

# Impacts énergétiques et climatiques de la végétation en ville



AAU crenau  
ambiances  
architectures  
urbanités



iIRSTV

ensanantes  
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE

Marjorie Musy

- Ville et densité : les enjeux
- Notions de microclimat, d'îlot de chaleur urbain - Phénomènes physiques en jeu
- Analyse des impacts énergétiques et climatiques de « dispositifs végétaux » urbains
- Conclusions, perspectives

# Ville et densité : les enjeux

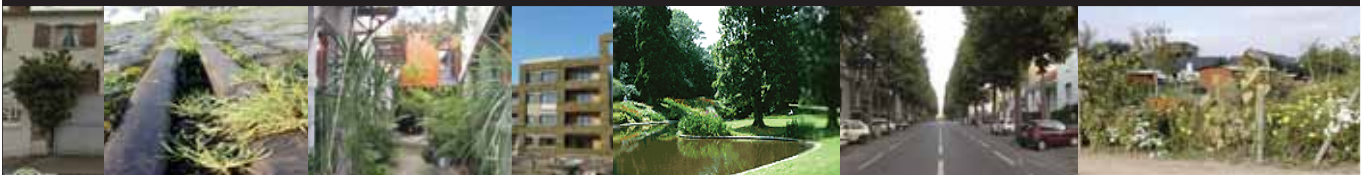
## Des enjeux auxquels il faut faire face en ville

- Changement climatique,
  - Atténuation : réduire les émissions de GES
  - Adaptation : trouver des solutions pour rendre les impacts du changement climatique supportables
- Densification
  - Une population d'urbains en forte croissance
  - Eviter l'étalement urbain
- Des évolutions dans place de la nature en ville
  - Demande sociale d'une ville plus verte
  - Evolution de la pratique des espaces verts (espaces de culture, d'agriculture, de sport...)
  - Evolution des pratiques de conception et d'entretien

Le végétal en ville pourrait être vu comme une composante majeure de la ville durable

# Questions opérationnelles et scientifiques autour des services écosystémiques de la végétation en ville

Comment...  
Est-ce que...  
Mais...



## Nantes, GPV Malakoff - Pré-Gauchet (2004)

*Nantes Métropole : « Comme on utilise les cœurs d'îlot pour le parking, pour l'infiltration de l'eau, on va imposer des toitures végétales. C'est bien aussi pour le climat ??? »*



## Lyon Confluence (2009)

*Paysagiste chargé de l'îlot K : « A partir de combien d'arbres il y a un effet sur l'îlot de chaleur urbain ??? »*



## Agenda 21 Nantes Métropole (2006)

*« Rendre compréhensible et acceptable par tous la densification urbaine »*

*« Anticiper les effets du changement climatique »*





## Questions – remarques du SEVE Nantes (2009)

« Des espaces verts de pleine terre ou sur des parkings souterrains, c'est pas pareil ! »

« Est-ce que l'impact du jardin des plantes compense celui du cimetière complètement minéral »

« On a des problèmes avec les panneaux photovoltaïques, on nous demande de couper les arbres ! »



AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE  
**ANR**

ANR Villes  
durables 2009

**iIRSTV** / FR CNRS 2488  
Institut de Recherche  
en Sciences et Techniques de la Ville

LES PÔLES DE  
COMPÉTITIVITÉ



Projet de recherche

# VegDUD

## Rôle du végétal dans le développement urbain durable

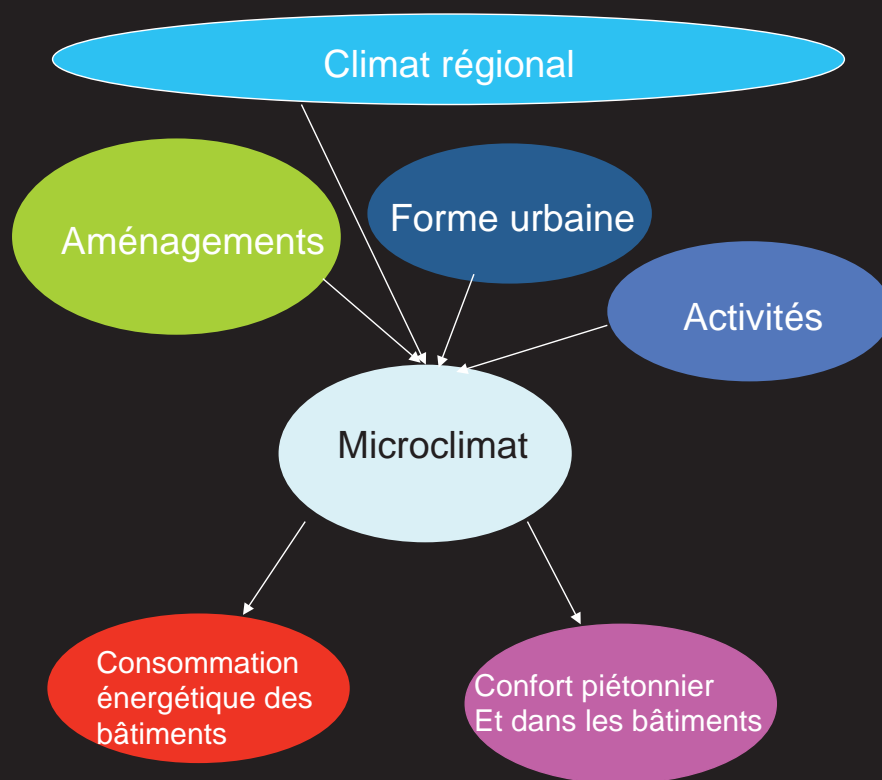


Les partenaires du projet :



Notions de microclimat, d'îlot de chaleur urbain  
Phénomènes physiques en jeu

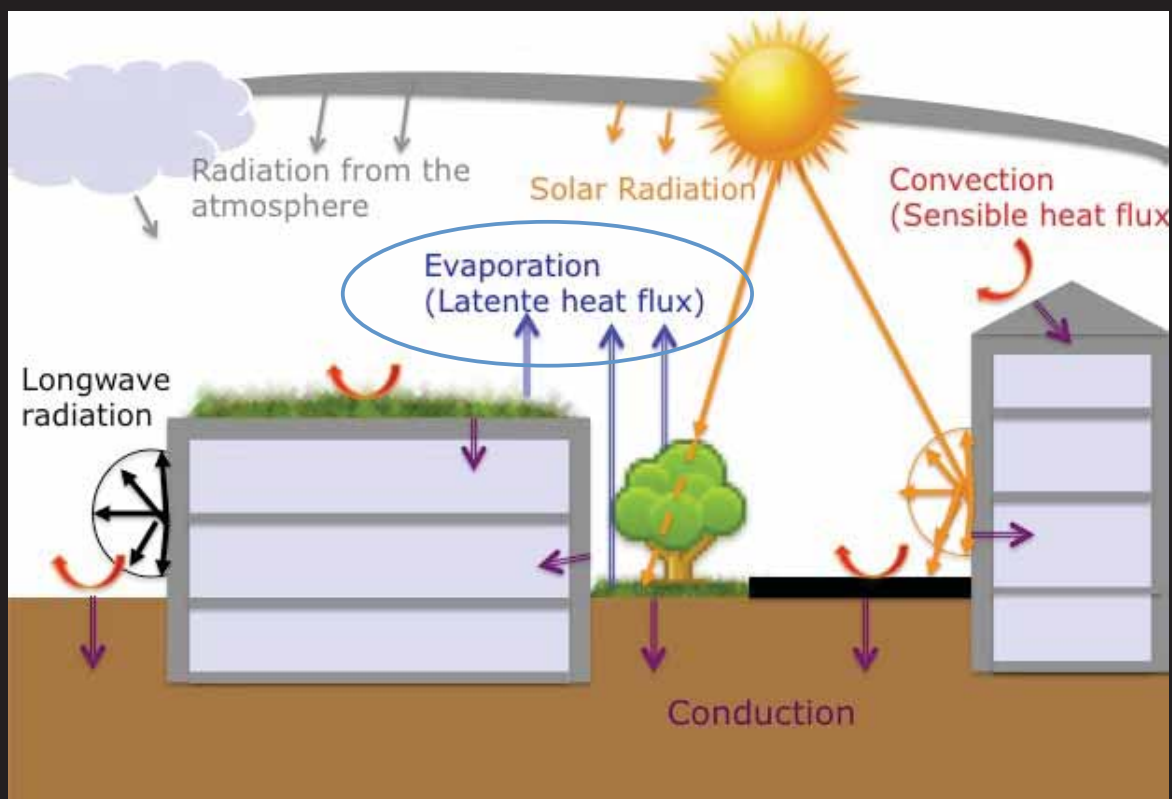
# Microclimat urbain



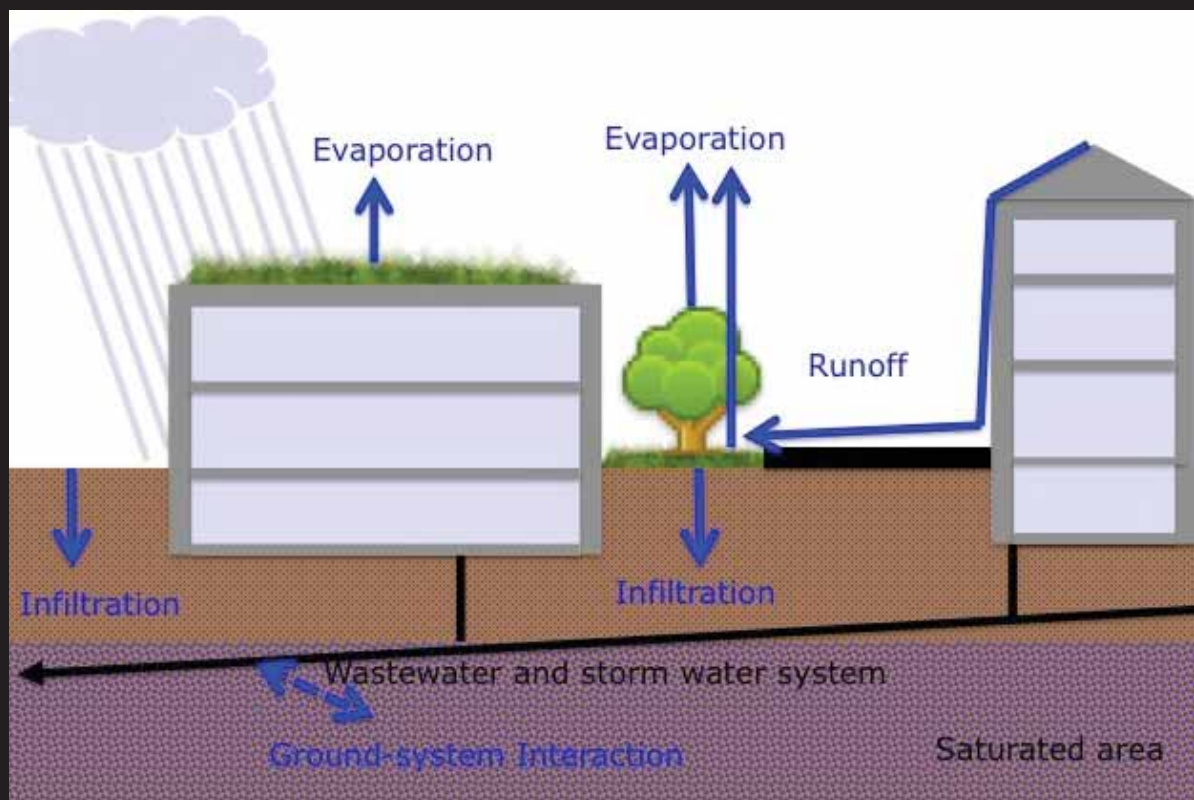
## Caractérisation du microclimat urbain

- Température d'air
- Température de surfaces
- Écoulement d'air
- Humidité
- Flux d'énergie

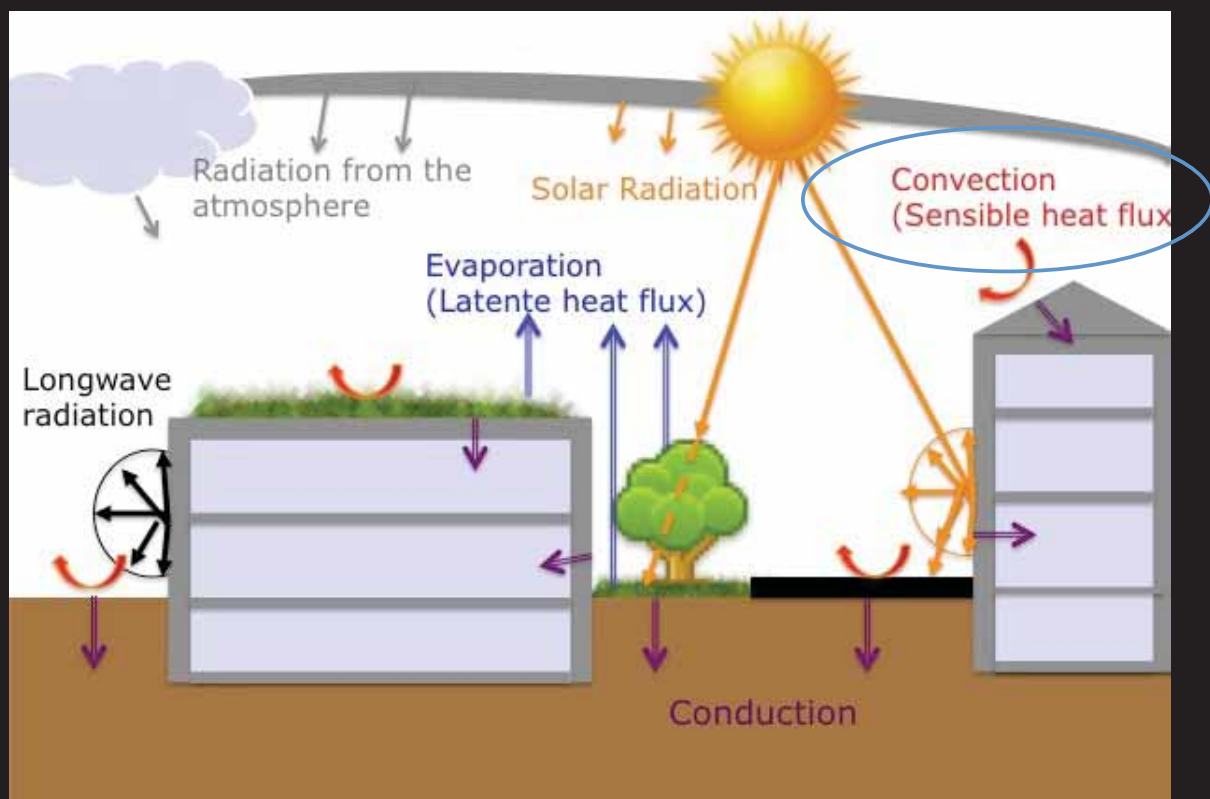
## Bilan énergétique des surfaces urbaines



## Bilan hydrique pour obtenir le flux latent

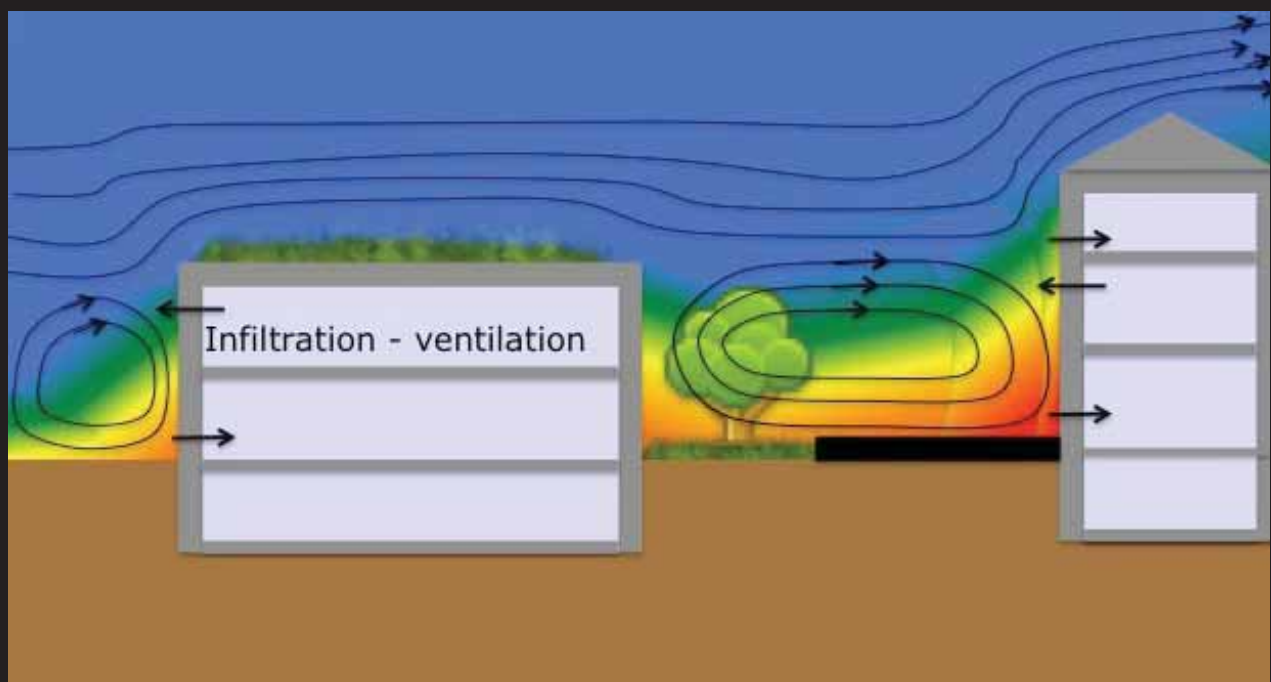


# Bilan énergétique des surfaces urbaines



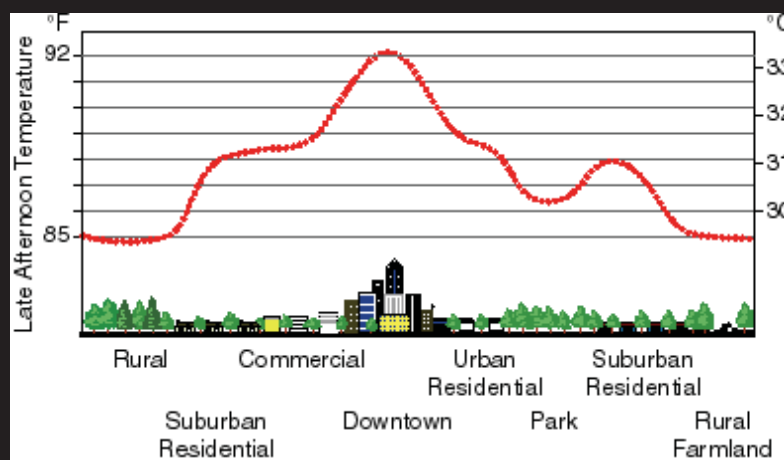


## Evaluation des écoulements pour les flux convectifs



## *Phénomène d'îlot de chaleur urbain*

Ilot de chaleur urbain = observation de fortes différences entre les températures mesurées en site urbain et les températures des campagnes environnantes.



Source : [www.Lbl.gov](http://www.Lbl.gov)

### *Impact sur la santé*

**corrélation entre la température moyenne journalière et la surmortalité due à cette chaleur excessive.**

Etude de 1976 à décembre 1996, à Londres (Hajat et *coll.*) :

la surmortalité liée à la chaleur augmente linéairement avec la température au-delà de 19°C (température journalière moyenne).

pour une variation de 1°C au-delà de cette valeur moyenne, une surmortalité de 3,34% est constatée.

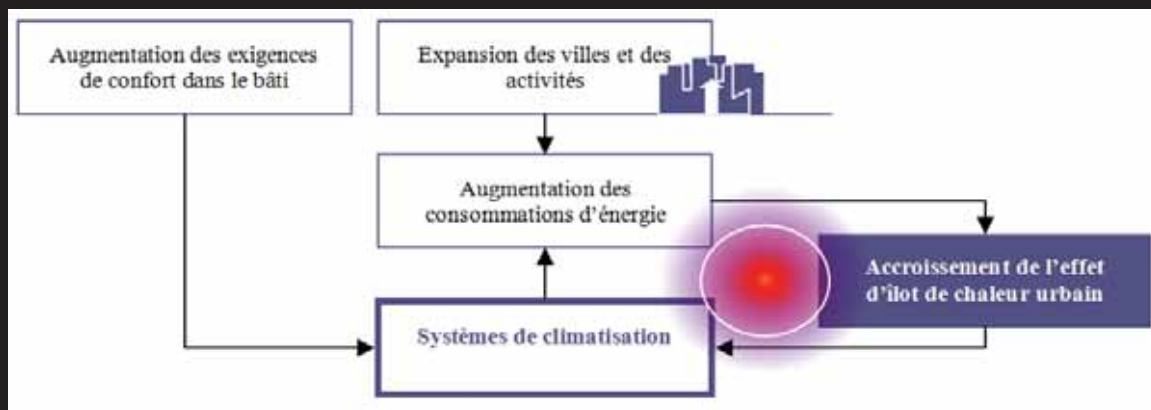
L'effet de l'augmentation de la valeur minimale de température est plus important que celui de la valeur maximale.

## ***Impact sur la consommation énergétique des bâtiments***

En **hiver l'effet peut être positif**: exemple Athènes : diminution de charge de chauffage de 30 à 50% par rapport à celle de la banlieue.

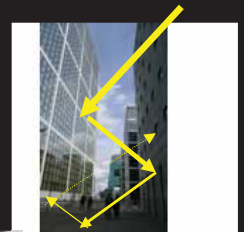
## **En été, consommation énergétique accrue des bâtiments climatisés**

L'évolution des exigences de confort d'été dans les bâtiments et la climatisation se développent fortement. Les charges thermiques peuvent être doublées par l'effet d'îlot de chaleur, alors la performance des systèmes d'air conditionné était réduite.



Source : E. Bozonnet

+ d'absorption du rayonnement CLO du fait de la géométrie (effet de la surface accrue et des inter-réflexions),



+ d'absorption du rayonnement GLO de la voûte céleste du fait de la pollution atmosphérique



- de perte par rayonnement GLO du fait du degré d'ouverture réduit par rapport à la voûte céleste,



+ Sources de chaleur anthropogéniques,



-d'évapotranspiration du fait des surfaces urbaines faiblement végétalisées et de l'absence de l'eau,

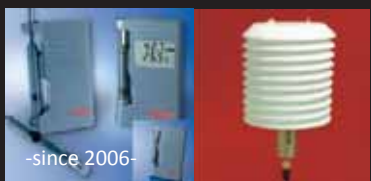


- de transferts thermiques par transport du fait de la diminution de la vitesse d'air.

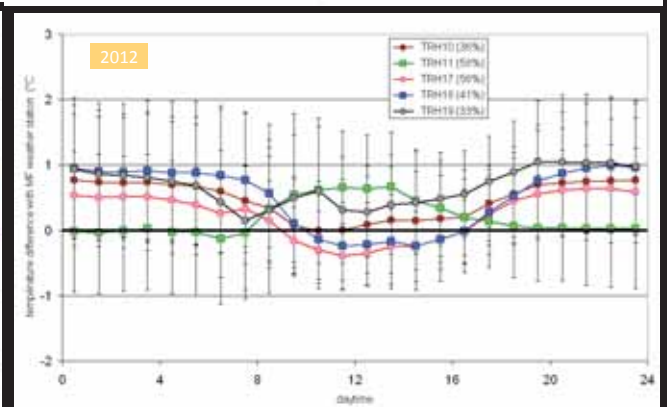
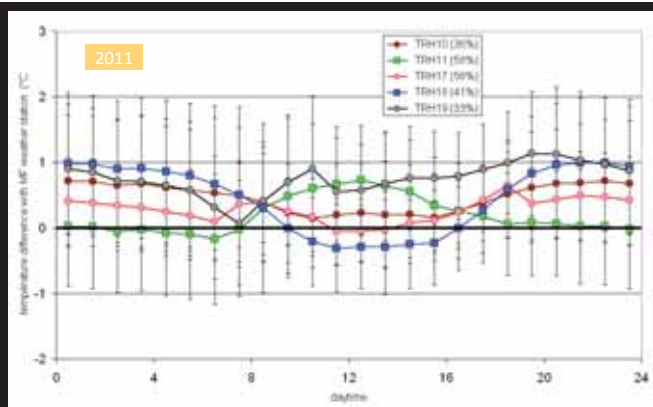
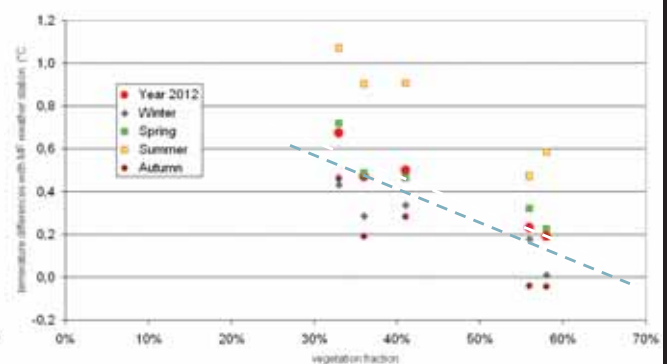
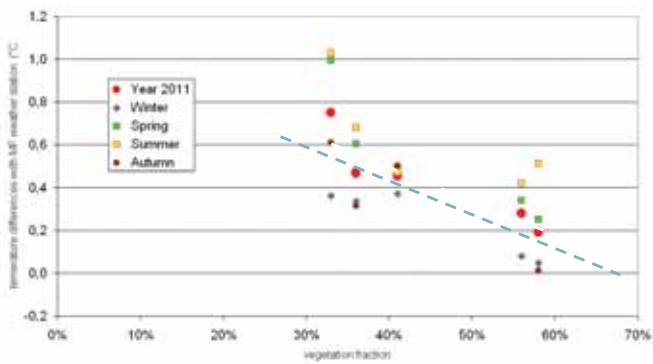
-> **Ilot de chaleur urbain**

# Ilot de chaleur urbain à Nantes ?

Réseau TRH (depuis mai 2010)



	Vegetation fraction 100m around the TRH probe
TRH10	36%
TRH11	58%
TRH17	56%
TRH18	41%
TRH19	33%



Source : J-M. Rosant

## Notion de confort thermique

Les hommes sont homéothermes - température corporelle à 37°C.  
Ils maintiennent cette température constante en régulant les échanges avec l'extérieur. Le *confort est atteint quand l'équilibre est atteint avec le moins d'effort possible*.

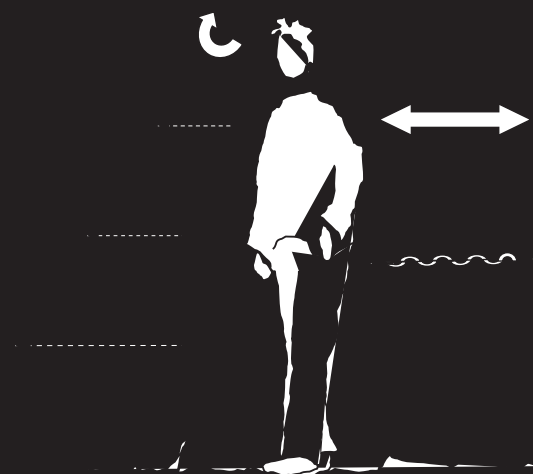
convection

evaporation

perspiration

sweating

conduction



convection

radiation

Source : Sophie Moreau



Evaluer le confort en extérieur est difficile

- nature de l'environnement (ensoleillement, vent ...)
- comportement des individus
- grande variabilité spatiale et temporelle

**Un indicateur de l'environnement bâti = Température radiante moyenne**

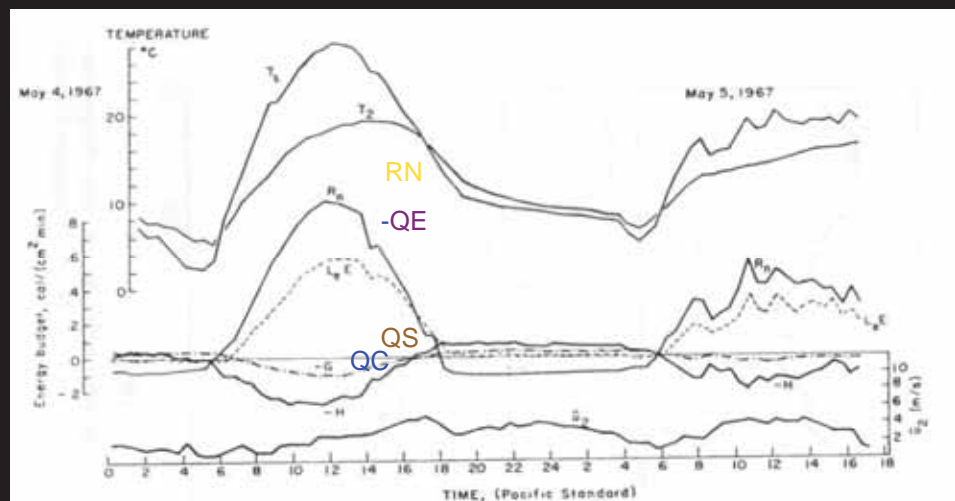
Température d'une surface qui générerait le même environnement radiatif.

Rend compte de la contribution de toutes les surfaces 'vues' par le corps humain (parois, ciel, soleil...)

La végétation influe fortement sur le confort car les surfaces végétales sont des surfaces à température qui augmente peu.

Par ailleurs, la végétation ombrage des surfaces qui auraient stocké la chaleur

## Bilan thermique d'une surface de sol



*Bilan énergétique sur une journée : température de surface, température, vitesse moyenne du vent à 2m pour une surface plantée (en Californie) (Brutsaert, 1982)*

$$Q_s = R_n + Q_c + Q_e$$

$Q_c$  = flux de chaleur sensible : convection

$Q_e$  = flux de chaleur latente : évaporation ou condensation

$Q_s$  = transfert de chaleur dans le sol : conduction

$R_n$  = flux radiatif net : rayonnement

## Les leviers pour agir sur le climat en ville

### Objectifs

Atténuation

Adaptation

### Actions sur

Forme urbaine

Matériaux

Usages

Equipements

# Analyse des impacts énergétiques et climatiques de « dispositifs végétaux urbains »

Les arbres

La pelouse

Les parcs

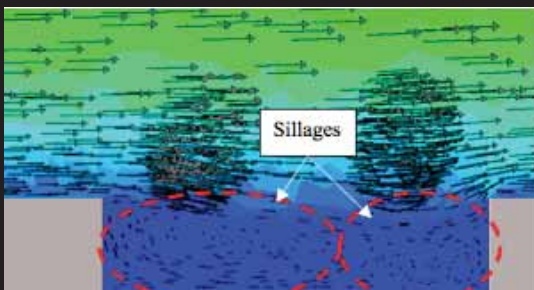
Les toitures végétales

Les façades végétales

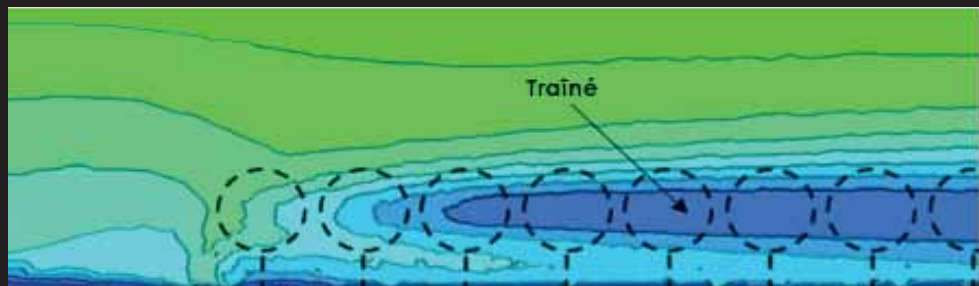
...

## Les arbres

## Impacts climatiques



Effets aérauliques

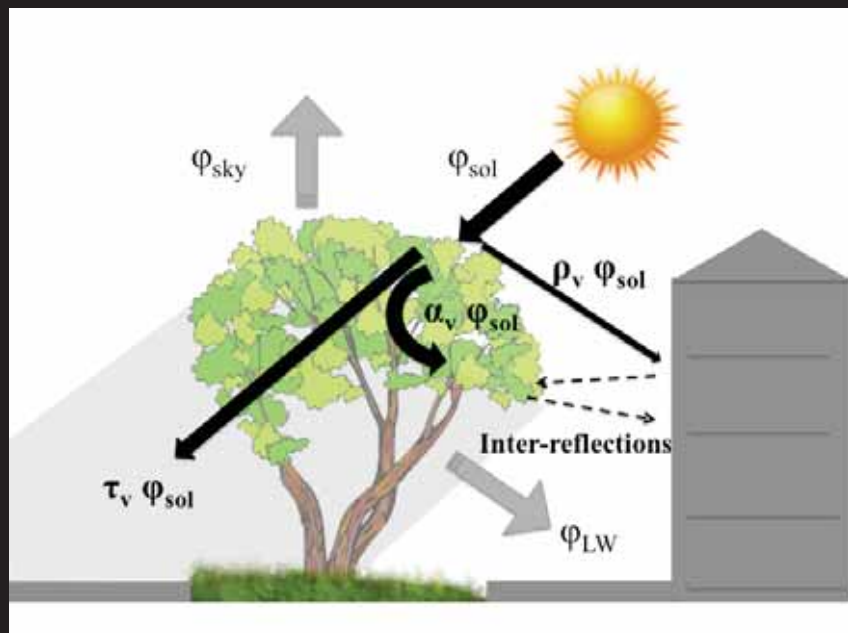
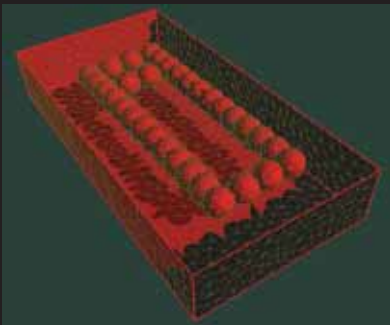


Evapotranspiration

# Les arbres

## Impacts climatiques

### Effets radiatifs



### *Quels effets prédominent ?*

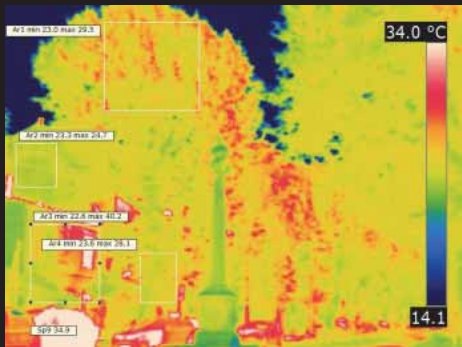
L'impact des arbres sur la température de l'air est moins important que l'effet d'ombrage des surfaces car l'air "frais" est rapidement dissipé par le vent. (McPherson, 1992),

Il faut une concentration d'arbres pour créer un effet d'"oasis" qui soit dissipé alentour. (Amada et al., 2010) (Spoken-Smith and Oke, 1998)

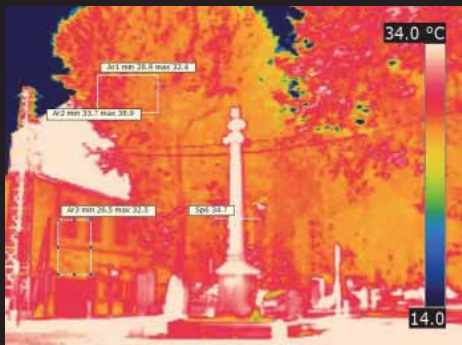


# Les arbres

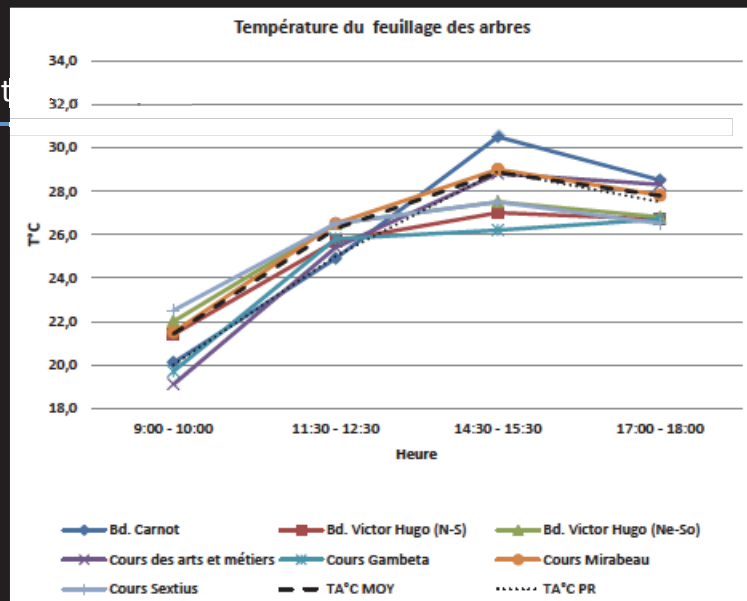
Impact



T° à 12h



T° à 17h30



Température du feuillage des arbres dans des rues, Aix –en-Provence

Source : Thèse Lizeth Rodriguez- Potes

### *Quels arbres ?*

Les arbres qui résistent au stress hydrique (adaptés au milieu urbain) limitent leurs échanges gazeux avec l'air. Leur effet climatique est essentiellement réduit à l'effet indirect lié à l'ombrage (McPherson, 1992)

Quand l'eau est disponible, la **transpiration** dépend des espèces d'arbres (résistance stomatale, seuil de fermeture des stomates...) et de leur environnement construit et non construit (Kjelgren et Montague, 1997) : humidité de l'air, sollicitation radiative...

## Les arbres

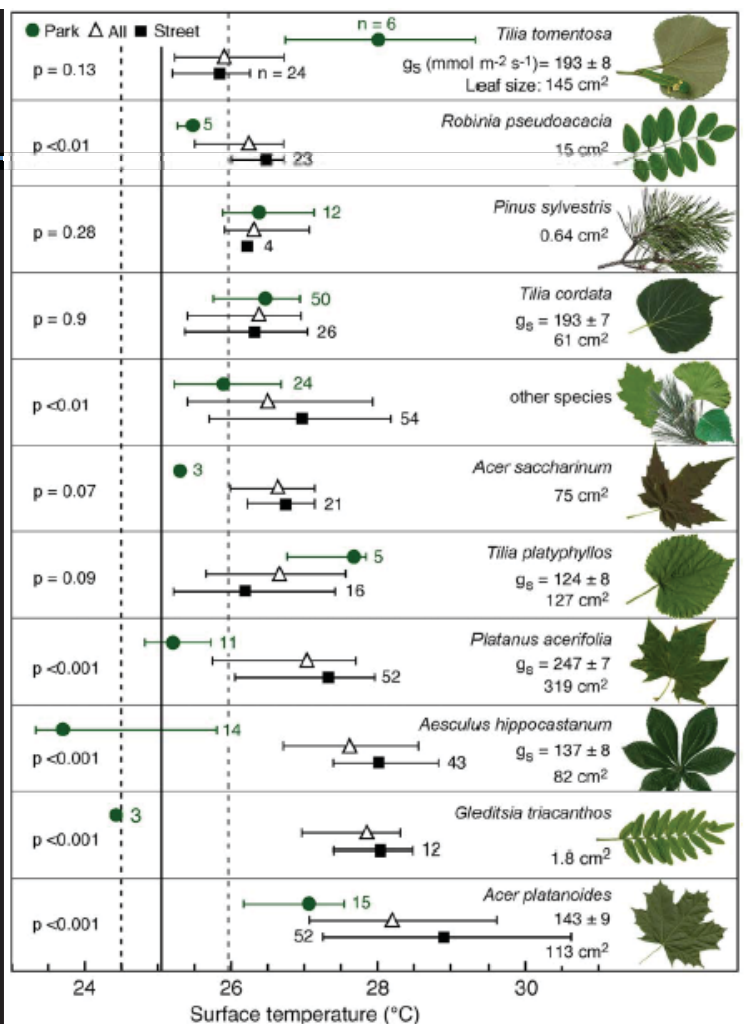
Du fait de leur capacité à transpirer, les arbres maintiennent leur feuillage à des températures proches de celle de l'air (Leuzinger et al., 2009)

(Kjelgren et Montague, 1997)  
eau : 18°C, rues 37°C, toitures >45°C

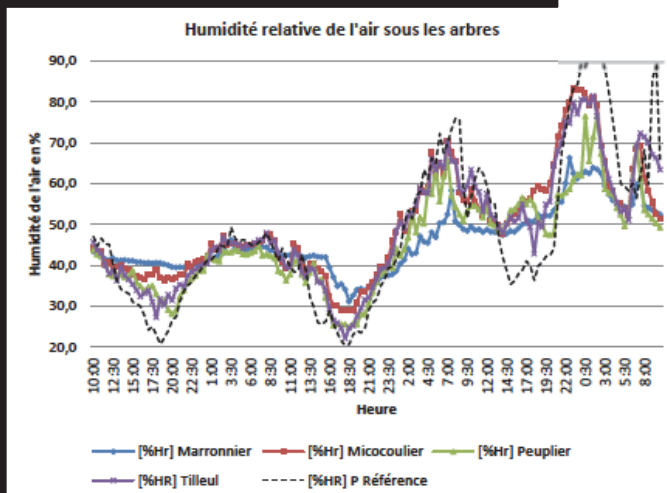
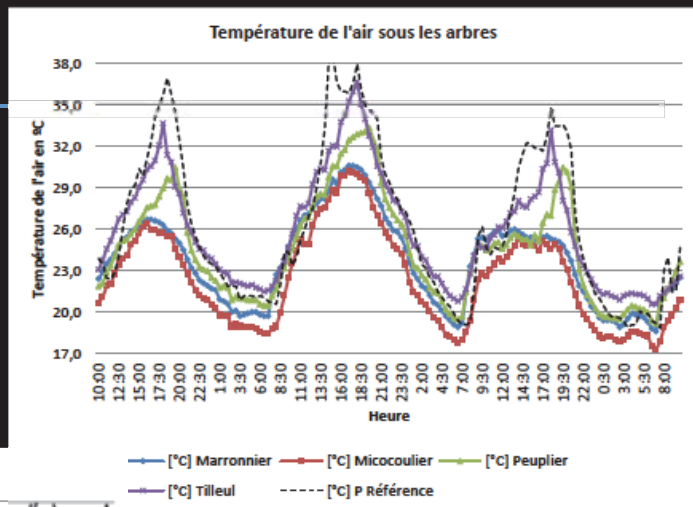
Conifères : peu de variations

Grandes feuilles: températures plus élevées

Températures plus élevées dans les rues (effets radiatifs)



## Les arbres



Température et humidité sous des arbres dans le jardin botanique de Marseille

*NB : attention, il y a les arbres et l'aménagement du sol*

Source : Thèse Lizeth Rodriguez- Potes

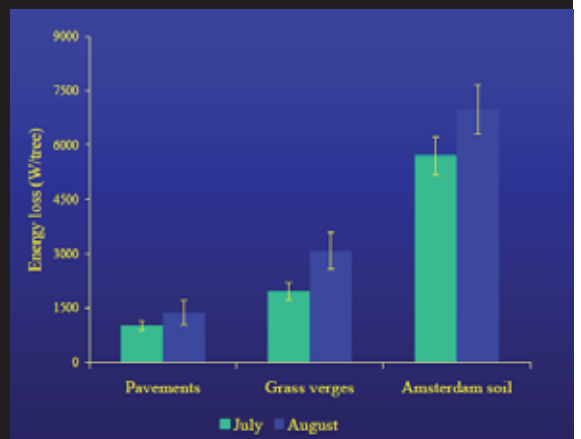
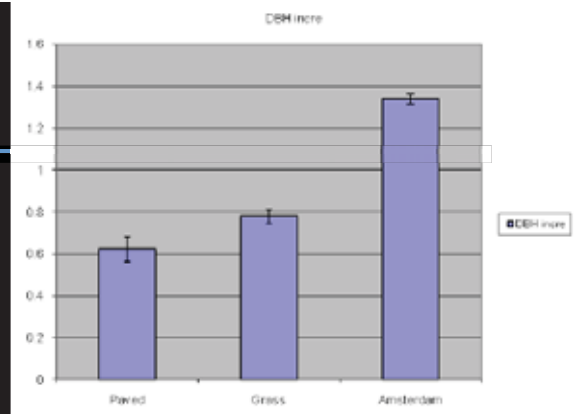
## Les arbres

Arbres urbains  $\neq$  Arbres ruraux

(M.A. Rahman, A.R. Ennos, 2011)

- Dans des sols moins compacts, les arbres croissent jusqu'à 2 fois plus vite que dans des sols pavés et compacts (différence de disponibilité en eau)

- Dans des sols moins compacts, l'effet de rafraîchissement dû à l'évapotranspiration est jusqu'à 5 fois supérieur à celui d'arbres dans des sols pavés

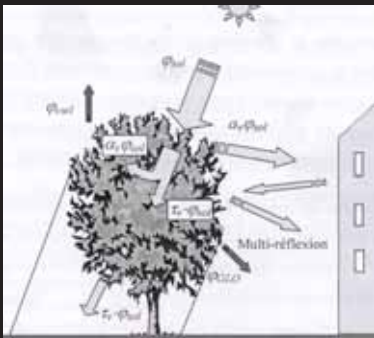


## Les arbres



## Les arbres

## Impacts énergétiques



Ombrage (été 😊 , mais aussi hiver 😞)

Barrage au rayonnement GLO (jour 😊, nuit 😞, hiver 😊)

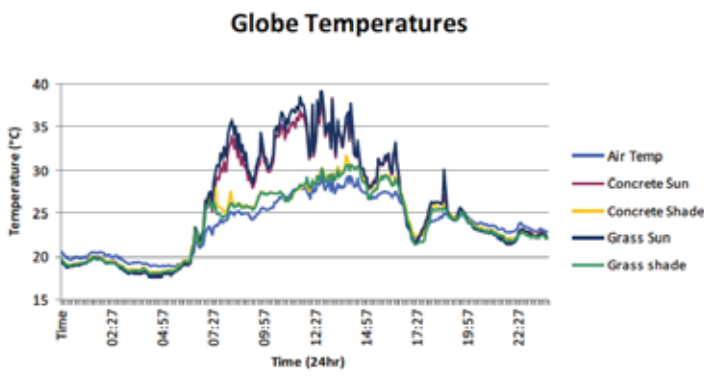
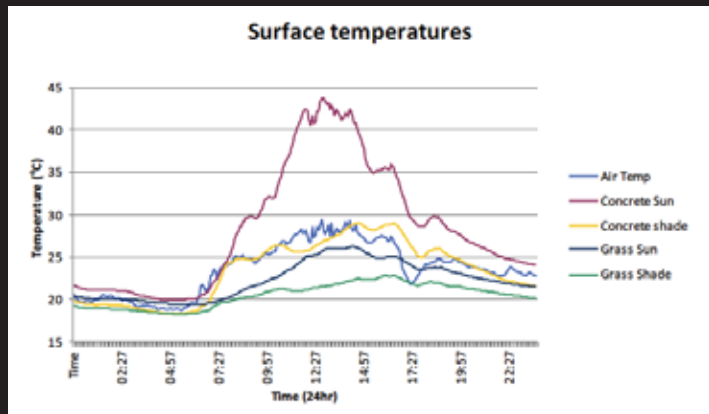
Protection vent (hiver 😊 et été 😞)

Humidification de l'air (charge latente 😞)

# La pelouse

## Impacts climatiques / impacts sur le confort

(D. Armson, A.R. Ennos, 2011)





Tel Aviv , étude sur 1 été, 3 parcs avec différentes répartitions pelouses/arbres (Potchter et al., 2006)

Différences de température zones construites / parcs

- Parc avec grands arbres : 3.5°C
- Parc engazonné : faible différence, parfois plus chaud

Tokyo, parc Sinjyuku-Gyoen, étude sur 1 an (Sugawara et al., 2006)

Différences de température zones construites / parcs

- Moyenne de 09:00 à 15:00 d'environ 1°C

Toitures vertes extensives



-> cf pelouse,

- avec une disponibilité en eau liée au substrat
- Avec des plantes résistant à la sécheresse
- Avec un effet « là-haut »



## Les toitures végétales

Impacts climatiques

### Toitures vertes intensives



-> cf arbres, parcs..

- avec une disponibilité en eau liée au substrat
- Avec un effet « là-haut »



Protection solaire due au feuillage,  
Consommation de la chaleur par évaporation,  
Isolation (substrat), Inertie

Un impact énergétique qui dépend du type de toiture végétale, de l'isolation du bâtiment, des charges internes et du climat. Impact essentiellement sur le dernier étage.

(Kumar etKaushik, 2005; Alexandri et Jones, 2006; Sailor, 2008; Castleton et al., 2010; Ouldboukhitine et al., 2011...)

## Les façades végétales

---

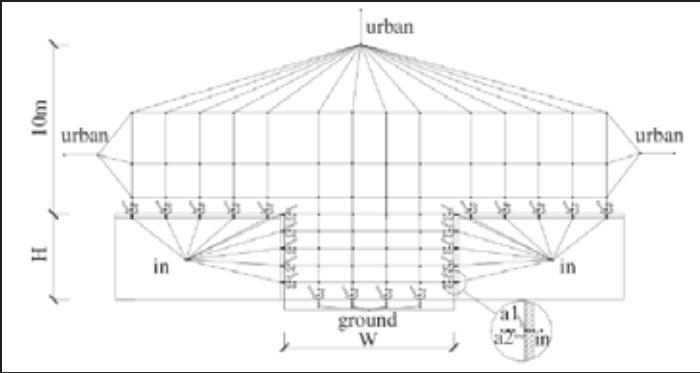
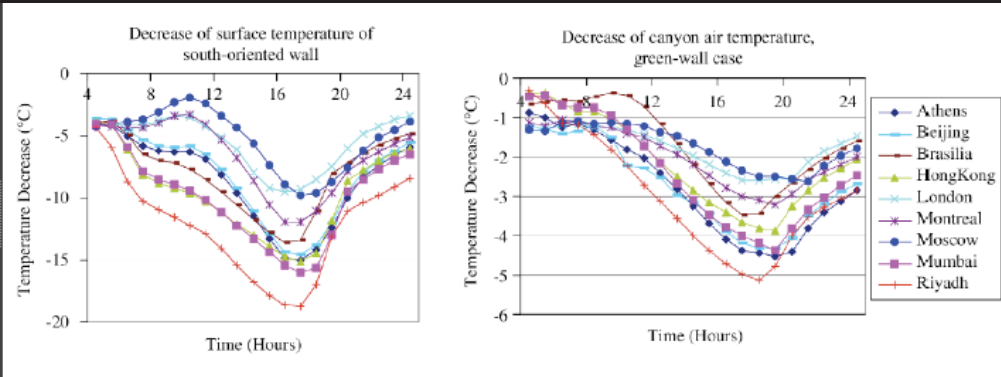
3 types de façades végétales (Malys, 2009) :

- les grimpantes directement sur les parois (parois opaques)
- les écrans solaires distants (protection des parois vitrées)
- Les façades avec substrat (parois opaques)



# Les façades végétales

# Impacts climatiques



(Alexandri, 2007)

## Les façades végétales

### Impacts énergétiques

---

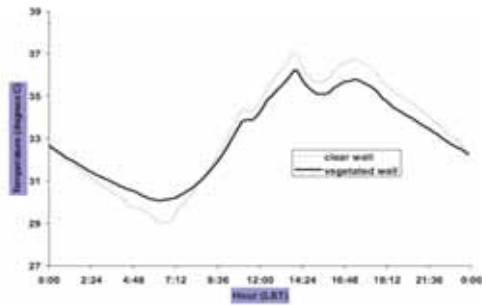
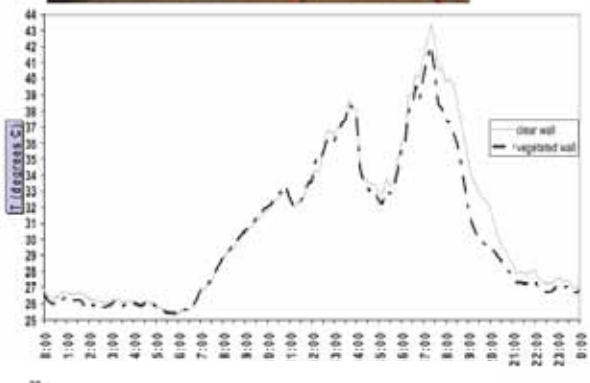
Effet direct sur la consommation énergétique des bâtiments par écran au rayonnement solaire et au vent.

Effet d'isolation en présence d'un substrat

Mais également augmentation de la charge latente des systèmes d'air conditionné par leur production d'humidité par évapotranspiration.



Façade ouest, épaisseur 21cm  
brique.  
Plante : *Parthenocissus  
tricuspidata* (feuillage caduque).

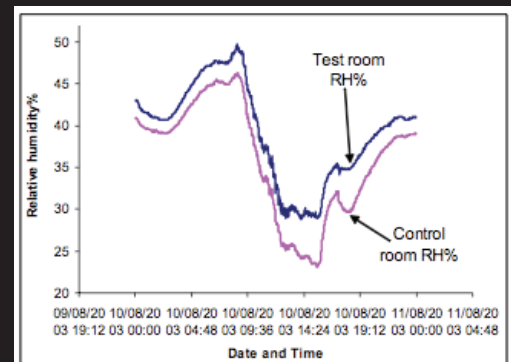
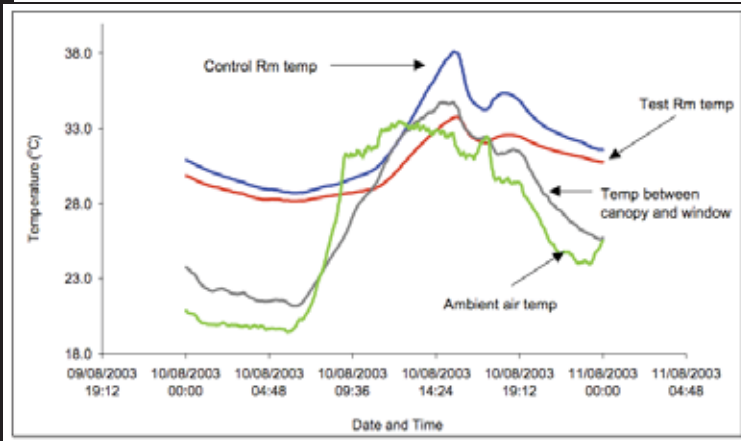


Month	Cooling load variation(%)	Heating load variation(%)
Jan		0.7
Feb		1.9
Mar		2.1
Apr		2.5
May	1.2	4.1
Jun	2.3	
Jul	2.3	
Aug	3	
Sep	1	3
Oct		2.8
Nov		2.2
Dec		1.6

THERMAL PERFORMANCE OF A VEGETATED WALL DURING HOT AND COLD WEATHER CONDITIONS - C. Tsoumarakis, et al., 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October 2008

Mesures, 25/08/2003

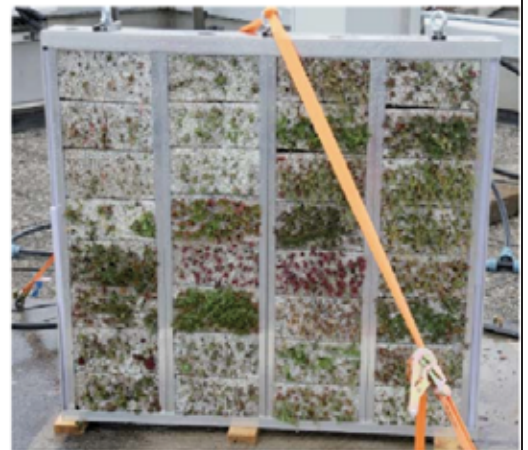
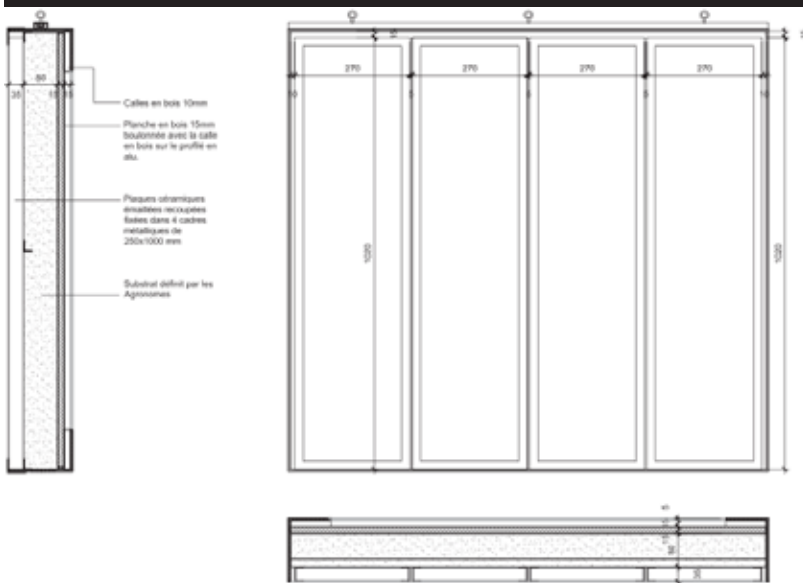




Ip, K., M. Lam et A. miller (2004). Bioshaders for sustainable buildings. CIB World building Congress, Building for the future : the 5th int.conf. on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, Toronto Canada, 1-7 mai.

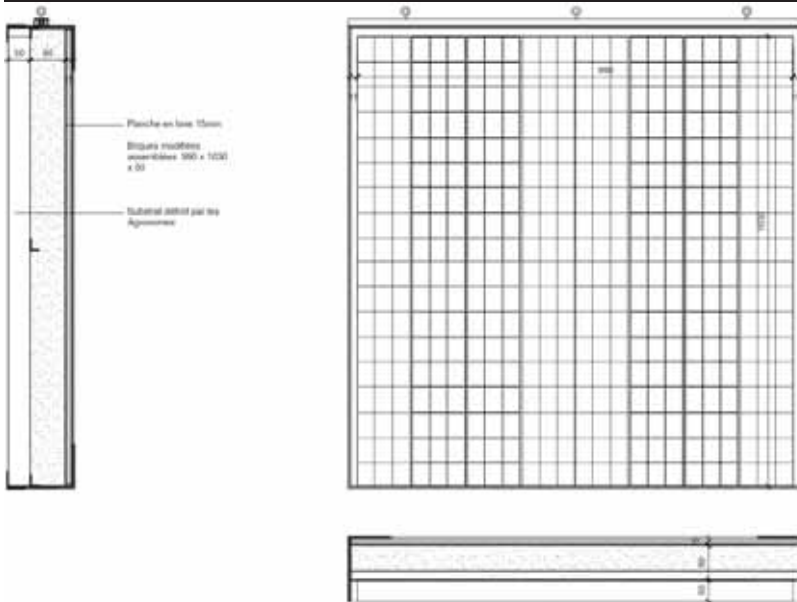
Test HEPIA

## Echantillon 2



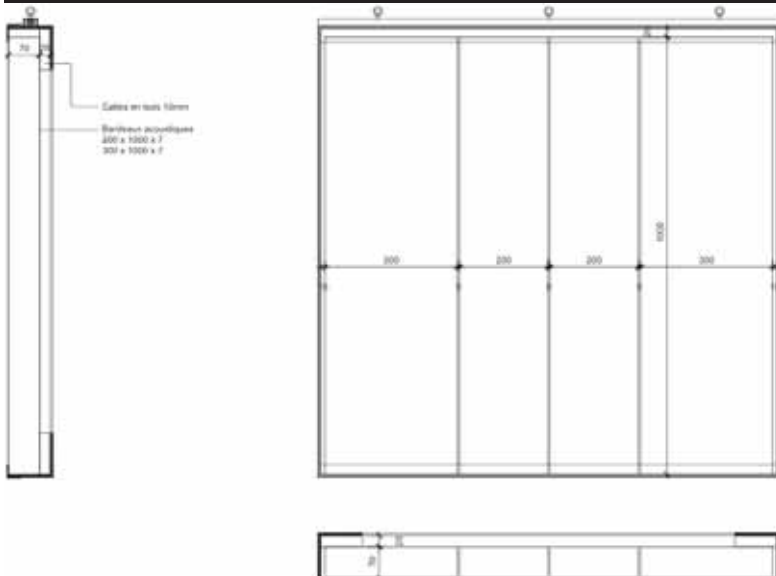
Test HEPIA

### Echantillon 3



Test HEPIA

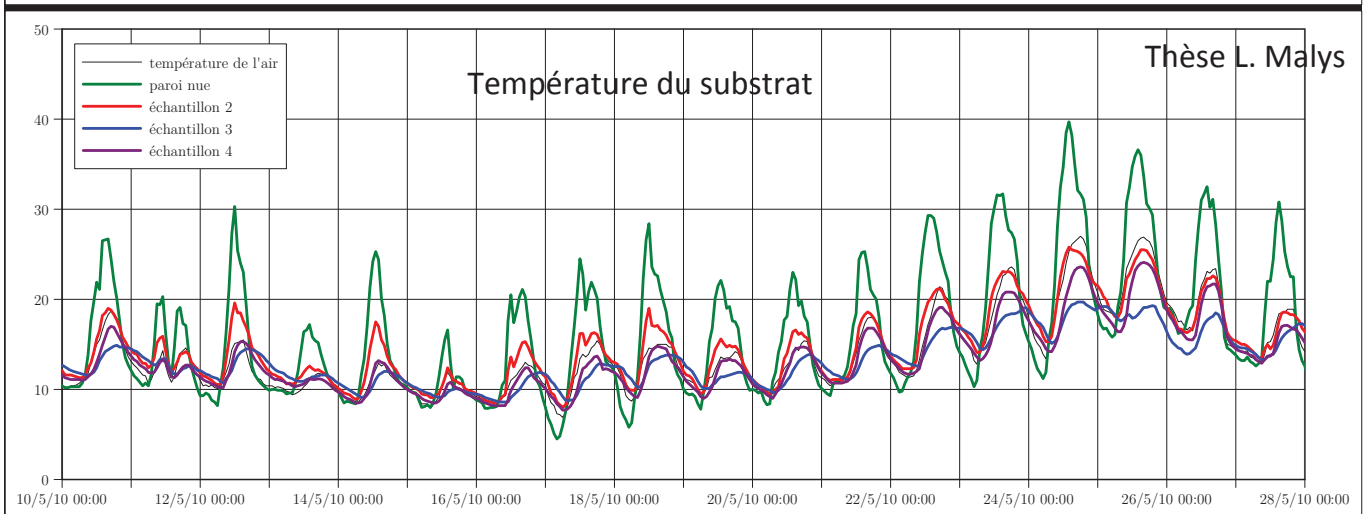
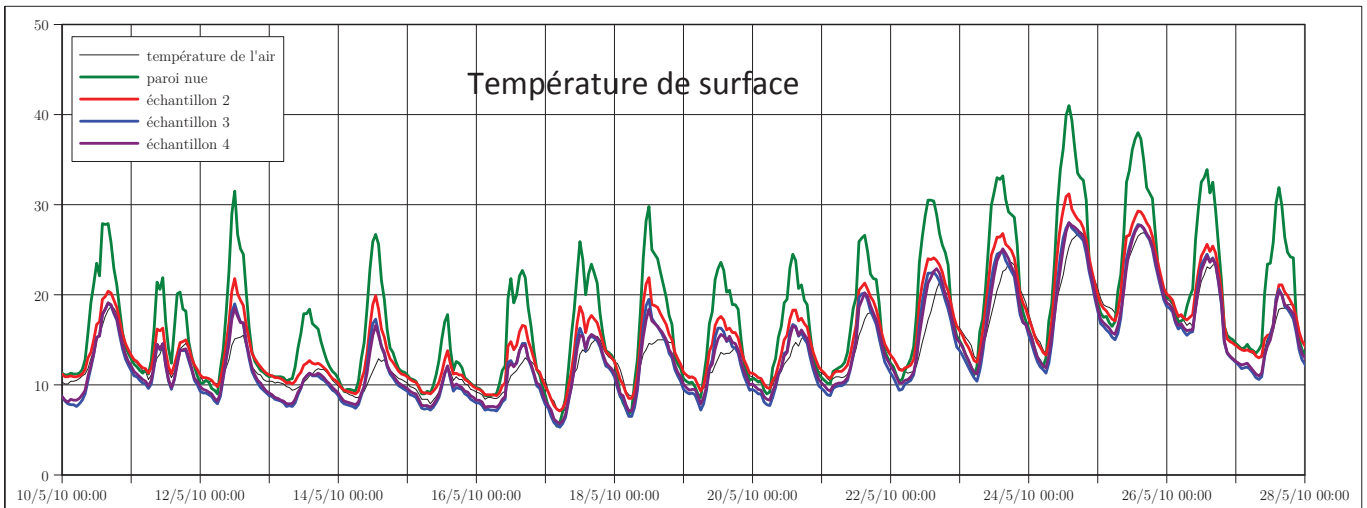
Echantillon 4

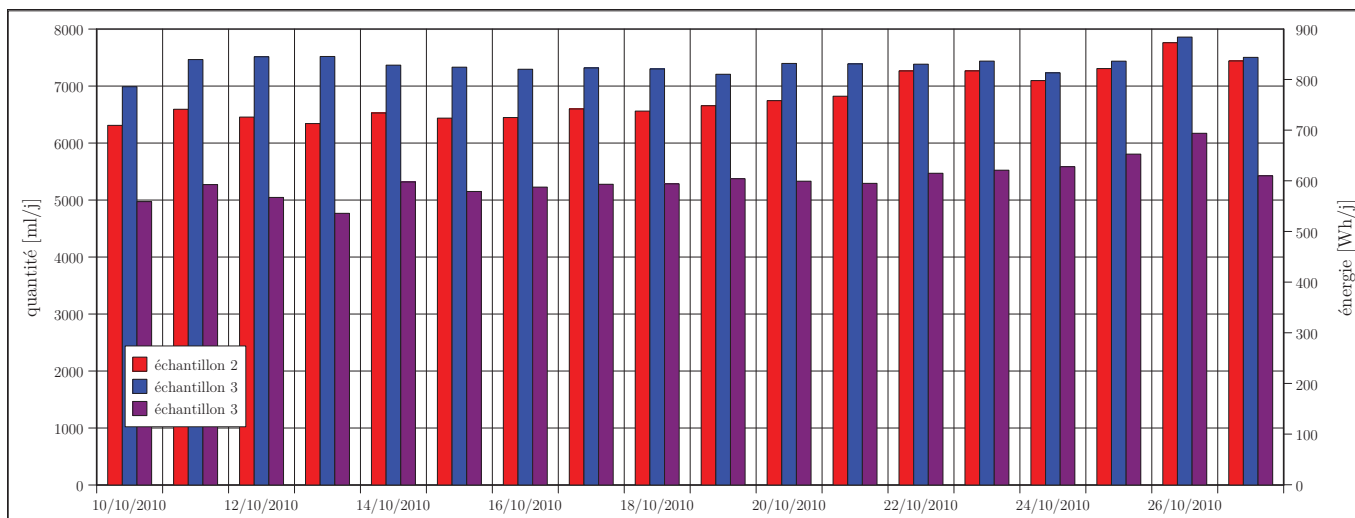


Test HEPIA

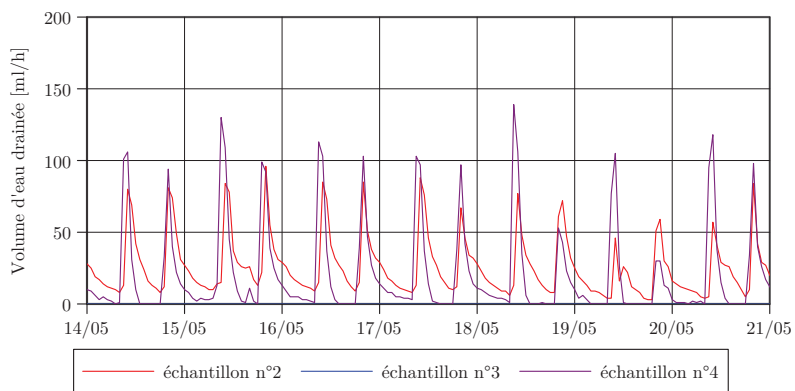


Suivi climatique

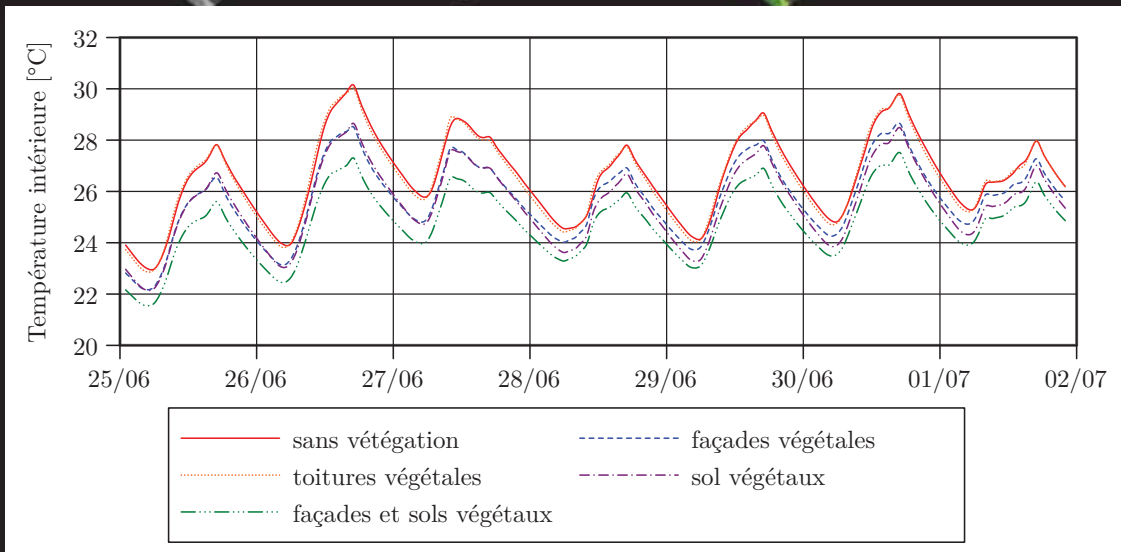
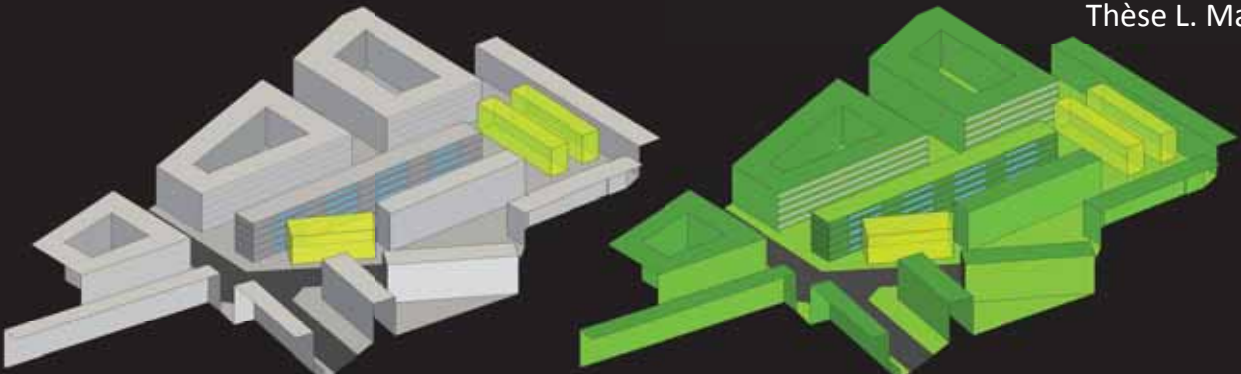




Comparaison évapotranspiration journalière



Volume d'eau drainé

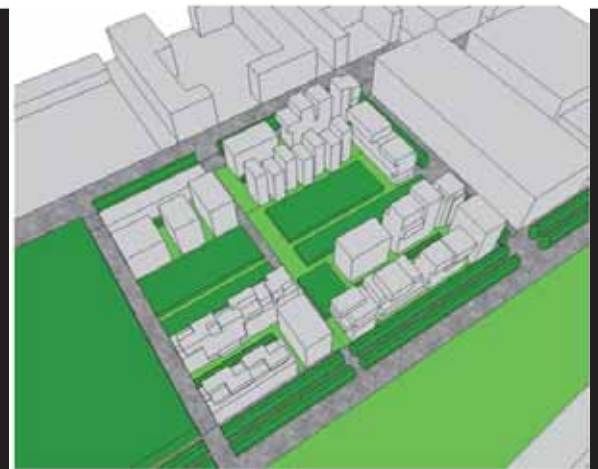
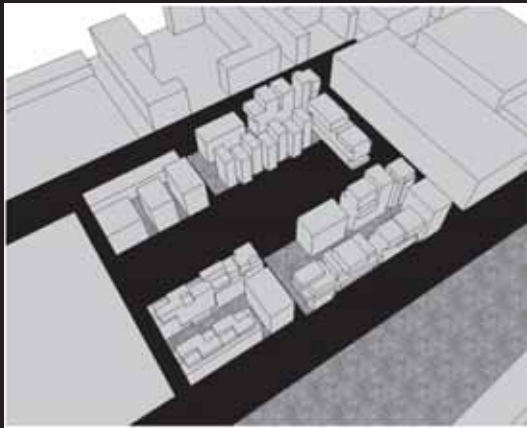
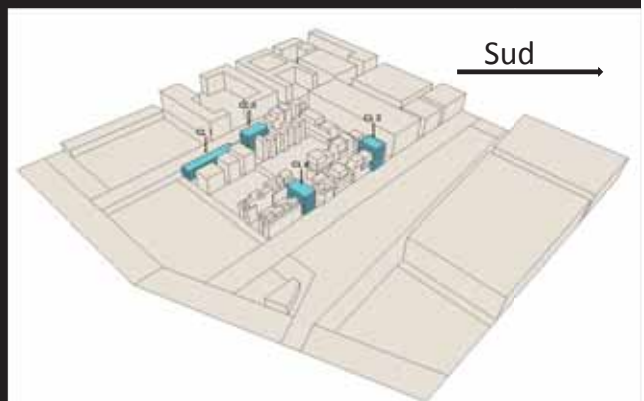




## *Impact sur la consommation énergétique des bâtiments*

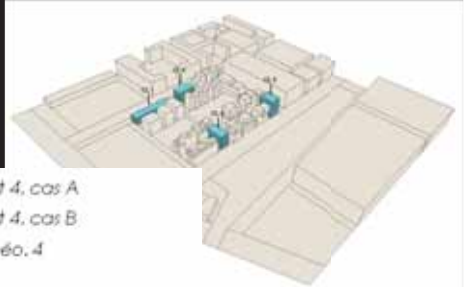
Application Lyon Confluence

Calcul de la consommation énergétique de  
4 bâtiments de bureaux respectant la  
RT2005



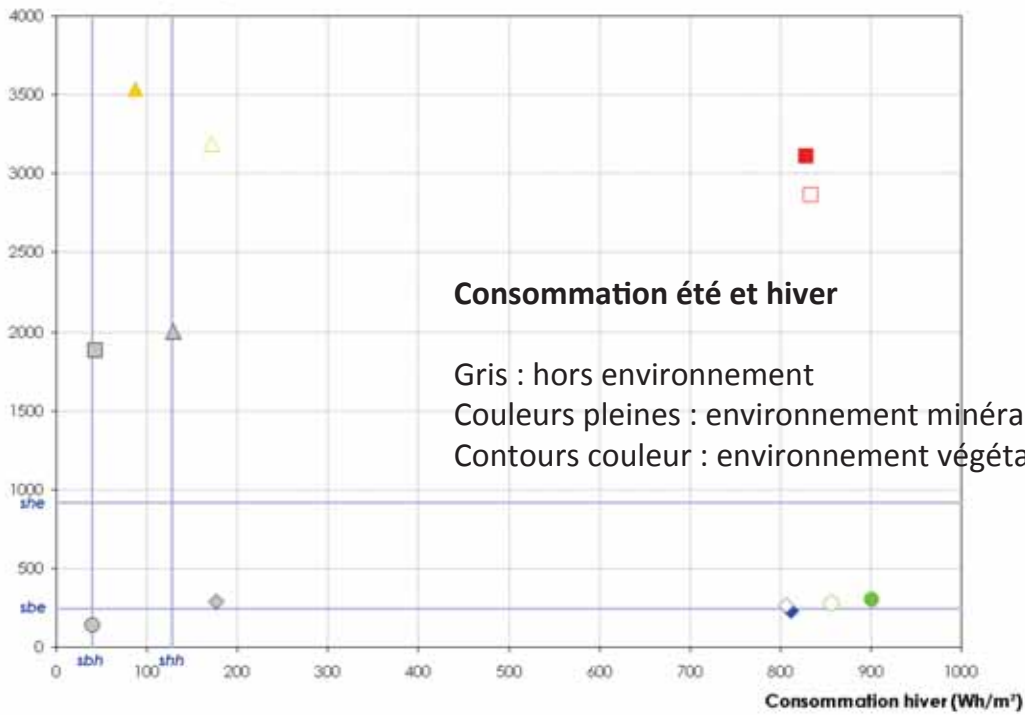
Bouyer, 2009

## Impact sur la consommation énergétique des bâtiments



- |                     |                     |                     |                     |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ● Bâtiment 1, cas A | ◆ Bâtiment 2, cas A | ■ Bâtiment 3, cas A | ▲ Bâtiment 4, cas A |
| ○ Bâtiment 1, cas B | ◇ Bâtiment 2, cas B | □ Bâtiment 3, cas B | △ Bâtiment 4, cas B |
| ● équiv. théo. 1    | ◆ équiv. théo. 2    | ■ équiv. théo. 3    | ▲ équiv. théo. 4    |

Consommation été (Wh/m<sup>2</sup>)



Bouyer, 2009

Bacons, terrasses...

Impacts climatiques



???



## Des comparaisons issues du projet VegDUD

- Façades et toitures végétales
- Aménagements de gestion des eaux pluviales
- Surfaces enherbées VS surfaces sans couvert végétal
- Végétation de pleine terre VS végétation hors sol
- Arbres





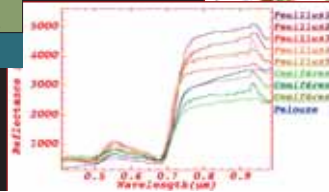
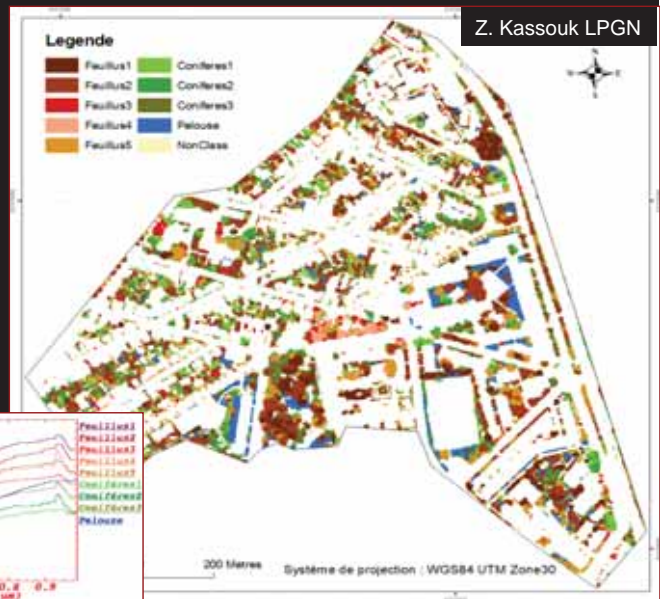
# Acquisition de données



N. Long, LIENSs

Z. Kassouk LPGN

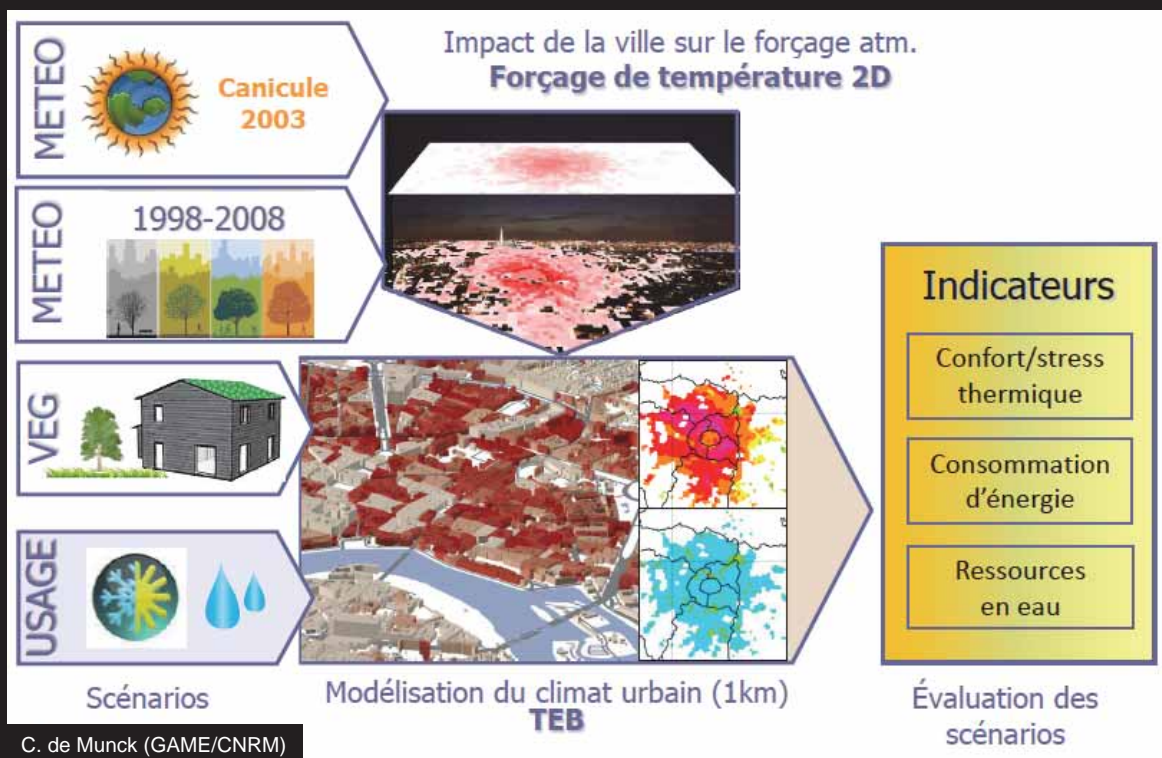
Genre	Espèce	Nom Commun	Classes
Quercus	robur	Chêne pédonculé	Feuillus1
Platanoidea	rubra	Erable	
Betula	verrucosa pendula	Bouleau	Feuillus2
Fraxinus	excelsior	Frêne	
Platane	occidentalis laurifolia	Platane d'Occident	Feuillus3
Catalpa		Catalpa	
Platanoidea	negundo	Erable	Feuillus4
Quercus	palustris	Chêne des marais	
Platane	occidentalis laurifolia	Platane d'Occident	Feuillus 5
Liquidambar	styraciflua	Copalme d'Amérique	
Quercus	coccinea	Chêne écarlate	Conifere1
Pinus	sylvestris	Pin sylvestre	
Pinus	griffithii	Pin de l'Himalaya	Conifere 2
Cupressus	arizonica	Cypres de l'Arizona	
Pinus	pinea	Pin maritime	Conifère 3
Pinus	radiata	Pin de Monterey	
Pelouse		Astéracée Poacée	Pelouse



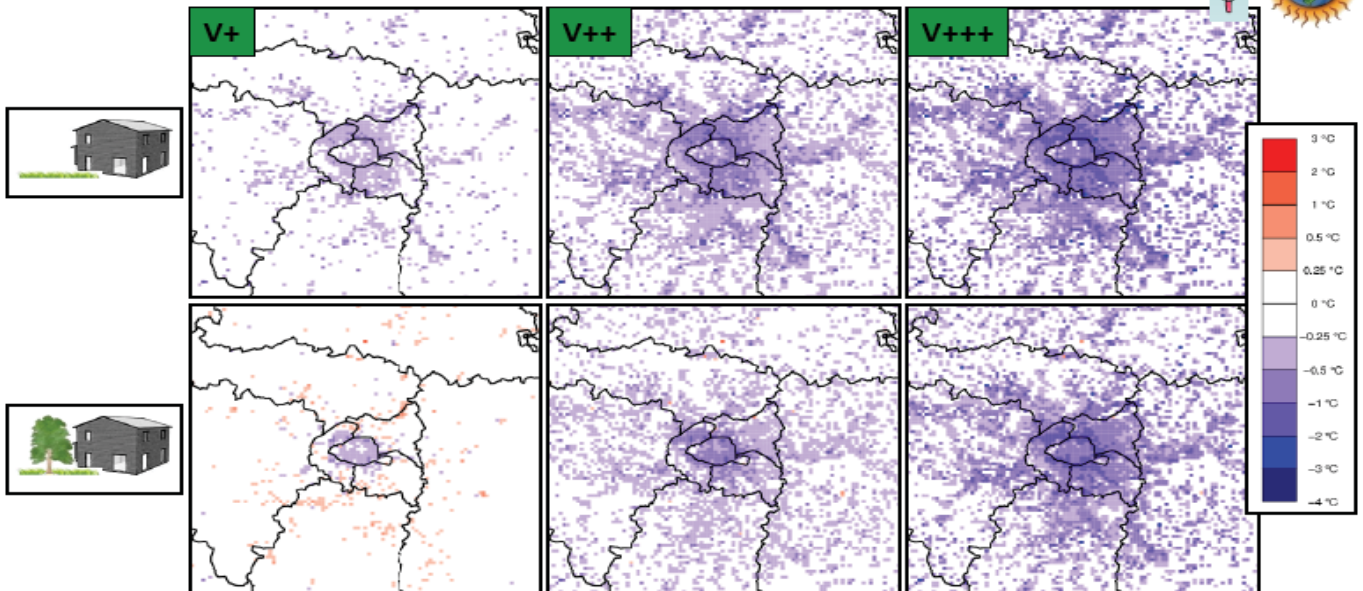
## Analyse hyperspectrale

# Simulations climatiques sur Paris

## Principe du modèle TEB



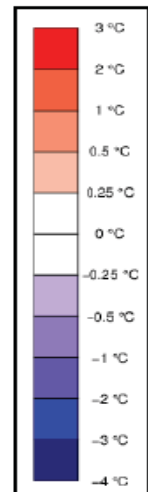
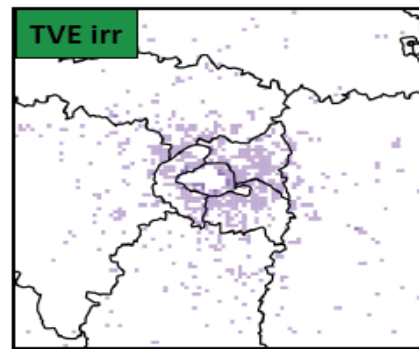
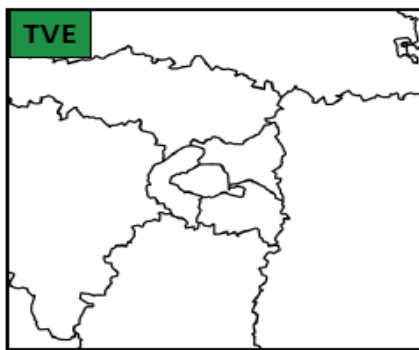
## Impacts sur les températures des rues $\Rightarrow \Delta T_{MAX}$



$\Rightarrow$  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  $\Rightarrow \Delta T_{MAX}$



$\Rightarrow$  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)

C. de Munck (GAME/CNRM)



*Ref : scénario de référence*

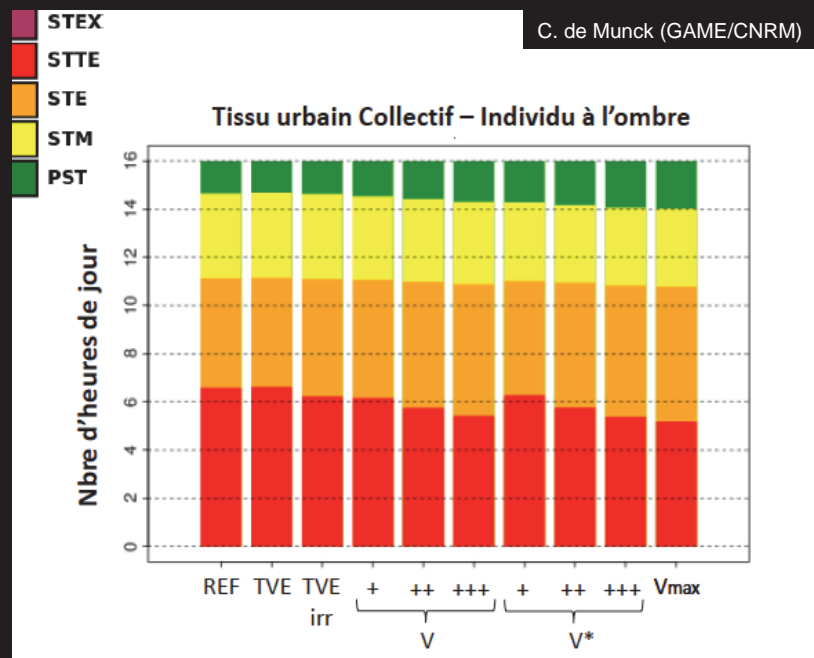
*TVE : toiture le permettant végétalisées*

*TVE irr : TVE + irrigation*

*V (+, ++, +++): végétalisation de plus en plus importante du sol avec uniquement végétation basse*

*V\* (+, ++, +++): V (+, ++, ++ +): avec arbres en plus de la végétation basse*

*Vmax = TVE irr + V\*+++*



Amélioration du confort thermique par la végétation au sol

Ref : scénario de référence

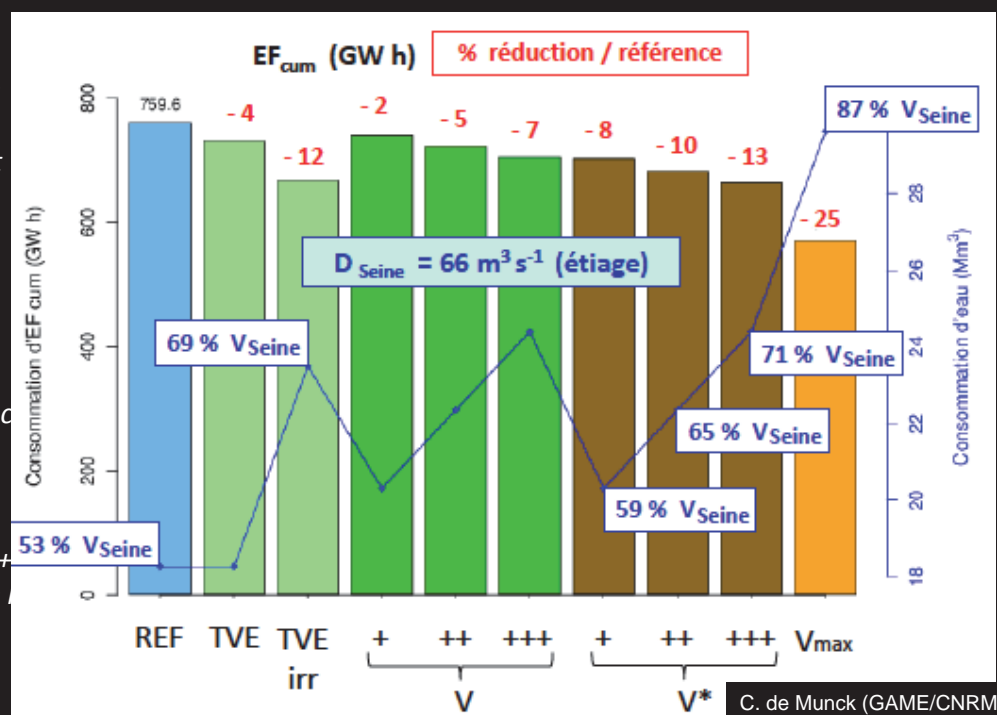
TVE : toiture le permettant végétalisées

TVE irr : TVE + irrigation

V (+, ++, +++): végétalisation de plus en plus importante du sol avec uniquement végétation basse

V\* (+, ++, +++): V (+, ++, +++): avec arbres en plus de végétation basse

Vmax = TVE irr + V\*+++



C. de Munck (GAME/CNRM)

L'impact est plus important dans le cas d'irrigation mais la quantité d'eau nécessaire est très importante également

# Consommation énergétique à l'échelle de la rue

## SOLENE-microclimat

Cas étudiés (été)



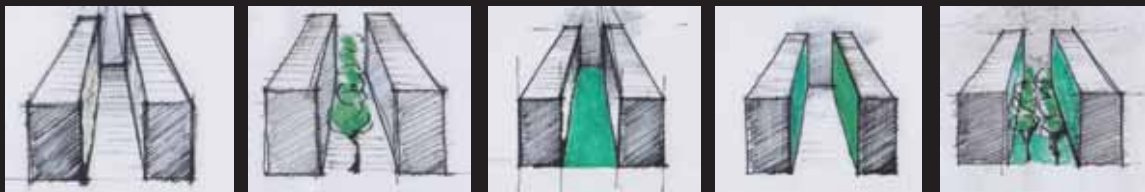
Différentes orientations de la rue

1- Bâtiment végétalisé	1- Bâtiment végétalisé	1 - Arbres dans la rue	1 - Arbres dans la rue	
2 - Arbres dans la rue	2 - Arbres dans la rue	2 - Bâtiment végétalisé	2 - Bâtiment végétalisé	
		3 - Sol végétalisé	3 - Sol végétalisé	
		4 - Bâtiment en vis-à-vis végétalisé	4 - Bâtiment en vis-à-vis végétalisé	

# Confort thermique

Post-doc Agota Szucs (CERMA/IRSTV)

## Cas étudiés



**8 Juillet 2010 , Nantes France**

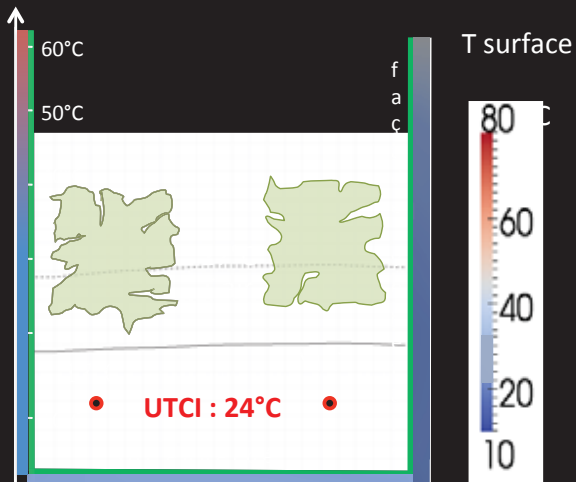
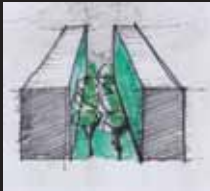
Vitesse moyenne à 10 m	0.9 m/s
Wind direction de vent la plus fréquente	110°
Température maximale à 10m	32.6°C

Rues NS, EO, NE-SO

A. Szucs- IRSTV

# Résultats pour la rue NS, à 16h

NB : évaporation maximale



Echelle UTCI (°C)	Niveau de stress	Code
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

	T air (°C)	T sol (°C)	UTCI
Minéral	34	35-40	30
Arbres	31 (-3)	30	24
Sol	32 (-2)	27-28	28
Façades	30-32 (-3)	30-36	27-30
Tout	27 (-7)	24-25	24

Remarque : Evaporation maximale et confinement fort

A. Szucs- IRSTV

# Hydrologie

Quartier

- URBS



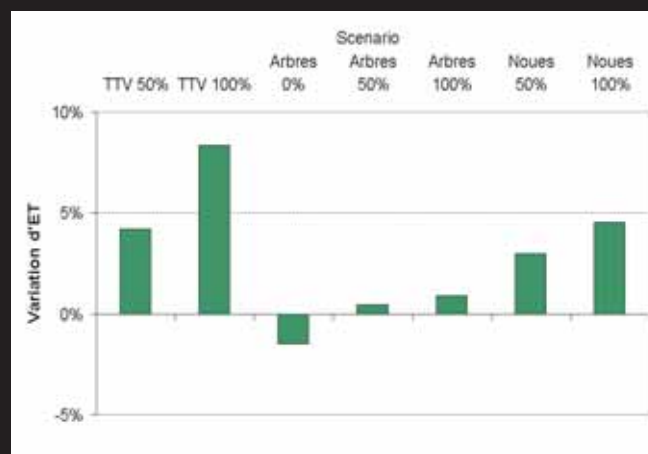
Toitures végétalisées

Arbres

Noues



F. Rodriguez - IFSTAR



F. Rodriguez - IFSTTAR

Synthèses

## Une ville verte ?

Les impacts du végétal en ville

Marjorie Musy



éditions  
**Quæ**



## IMPACTS DU VÉGÉTAL EN VILLE

FICHES DE SYNTHÈSE



Programme de recherche VegDUD - Rôle du végétal dans le développement urbain durable  
Auteurs : Guillaume Pommier, Damien Provendier, Caroline Guibaud, Marjorie Musy

**Plante&Cité**  
ingénierie de la verdure en ville

AVRIL 2014



# Conclusions

- Un effet sur le confort à bien différencier de l'effet sur la température d'air
- Des effets locaux qui dépendent du contexte urbain (densité, ouverture, fermeture du tissu urbain, type de matériaux...)
- Un effet d'atténuation de l'ICU qui dépend de la quantité de végétation et de sa répartition
- mais cet effet ne parviendra certainement pas à compenser une augmentation des émissions de chaleur dans la ville
- Un lien hydrologie-climat important (attention au hors-sol)

# Perspectives

Croiser avec les usages des espaces, les ambiances attendues...

Avancer sur la connaissance des type de végétaux en ville et la caractérisation de leurs effets

Prendre en compte les impacts sur la qualité de l'air : allergènes, COV...

Bientôt disponibles : d'autres résultats issus du projet EVA (financé par l'ADEME)



Application à Lyon Part Dieu

Impacts climatiques, hydriques, énergétiques, bilan en cout global

Avec projections en 2050

