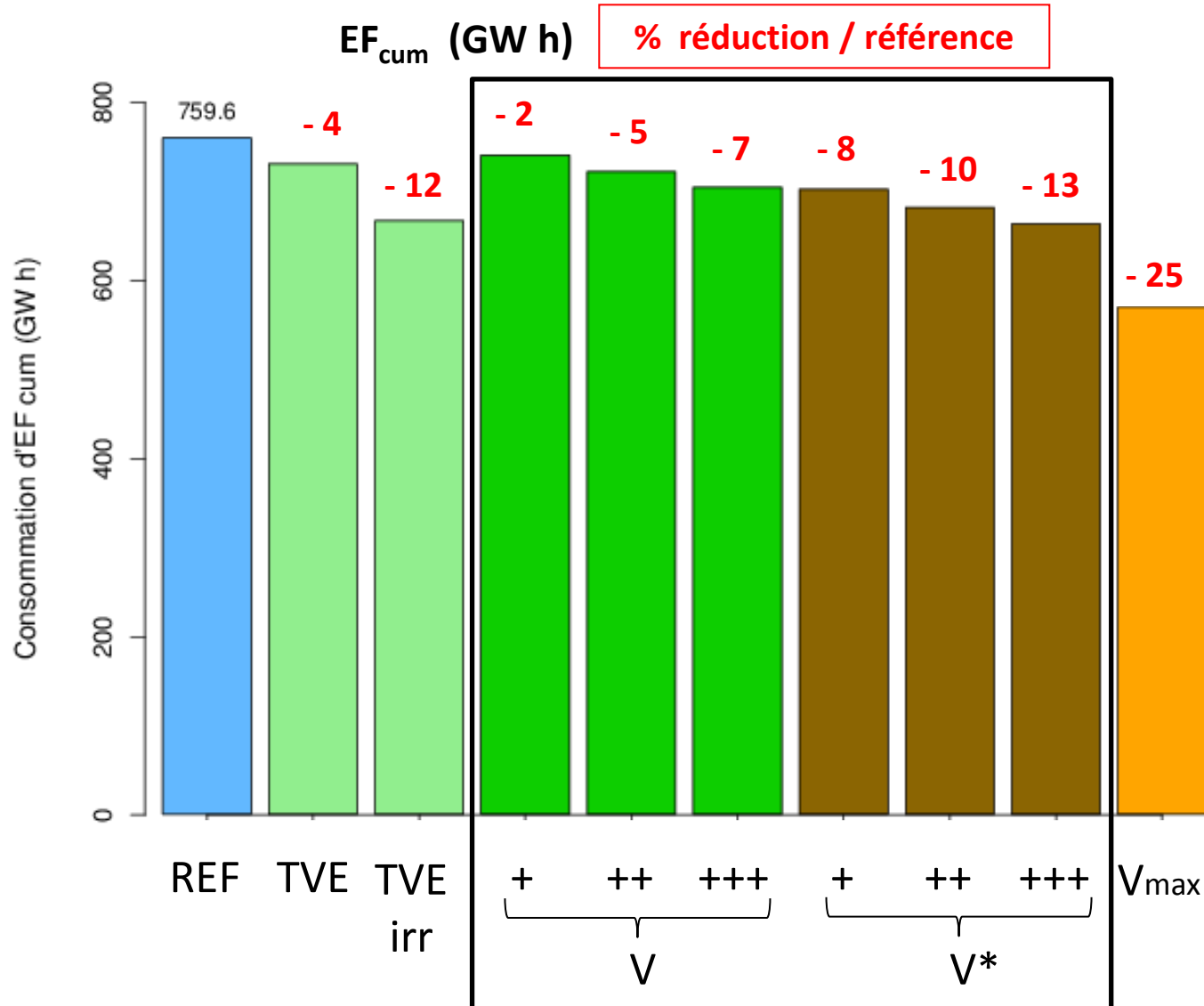


Impact du verdissement sur la consommation d'énergie liée à la climatisation



⇒ Les TVE sont performantes ssi elles sont irriguées

Impact du verdissement sur la consommation d'énergie liée à la climatisation

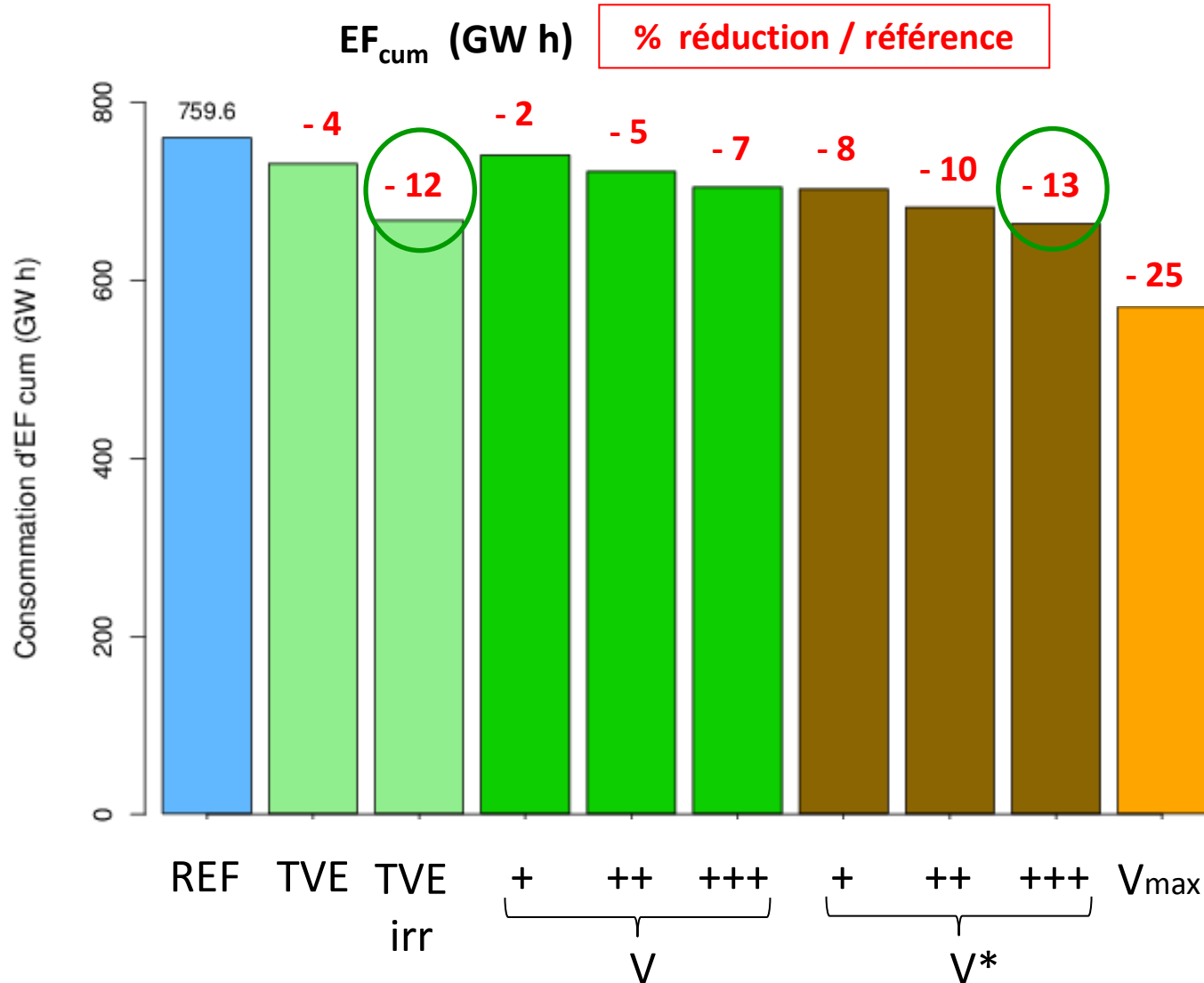


⇒ Les TVE sont performantes ssi elles sont irriguées

⇒ Plus le taux de verdissement au sol est élevé, plus la réduction d'énergie est importante

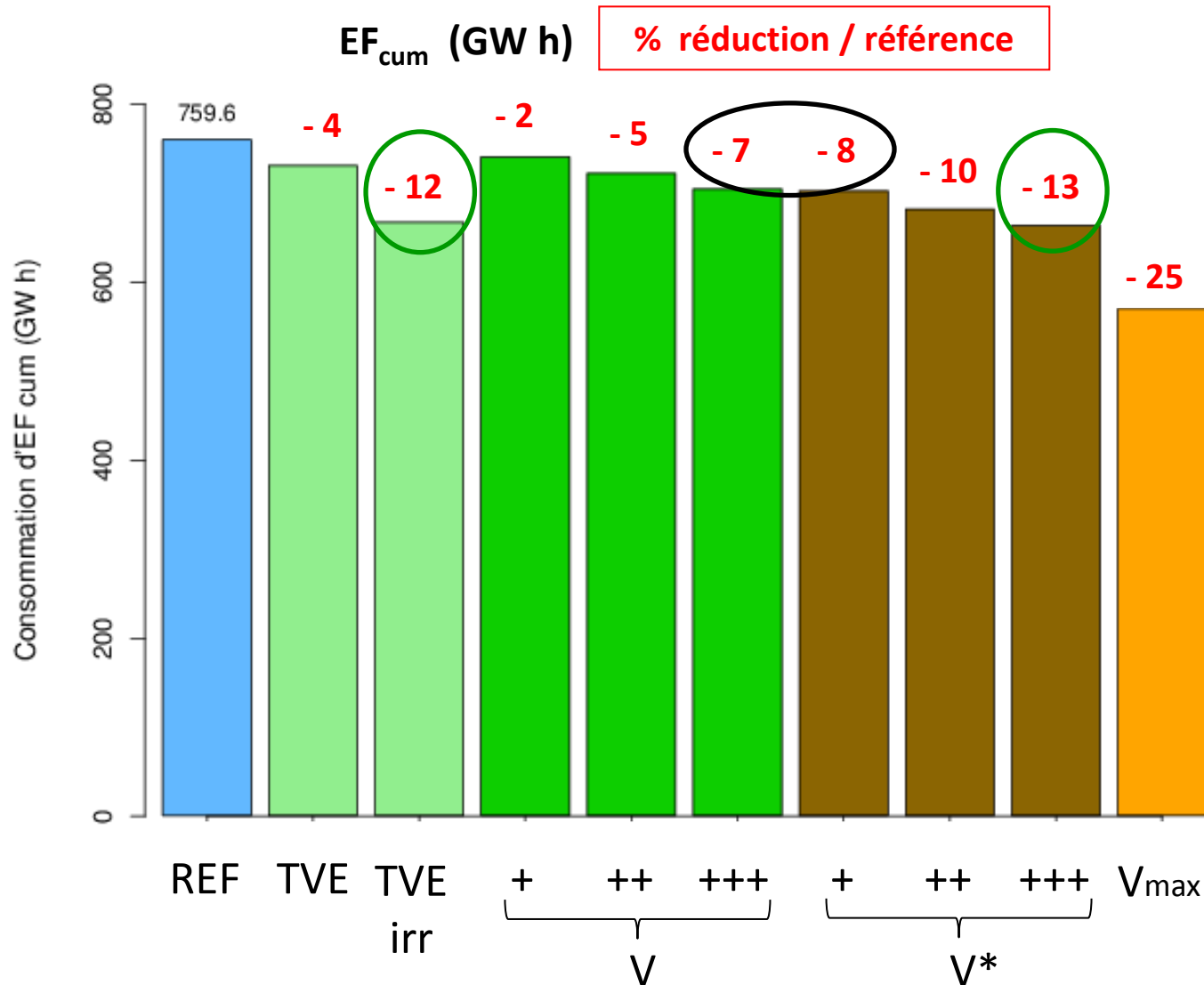
⇒ Réduction plus marquée avec une végétation mixte arborée

Impact du verdissement sur la consommation d'énergie liée à la climatisation



⇒ Les TVE irriguées sont aussi efficaces que le scénario le plus arboré

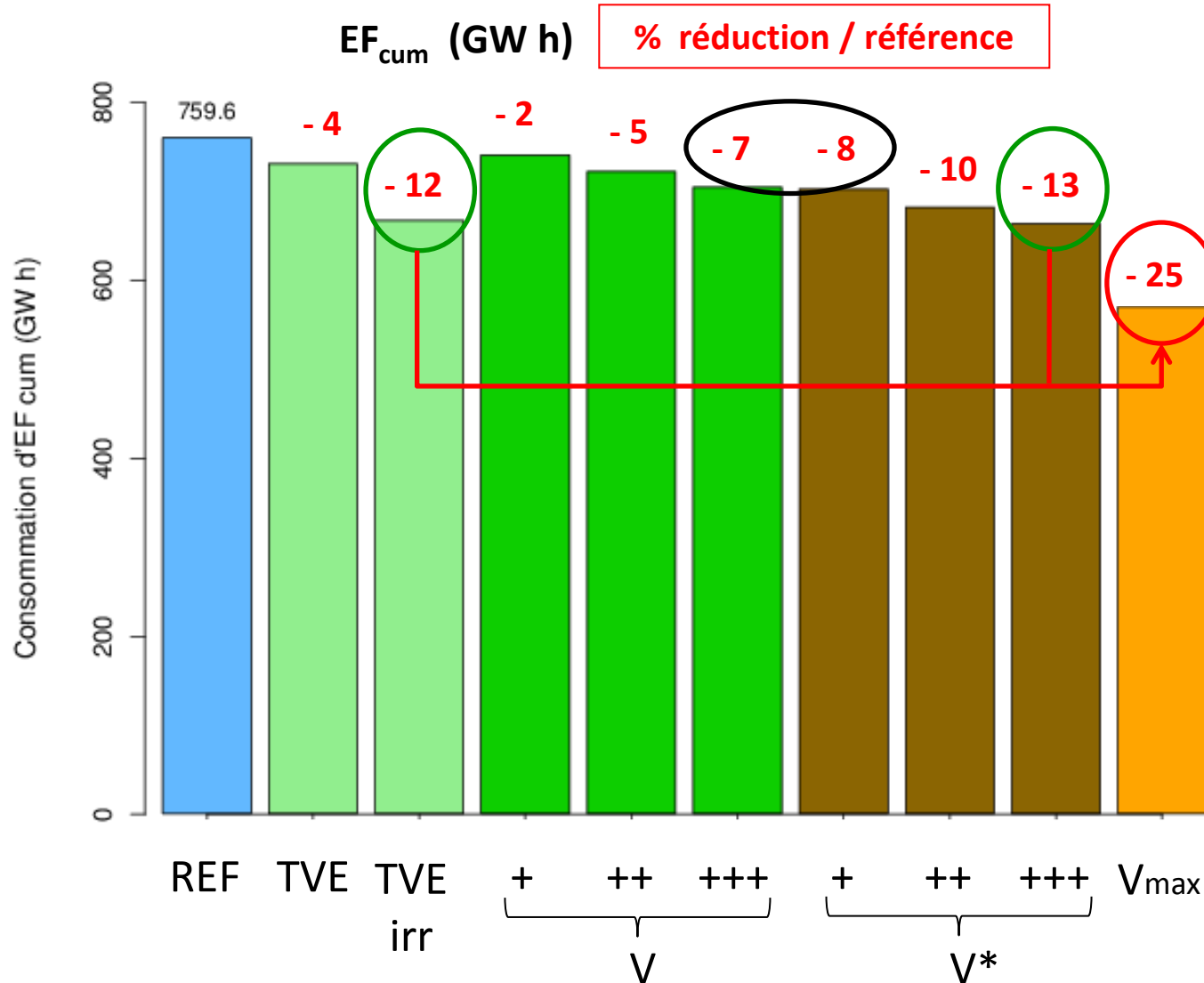
Impact du verdissement sur la consommation d'énergie liée à la climatisation



⇒ Les TVE irriguées sont aussi efficaces que le scénario le plus arboré

⇒ + 25% de végétation arborée permet une réduction d'énergie équivalente à + 75% de végétation basse

Impact du verdissement sur la consommation d'énergie liée à la climatisation

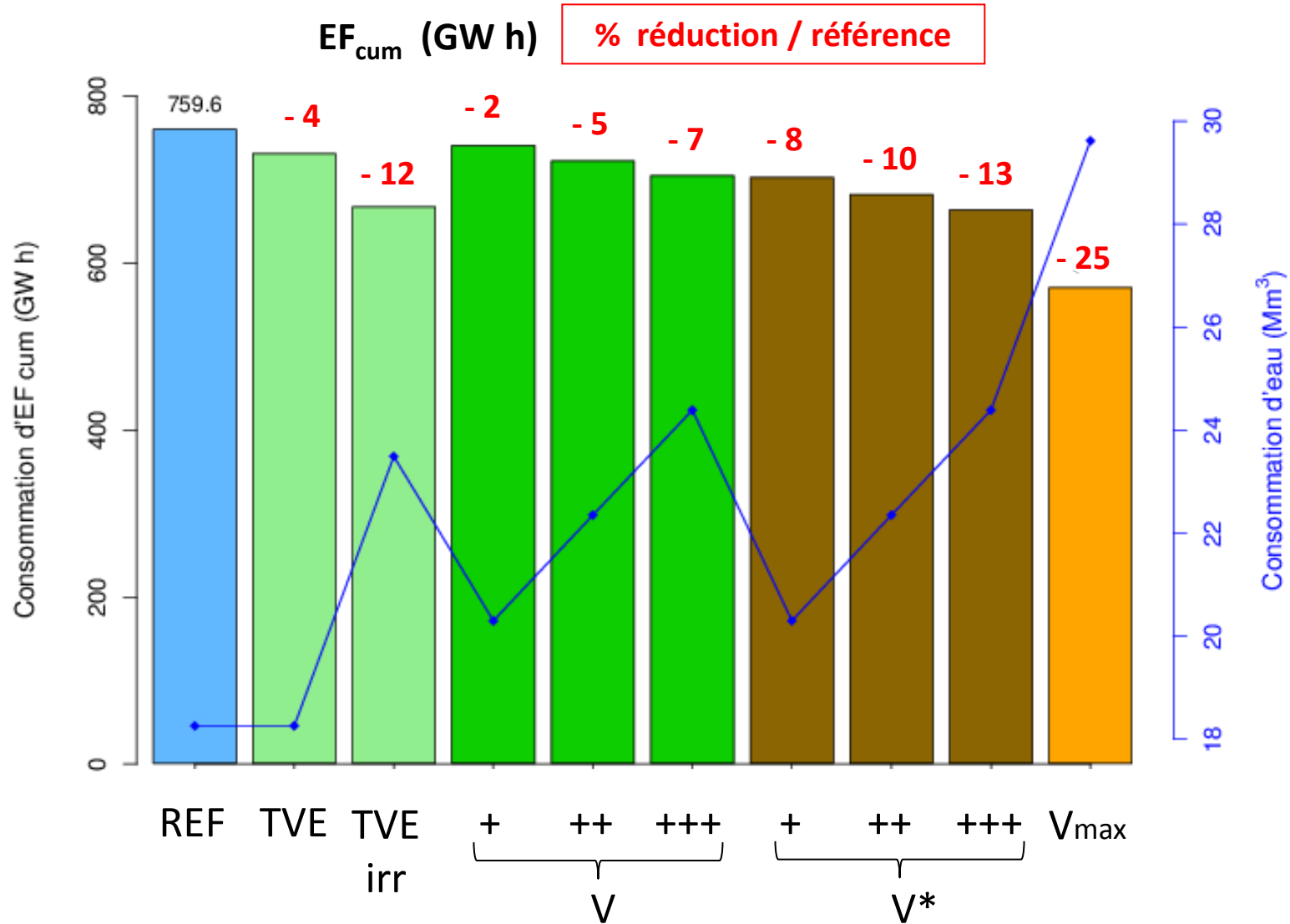


⇒ Les TVE irriguées sont aussi efficaces que le scénario le plus arboré

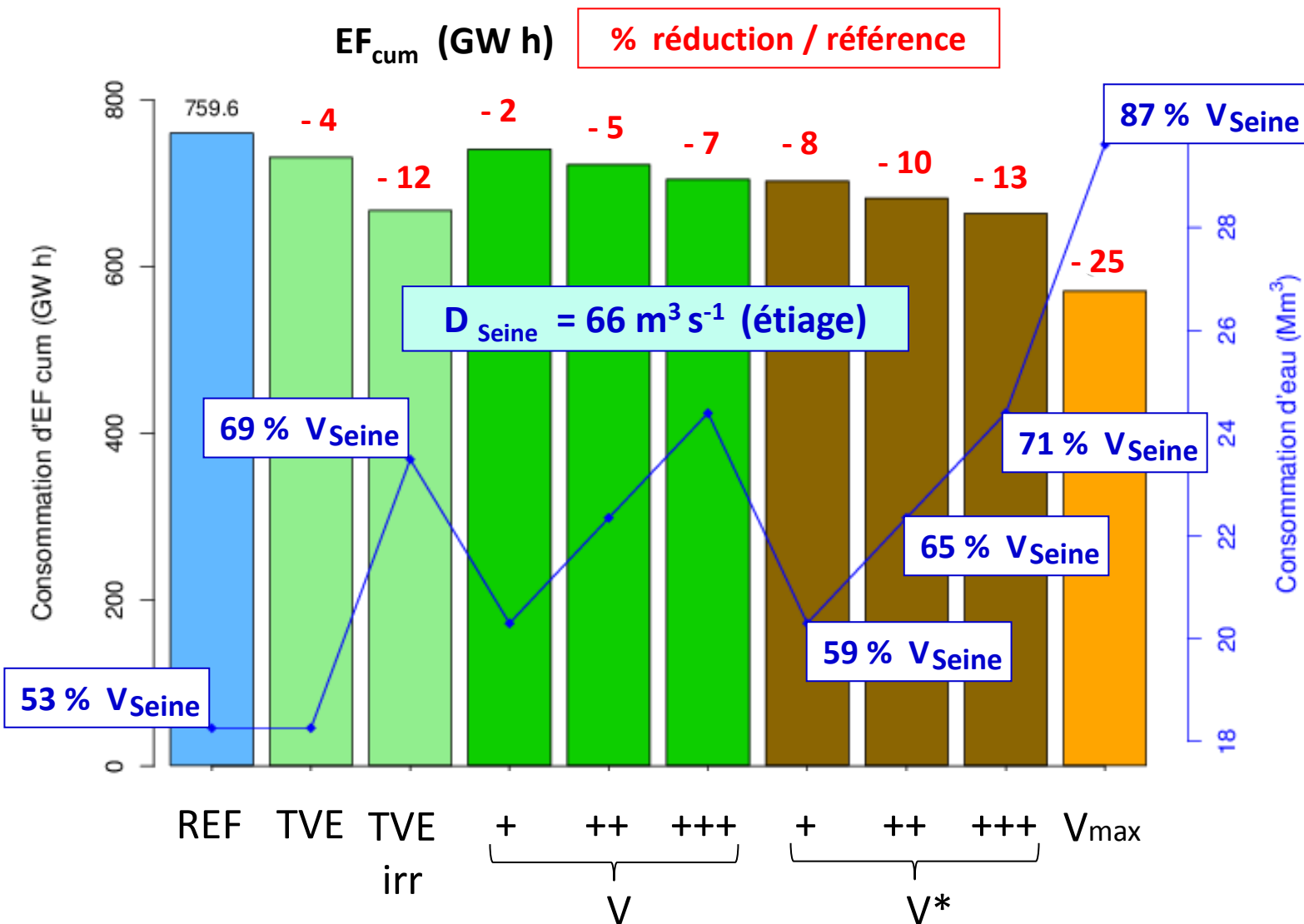
⇒ + 25% de végétation arborée permet une réduction d'énergie équivalente à + 75% de végétation basse

⇒ Effet cumulé pour la combinaison de végétation maximale

Conséquences du verdissement sur la consommation d'eau pour l'arrosage



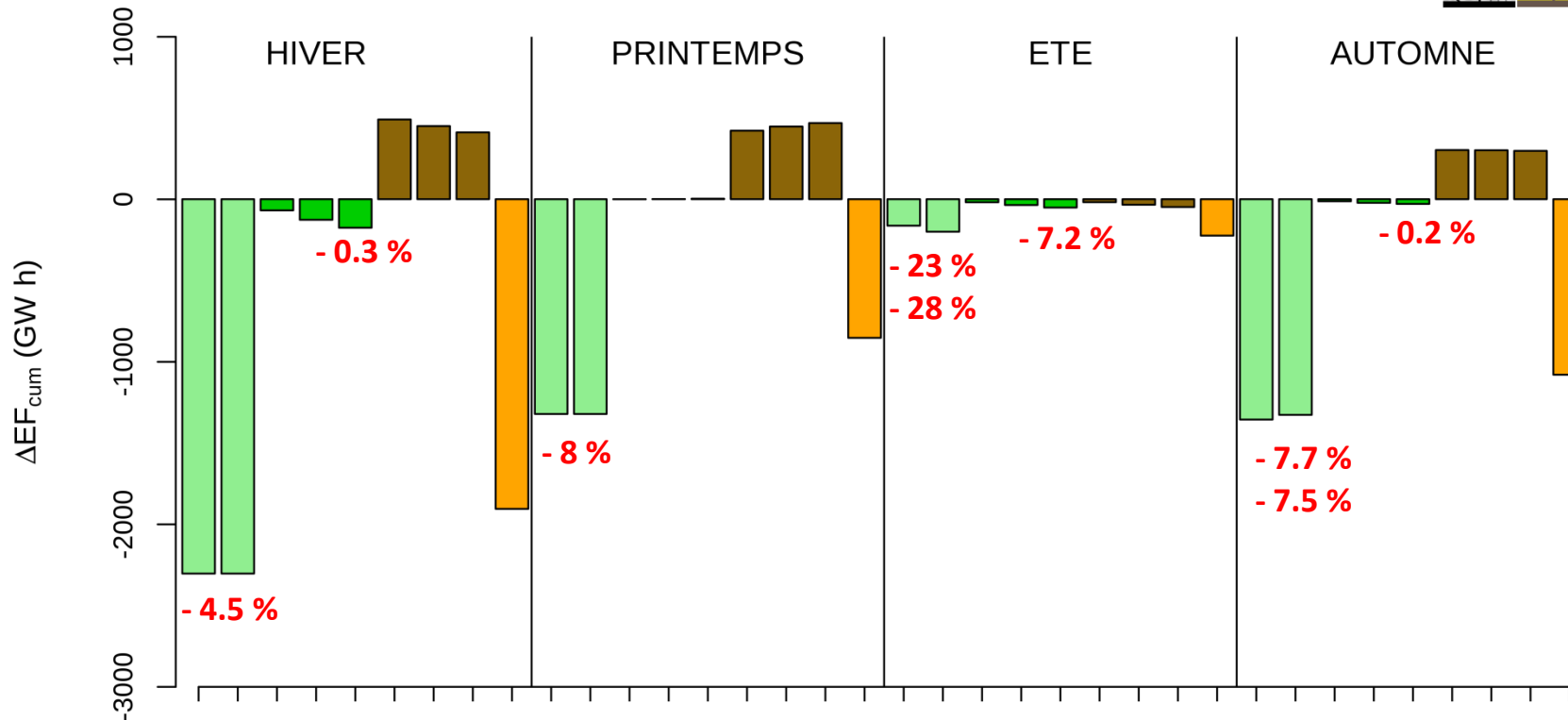
Conséquences du verdissement sur la consommation d'eau pour l'arrosage



Impact du verdissement sur la demande de climatisation & chauffage



ΔEF_{cum} (GW h) Basé sur 10 ans de simulation (1999-2008)



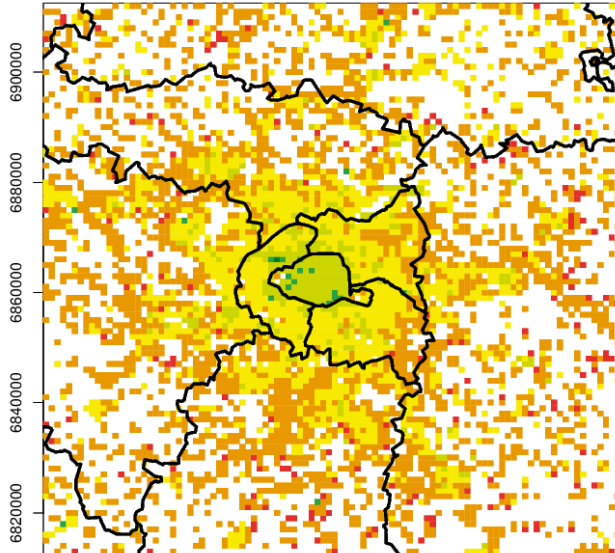
- ⇒ en été, toutes les stratégies diminuent la consommation d'énergie
- ⇒ TVE performantes toute l'année (pouvoir isolant)
- ⇒ la végétation arborée engendre une surconsommation d'énergie en dehors de l'été

Impact du verdissement sur la consommation d'énergie annuelle



EP_{cum} (kW h m⁻² de plancher)

REF



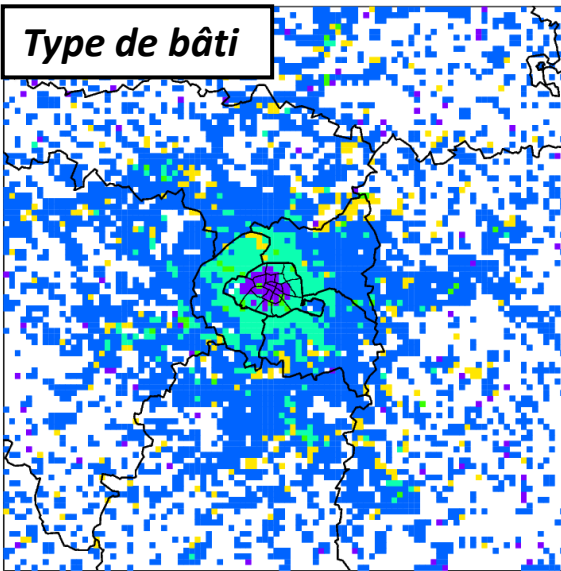
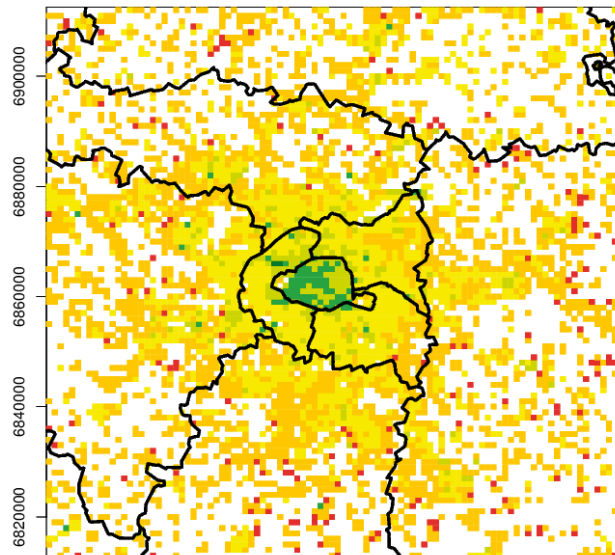
Logement économe



Logement énergivore

TVE

TVE irr



Impacts sur la gestion de la ressource en eau



⇒ volumes comparés d'arrosage estival
& du ruissellement de surface annuel



(M m ³)	Reference	TVE	TVE irr	VEG +	VEG ++	VEG +++
Arrosage estival	282	282	362	314	346	378

Impacts sur la gestion de la ressource en eau



⇒ volumes comparés d'arrosage estival
& du ruissellement de surface annuel



(M m ³)	Reference	TVE	TVE irr	VEG +	VEG ++	VEG +++
Arrosage estival	282	282	362	314	346	378
Ruissellement	426	370	410	379	332	286

Impacts sur la gestion de la ressource en eau



⇒ volumes comparés d'arrosage estival
& du ruissellement de surface



(M m ³)	Reference	TVE	TVE irr	VEG +	VEG ++	VEG +++
Arrosage estival	282	282	362	314	346	378
Ruissellement	426	370	410	379	332	286
Arrosage compensé par ruissellement ?	✓	✓	✓	✓	✗	✗

1 – Contexte

- ◆ Micro-climat urbain
- ◆ Ville et changement climatique
- ◆ Stratégies d'adaptation : climatisation et verdissement
- ◆ Outils de modélisation utilisés au GAME : SURFEX et TEB
- ◆ Projets de recherche et domaine d'étude

2 – Adaptation par la climatisation

- ◆ Impacts de la climatisation sur le micro-climat extérieur (Paris)

3 – Adaptation par la végétation

- ◆ Modélisation des toitures végétalisées dans TEB
- ◆ Paramétrisation de l'arrosage estival
- ◆ Impacts de différents scénarios de verdissement en contexte de canicule (Paris)
- ◆ Conséquences du verdissement à l'échelle saisonnière

4 – Conclusions et perspectives

Améliorer la description de la végétation urbaine dans TEB

→ Paramétrisation des TVE

- Représentation d'un nouveau dispositif végétal dans TEB : TVE
- Simuler l'impact du climat extérieur sur les TVE et inversement celui des TVE sur le climat
- Simuler les performances thermiques, énergétiques et hydrologiques des TVE

de Munck et al. The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB.
Geoscientific Model Development (sous presse)

→ Paramétrisation de l'arrosage estival de la végétation

- Prise en compte des pratiques d'arrosage liées aux différentes stratégies de verdissement
- Evaluer les ressources en eau associées au verdissement

Évaluer l'impact de la climatisation

Évaluer l'impact du verdissement

→ Confort thermique extérieur

- La **climatisation** des bâtiments dégrade le climat extérieur de + 0.25 à + 2 °C

de Munck et al. (2013) How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France ? *International Journal of Climatology*

- Le **verdissement** permet de limiter /compenser cet effet en rafraîchissant les températures des rues de - 0.5 à - 2 °C
 - Ce rafraîchissement est d'autant + marqué que :
 - le verdissement est réalisé au sol
 - la proportion d'arbres est élevée
 - le taux de verdissement est élevé
 - Les TVEs sont peu efficaces pour améliorer le confort extérieur

Évaluer l'impact de la climatisation

Évaluer l'impact du verdissement

→ Consommation énergétique

- La **climatisation** des bâtiments engendre une surconsommation d'énergie ...
- ... que le **verdissement** de la ville permet de réduire et qui s'explique :
 - pour la végétation de pleine terre : par le rafraîchissement de la température des rues
 - pour les TVE : principalement par leur pouvoir isolant




- Les TVE sont plus efficaces que la végétation de pleine terre :

⇒ can. 2003 - 12 %

⇒ été - 28 %

⇒ année - 7 %



-  la végétation arborée engendre une surconsommation de chauffage (qui risque d'être encore plus marquée en prenant en compte les effets d'ombrage)

→ Gestion de l'eau

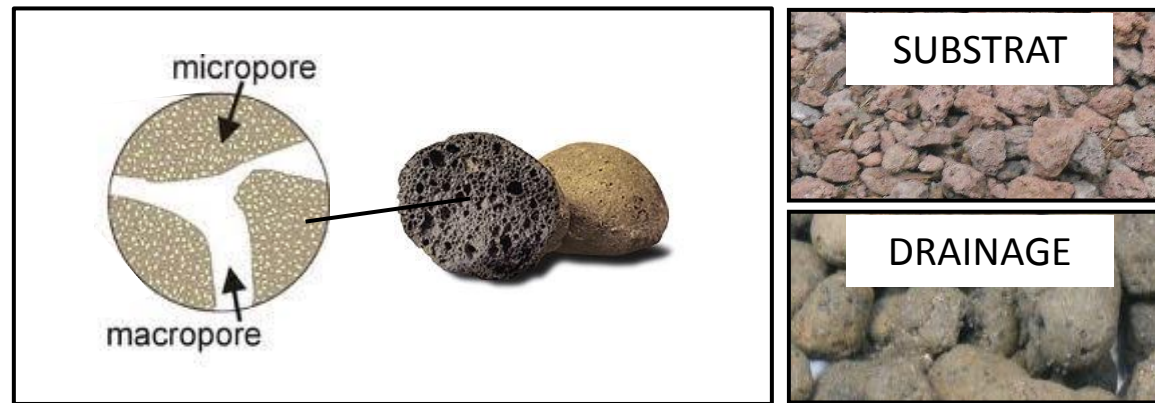


- la végétation permet de diminuer les volumes d'eau ruisselés en surface en ville
- les TVE permettent de réduire ce ruissellement de 10 % sur une année
- les volumes d'eau pour l'arrosage de la végétation en été pourraient être totalement ou en grande partie fournis par la collecte et le stockage du ruissellement urbain annuel

Améliorer
la description
de la végétation
urbaine
dans TEB

- améliorer la paramétrisation des TVE

- ⇒ évaluer GREENROOF sous des climats différents et pour des TVE différentes
- ⇒ tester l'intérêt d'un **modèle à double porosité** pour une meilleure simulation des transferts hydriques et donc du potentiel de rétention des TVE



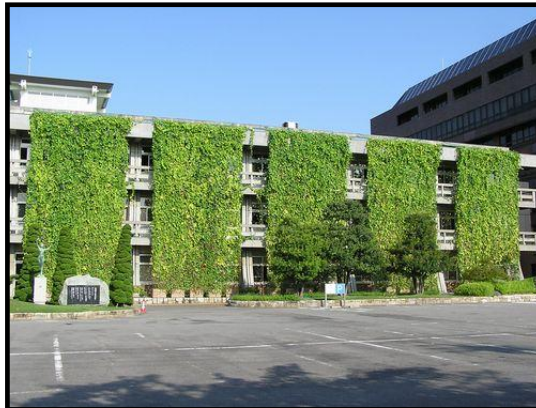
Améliorer
la description
de la végétation
urbaine
dans TEB

- améliorer la paramétrisation des TVE
 - prendre en compte les effets d'ombrage des arbres
- ⇒ littérature : modèle de *Lee and Park (2008)* : canyon arboré
- ⇒ volet expérimental "Jardin" réalisé dans le cadre de VegDUD (FLUXSAP2012)



Améliorer
la description
de la végétation
urbaine
dans TEB

- améliorer la paramétrisation des TVE
- prendre en compte les effets d'ombrage des arbres
- implémenter d'autres dispositifs végétaux



Améliorer
la description
de la végétation
urbaine
dans TEB

- améliorer la paramétrisation des TVE
 - prendre en compte les effets d'ombrage des arbres
 - implémenter d'autres dispositifs végétaux
 - **évaluer des stratégies d'arrosage alternatives**
- ⇒ horaires, volumes, dispositifs d'arrosage
- ⇒ ... vers une gestion *plus intelligente* de l'eau

Améliorer
la description
de la végétation
urbaine
dans TEB

- améliorer la paramétrisation des TVE
- prendre en compte les effets d'ombrage des arbres
- implémenter d'autres dispositifs végétaux
- évaluer des stratégies d'arrosage alternatives

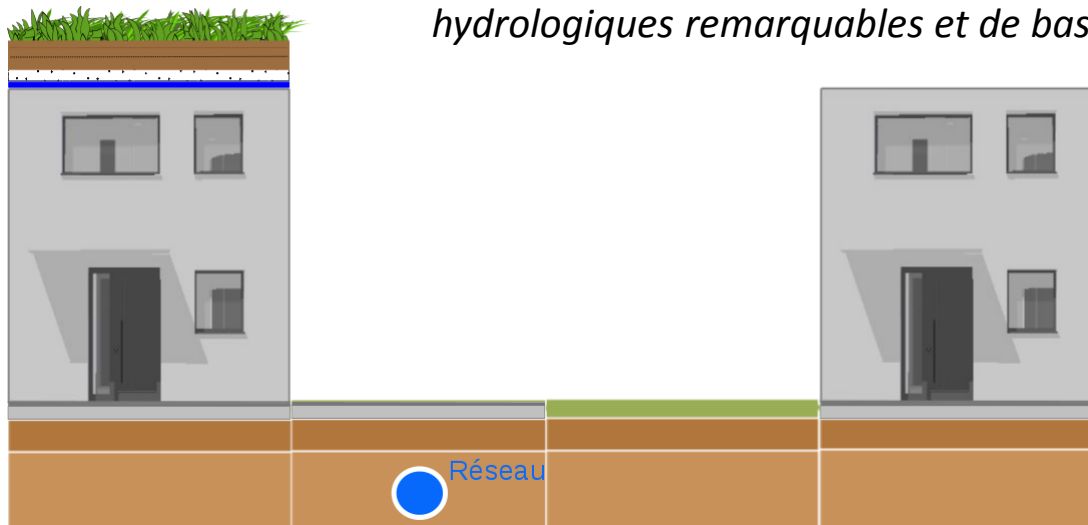
Recherche

- **TEB-HYDRO : sous-sol et hydrologie urbaine**

Collaboration
IFSTAR/CNRM-GAME

⇒ étude des stratégies alliant végétation urbaine et gestion durable de l'eau

Ex : étude du potentiel de rétention des TVE à l'échelle d'évènements hydrologiques remarquables et de bassins versants urbains



Améliorer
la description
de la végétation
urbaine
dans TEB

- améliorer la paramétrisation des TVE
- prendre en compte les effets d'ombrage des arbres
- implémenter d'autres dispositifs végétaux
- évaluer des stratégies d'arrosage alternatives

Recherche

- **TEB-HYDRO : sous-sol et hydrologie urbaine**
- **... vers un bilan carbone des villes**



- ⇒ sources liées aux consommations des bâtiments et au trafic routier
- ⇒ puits liés à la présence de végétation (**ISBA-Ags**)

Merci de votre
attention

*Thank you for
your attention*



*Ce travail de recherche a été financé par trois projets de recherche:
CLIM2 (partenariat Météo France/Climespace), VegDUD (ANR-09-VILLE-007) et MUSCADE (ANR-09-VILLE-003).*