

# La contribution thermique des toitures végétalisées

**Rafik Belarbi**  
**LEPTAB**  
**Université de**  
**La Rochelle**

**Philippe Faucon**  
**ARRDHOR CRITT**  
**Horticole Rochefort**

**Colloque Toitures Végétalisées**

**5 Décembre 2007**

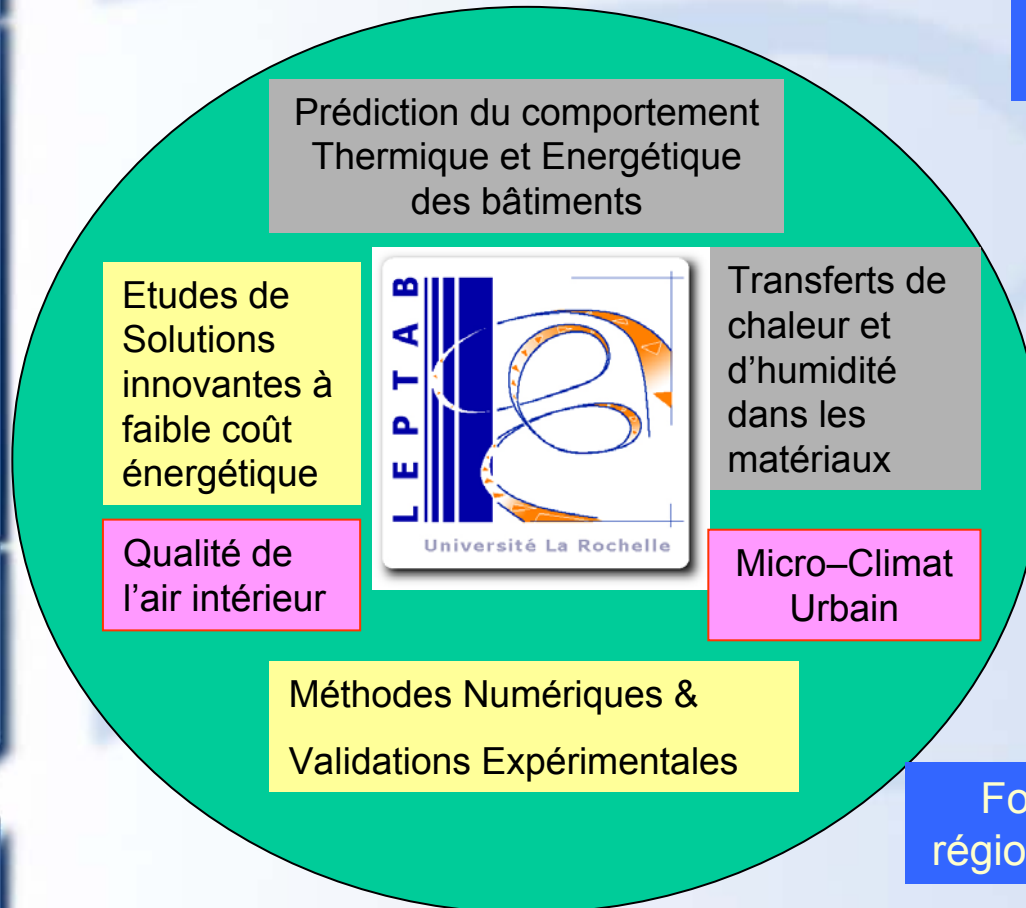
# Introduction

Déroulement de l'intervention :

- Problématique générale : liens entre bâtiment, énergie et environnement
- Réflexion et démarche engagée par le CRITT horticole et le LEPTAB, Université de La Rochelle
- Etat des connaissances et acquis de la recherche aujourd'hui
- Conclusion/perspectives

# Le LEPTAB

**10 Professeurs,  
20 Maître de conférences,  
40 chercheurs , 3 Ingénieurs**



Forte implication dans les programmes internationaux

- Annexes de l'AIE
- Programmes européens (EIE, 7ème PCRD)

Forte implication dans les programmes nationaux

- Programme Energie CNRS/ GAT Habitat (ST2I)
- IRSTV
- PREBAT
- PRIMEQUAL
- ANR
- GDR IFS et turbulence

Forte implication dans le Pôle régional Eco-industries et le CPER

***Une unité dédiée aux sciences de l'ingénieur pour l'environnement et le développement durable ciblée sur l'habitat et la valorisation des agro-ressources***

# L'ARRDHOR CRITT Horticole

Association régionale de Recherche et de Développement Horticole

Vocation :

- appui aux entreprises de la filière
- Innovation/transfert de technologies

Labellisé Centre de Ressources Technologiques  
par le ministère de la Recherche  
10 personnes dont 8 ingénieurs horticoles  
et docteurs

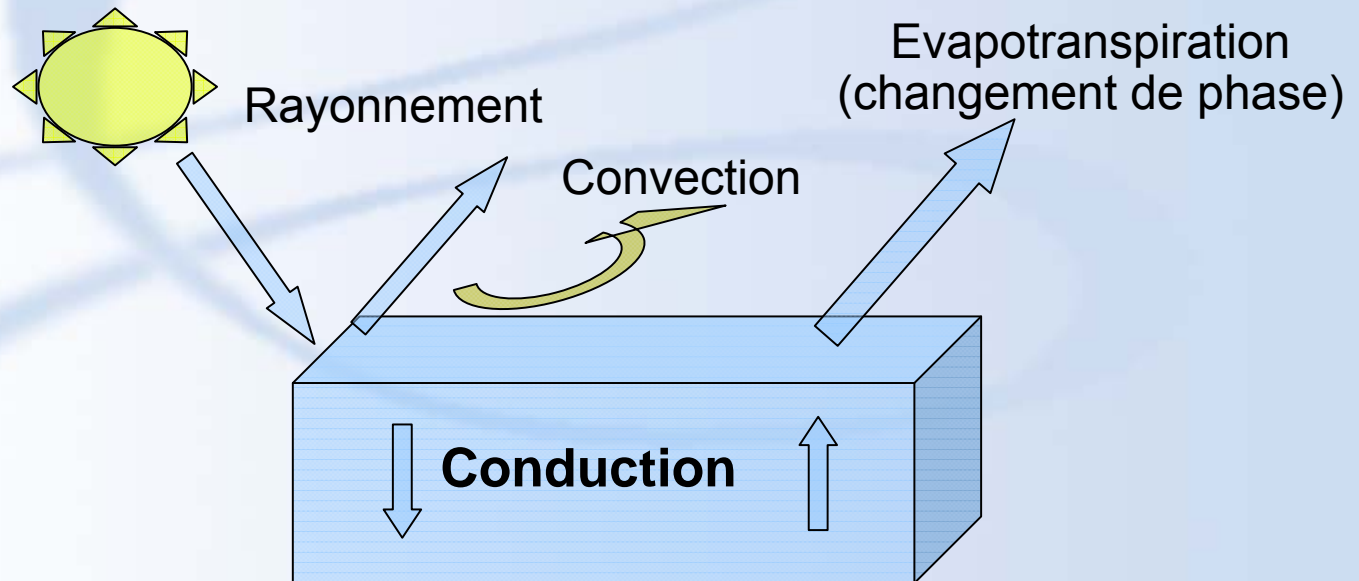
Localisation : Rochefort/Mer (17)

# Fondamentaux : thermique et bâtiment

Des phénomènes physiques en jeu :

- Convection
- Conduction
- Rayonnement

Evapotranspiration



# Conséquences pour le bâtiment

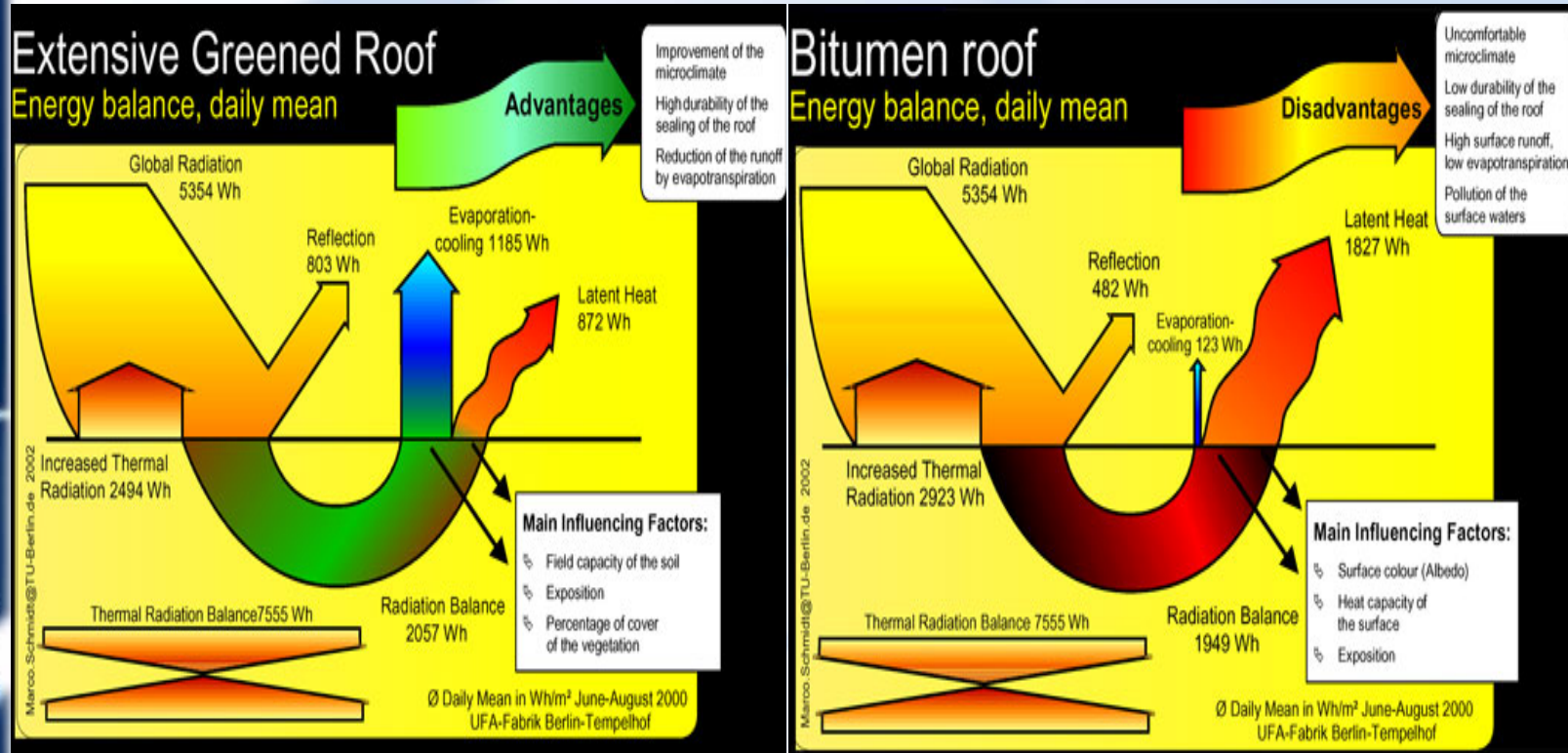
Deux cas de figure :

- le bâtiment capte plus d'énergie qu'il n'en libère :  
température (en été)
- le bâtiment libère plus d'énergie qu'il n'en capte :  
température (en hiver)

Stratégies pour équilibrer les échanges thermiques du bâtiment : chauffage, climatisation, isolation, etc...

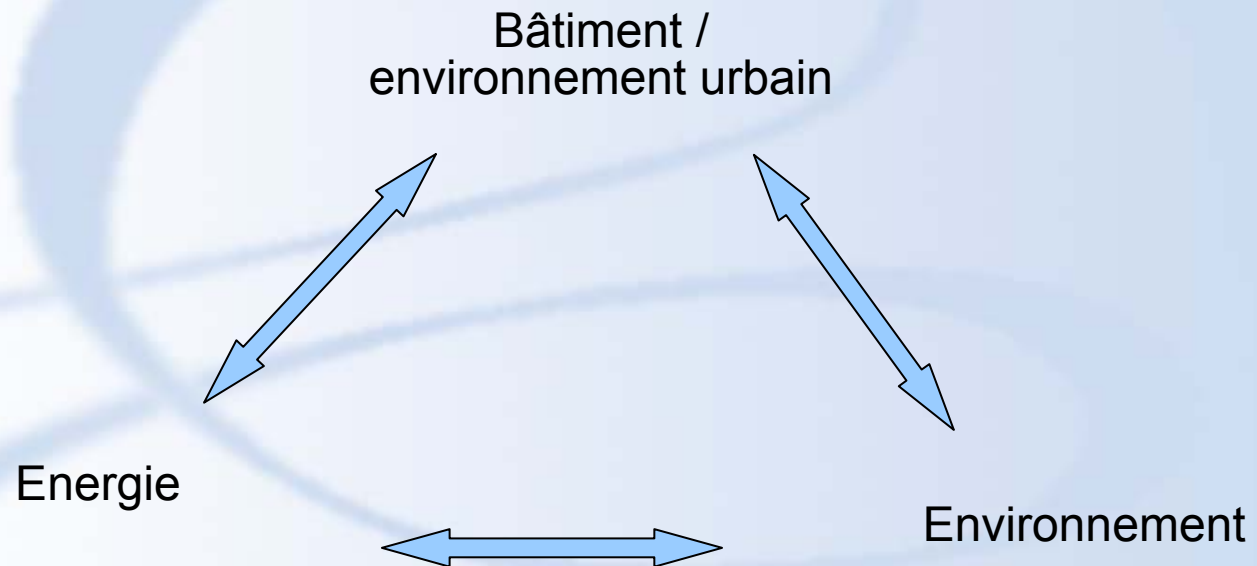
La toiture végétalisée fait partie de la boîte à outils

# Bilan énergétiques comparés



# Problématique générale

Comprendre, expliquer, et orienter les liens entre :



# Poids du bâtiment

Secteur du bâtiment :

**40%** de la demande d'énergie en Europe

Pour un développement durable :

diminuer la demande énergétique



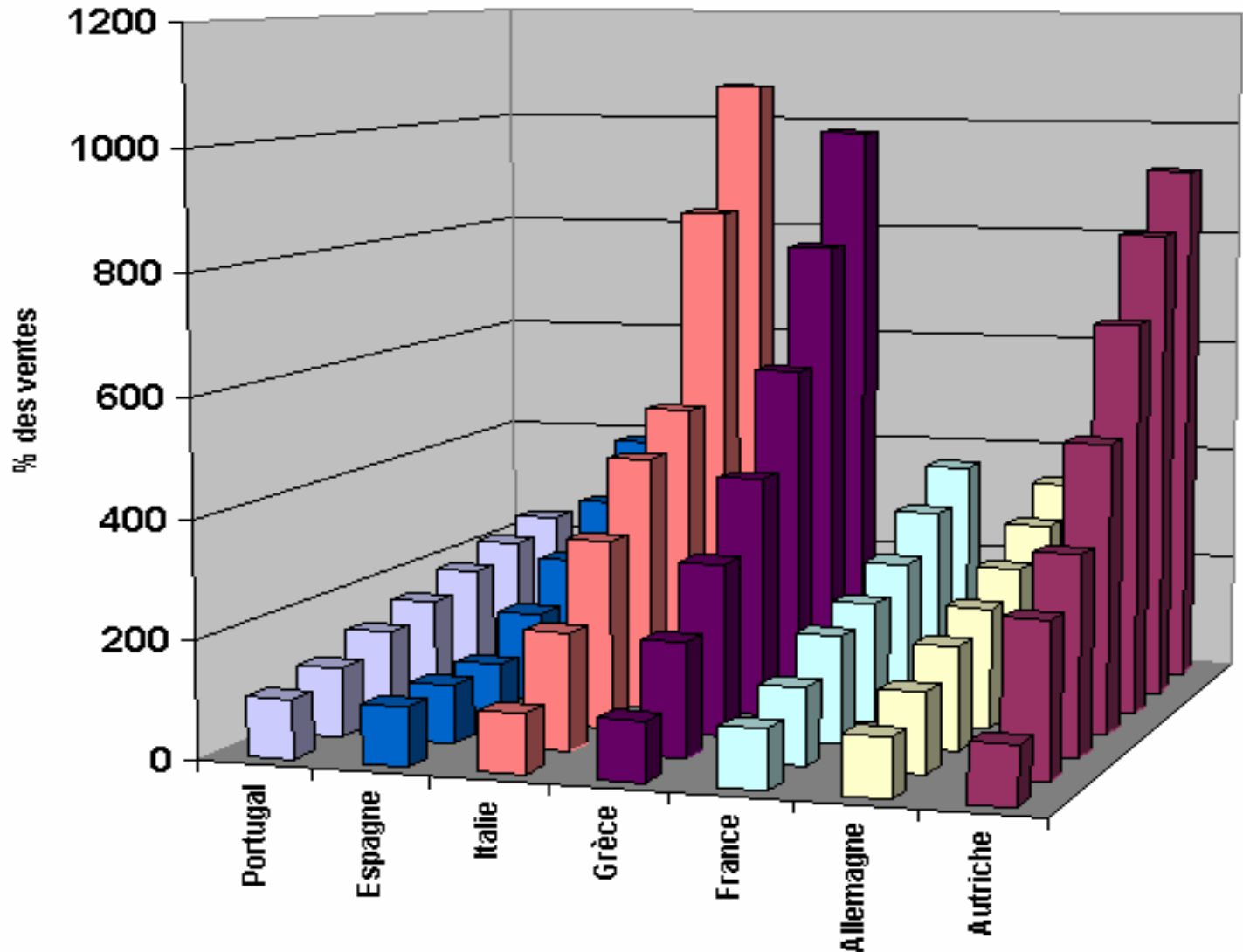
du confort intérieur

à

la demande d'énergie des bâtiments

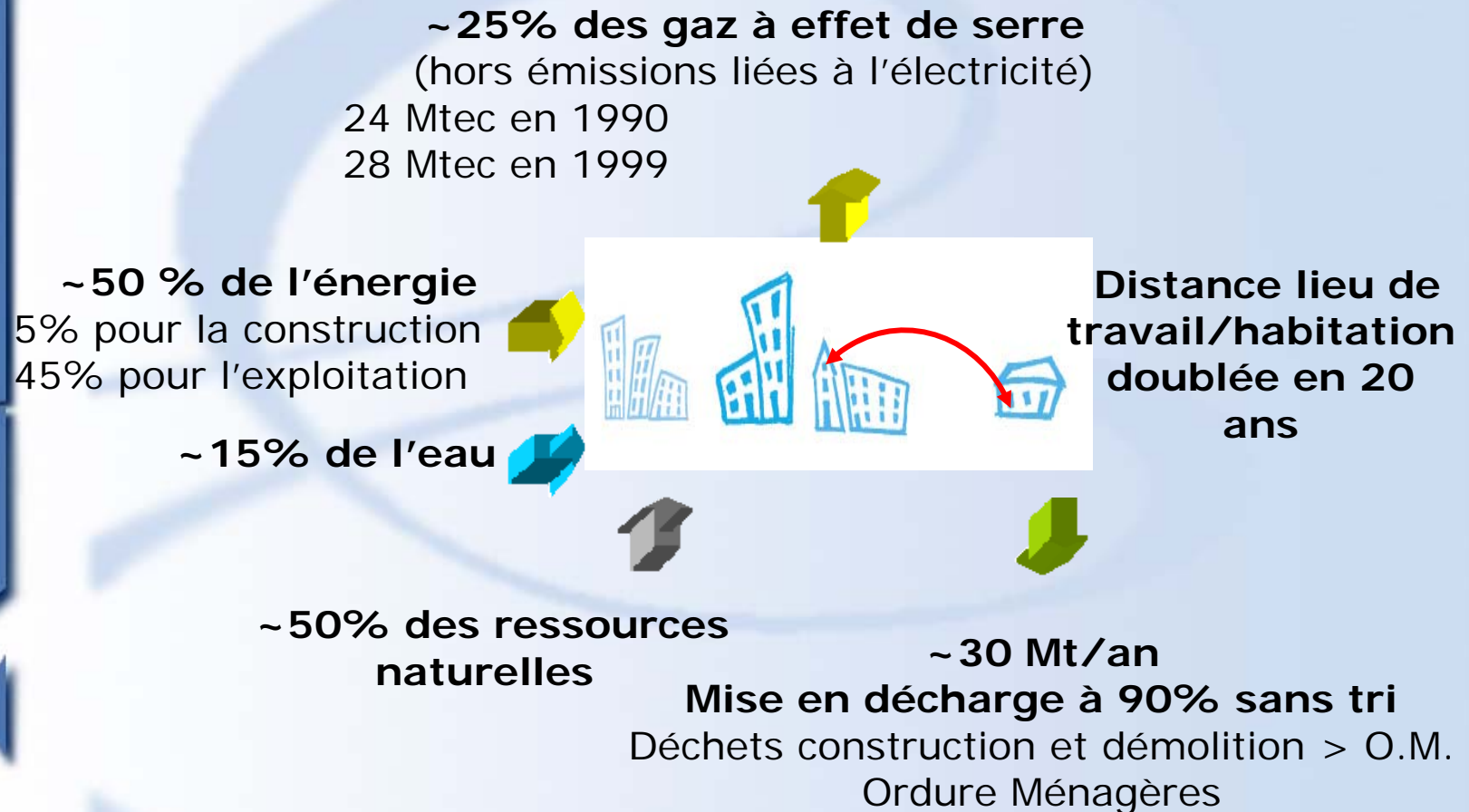
# Consommation croissante des bâtiments

Evolution du marché européen en air conditionné



# Enjeux pour l'environnement

## Part du bâtiment dans les prélèvements et rejets (France)



# Microclimat urbain en conditions d'été

Charges anthropogéniques  
(bâtiments, transports, ...)

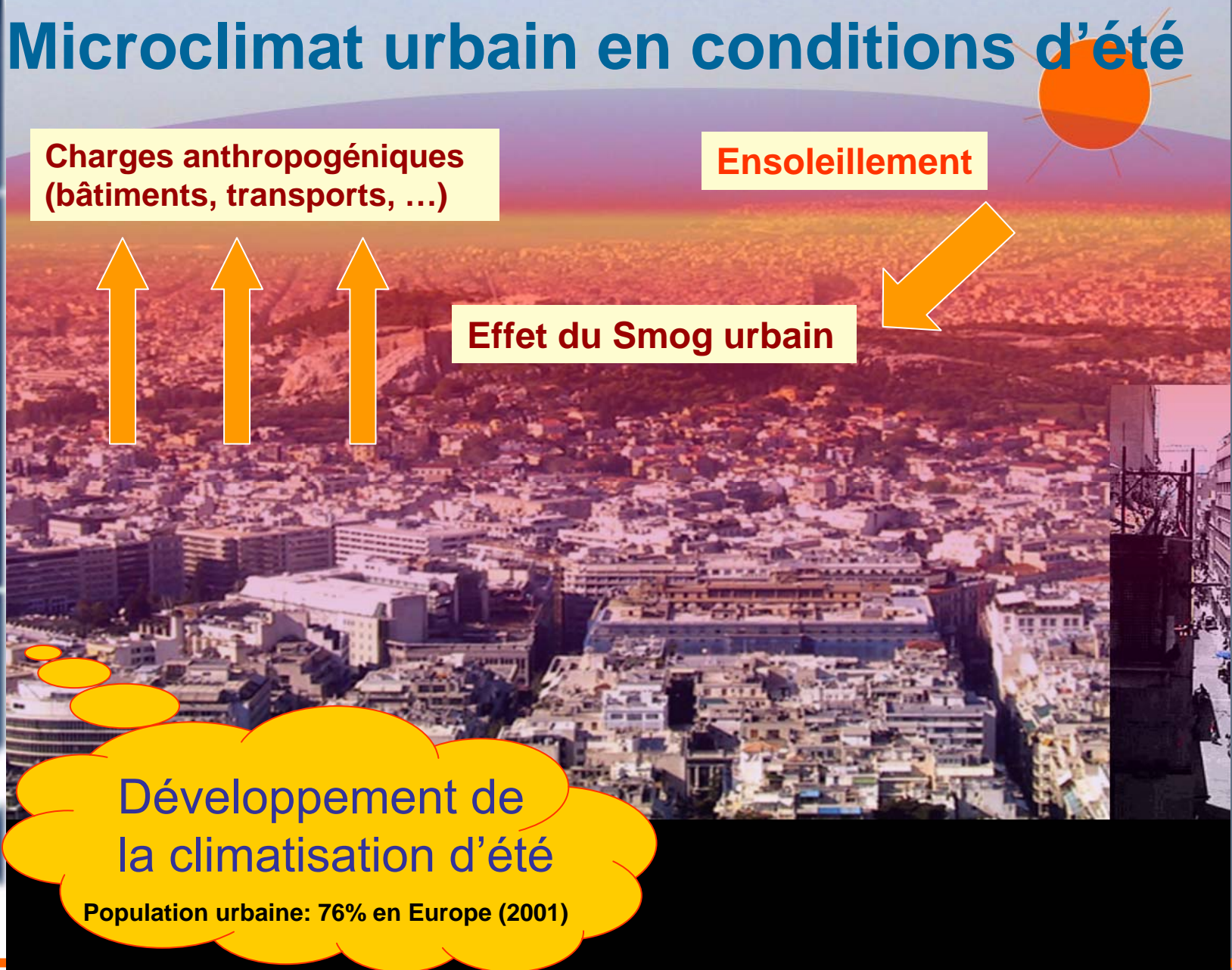


Ensoleillement



Effet du Smog urbain

Développement de  
la climatisation d'été  
Population urbaine: 76% en Europe (2001)



Athènes



Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert  
Appliqués au Bâtiment Université de La Rochelle

ARRDHOR  
CRITT Horticole  
Rochefort/mer (17)



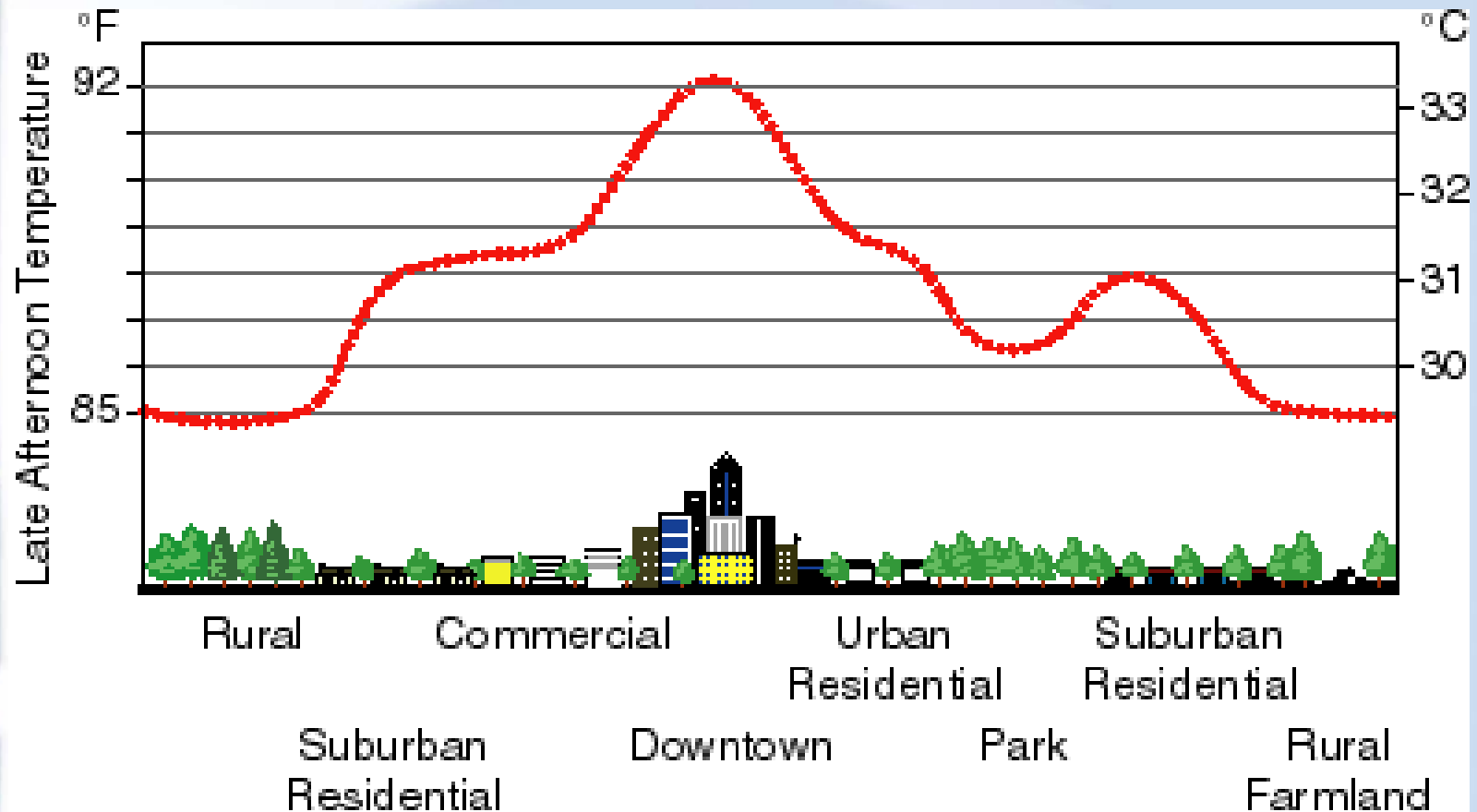
# Conséquence Microclimat urbain



- Absorption & Accumulation de chaleur du fait de la morphologie urbaine et des matériaux et de la disparition de la végétation.
- Absence de rafraîchissement par évapotranspiration des végétaux.

## 2. Ilot de chaleur

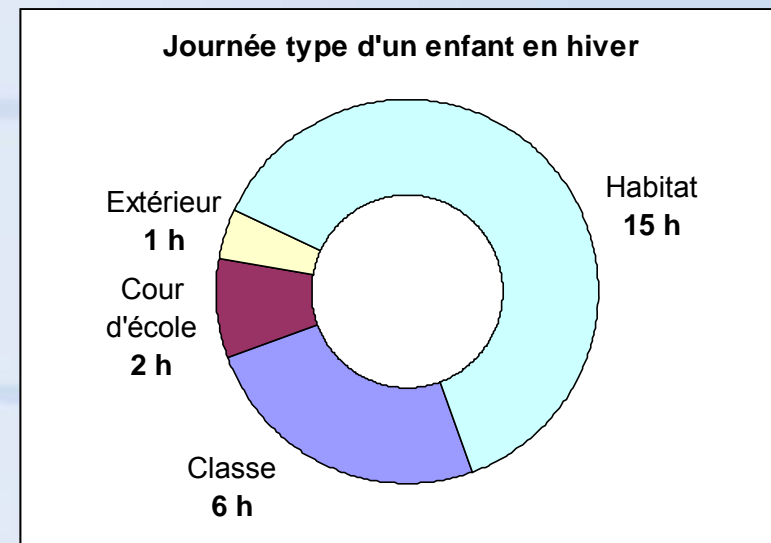
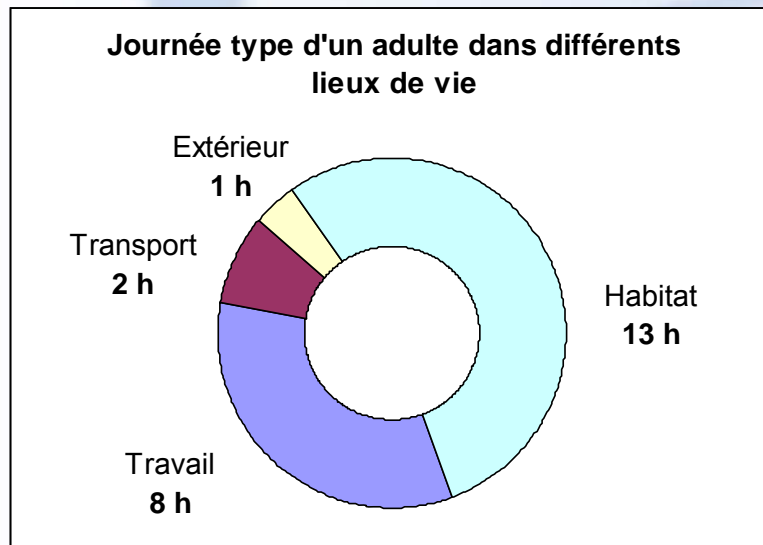
Gradient de température Ville – milieu rural 10 °C (à Athènes)



D'après « Heat Island Group » (<http://eetd.lbl.gov/HeatIsland>)

# Enjeux pour les occupants

- Plus de la **moitié de la population** mondiale vit dans les villes
- Si la tendance actuelle se poursuit **2/3 de l'humanité** devraient s'y regrouper en 2025
- En ville, on passe près de **90% du temps à l'intérieur** d'ouvrages construits (locaux de travail, écoles, domicile)

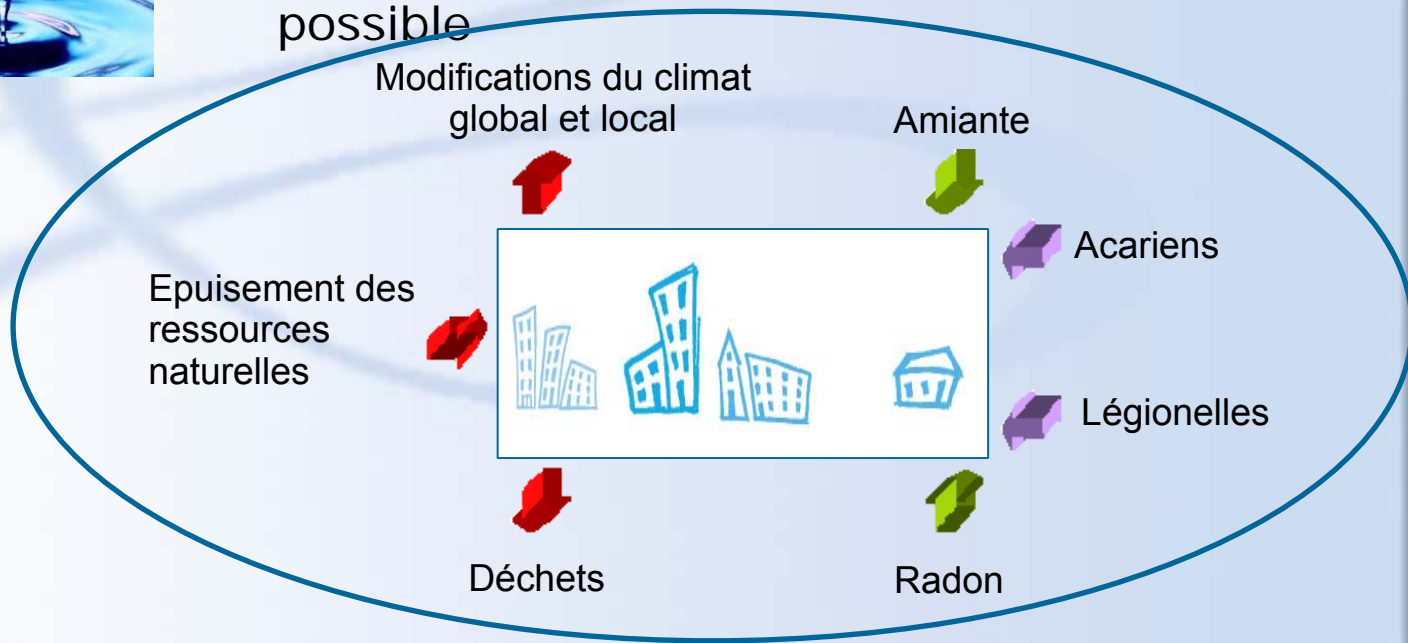


*D'après Observatoire de la qualité de l'air intérieur/CSTB*

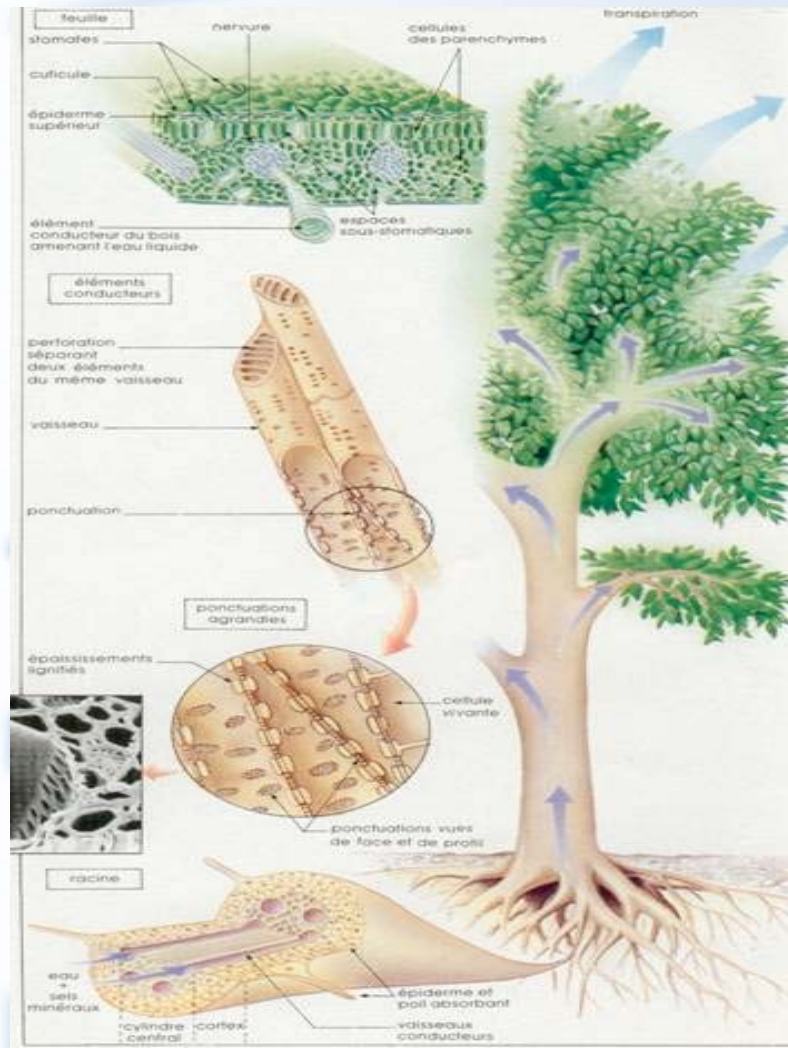
# Objectifs de l'HQE



- établir des relations harmonieuses entre le bâtiment et son environnement
- créer un environnement confortable et sain pour ses utilisateurs
- préserver les ressources naturelles en optimisant leur usage et en polluant le moins possible



# Etat des connaissances : la plante



Transpiration = cœur des plantes

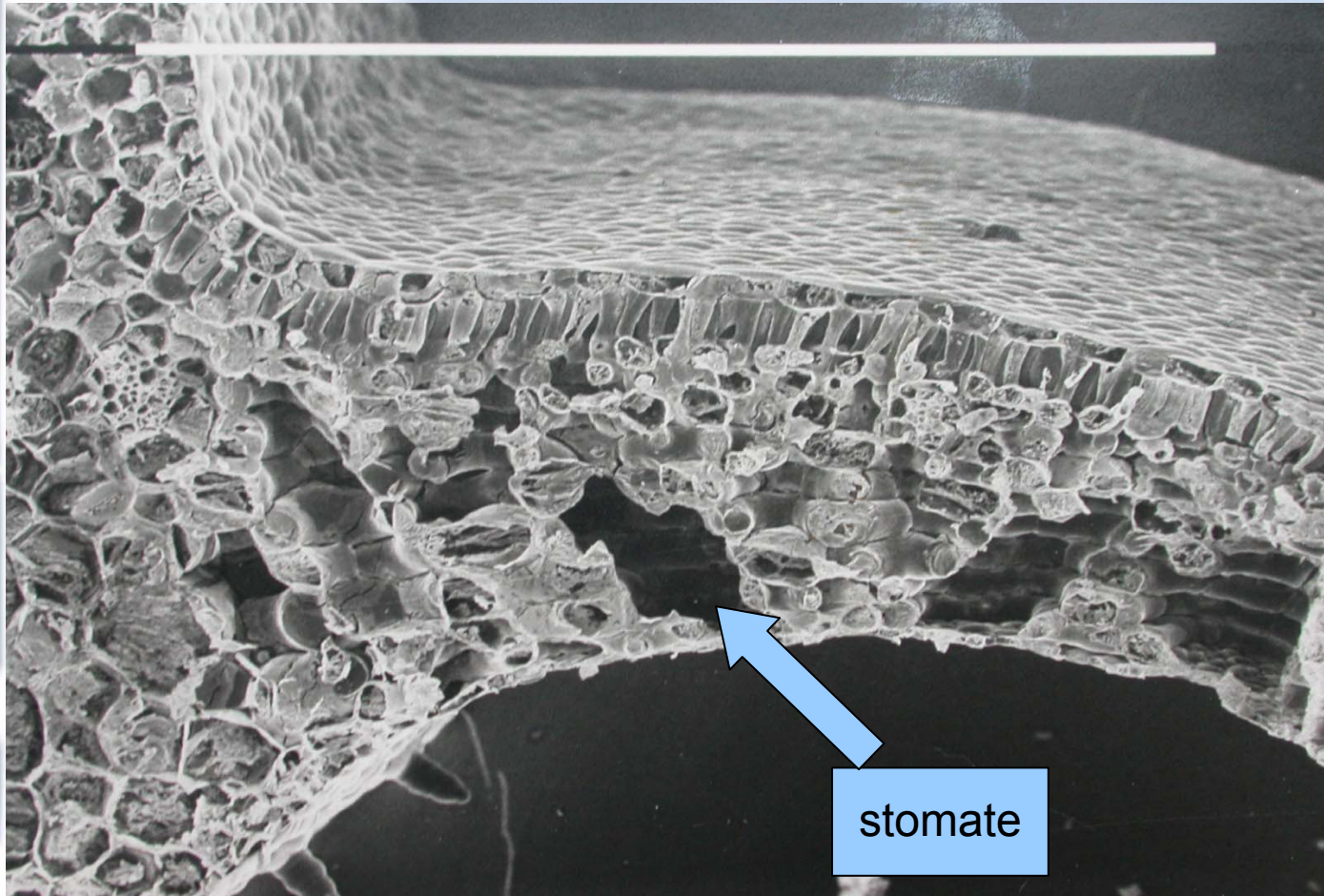
les végétaux absorbent l'eau par les racines et la rejettent par la feuille (stomates)

1 m<sup>2</sup> de feuillage évapore plus de 0,5 l/jour.

en 24 h 1 plant de tournesol élimine 17 fois plus d'eau qu'un homme

1 pied de blé évapore en une saison 95 l (125 l pour un pied de tomate, 206 pour un pied de maïs)

# État des connaissances : la transpiration



# Etat des connaissances : l'ETR

Substrat perd aussi de l'eau = évaporation

Evaporation + Transpiration = évapotranspiration (ETR)

ETR consomme de l'énergie (1 m<sup>3</sup> d'eau = 680 kWh) par transformation d'eau liquide en vapeur

Conséquence : baisse de la température (= sueur)

*1 m<sup>2</sup> de gazon peut évaporer 5 litres d'eau par jour*

*selon M. Schmidt (TU Berlin) : moyennes 1987 à 1989 sur TEV précipitations = 588 mm (1 mm = 1 l/m<sup>2</sup>)*

*drainage = 145 mm*

*ETR = 443 mm*

*Energie absorbée par ETR = 302 kWh/m<sup>2</sup>*

# ETR : suite

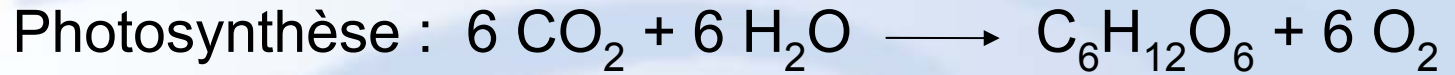
ETR fonction de

- Rayonnement reçu
- Flux de chaleur du sol
- Température de l'air
- Vitesse du vent
- Humidité de l'air
- Espèce végétale et état de la végétation

Toitures végétalisées cumulent les facteurs aggravants d'où importance de la conception sur l'ETR

- Choix de végétaux adaptés
- Substrat et teneur en eau du substrat
- Environnement immédiat

# Adaptation à la sécheresse



1ère étape : E lumineuse convertie en E chimique

2e étape : E chimique sert à transformer le CO<sub>2</sub> en matière végétale, au cours d'une série de réactions.

1ère molécule formée : 3 carbones = plante en C3 (majorité des espèces).

Certaines espèces transforment d'abord CO<sub>2</sub> en molécule à 4 carbones (plante en C4).

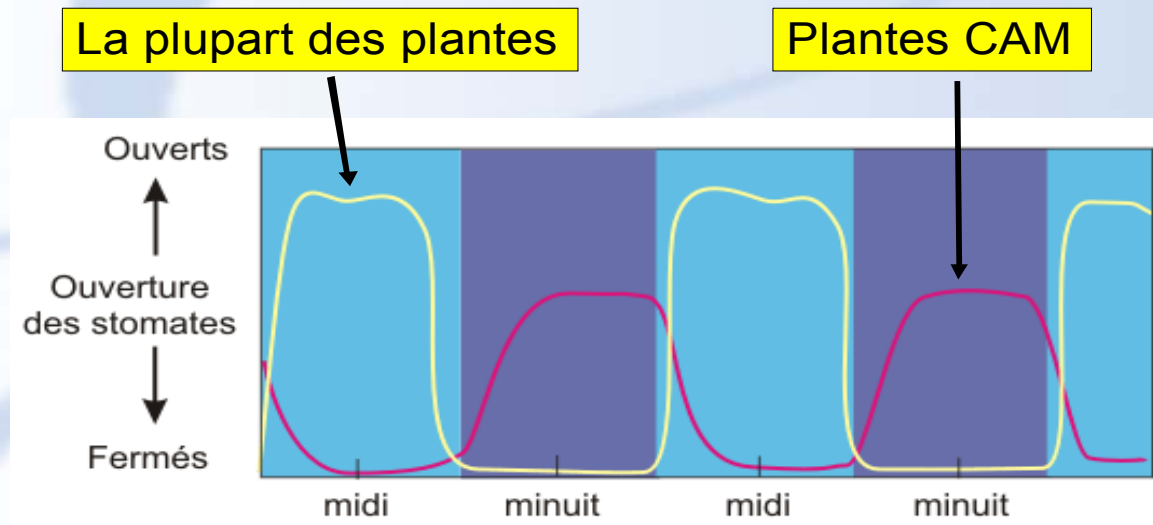
Transformation faite par enzymes avec taux de CO<sub>2</sub> faibles.

La plante a moins besoin d'ouvrir ses stomates : elle « transpire moins » et supporte mieux les sécheresse

Exemple de plantes en C4 : sorgho, canne à sucre, bougainvillées, pourpier

# Adaptation à la sécheresse

D'autres plantes utilisent un principe différent dans le temps nuit : stomates ouverts : entrée de  $\text{CO}_2$   
jour : stomates fermés : pas d'entrée de  $\text{CO}_2$ , mais formation de sucres



= plantes CAM (Métabolisme Acide Crassulacéen = Crassulacean Acid Metabolism)

Exemples de plantes CAM : Sedum, Cactus, Ananas, Agaves....

# Etat des connaissances : la recherche

- Opérations pilotes pour des collectivités, des fournisseurs, des interprofessions : Toronto, Chicago, Seattle, Berlin, Zinco, Greengrid

**Problématique** = améliorer les connaissances pour orienter l'urbanisme

- Travaux de recherche d'organismes d'état (BCIT, CSTC) et d'universitaires (universités de Neubrandenburg, Berlin Athènes, Pennsylvania State university, Michigan State University, Toronto)

**Problématique** : quantifier les avantages des TEV, vulgariser la technique, participer à l'innovation

# Toronto : impacts sur bâtiments

Source Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of Toronto – Ryerson University (2005)

**Table 4.5**  
**Direct Energy savings from green roof implementation**

Savings category	Amount of saving per sq. m. of green roof area
Direct energy savings	4.15 kWh/ sq. m./year
Demand Load reduction from direct energy reduction	0.0023kW/ sq. m. peak

Gains si 75 % des surfaces disponibles végétalisées :  
21 millions de \$ économisés sur électricité

Réduction de la demande d'électricité lors de pics =  
114,6 MW (1 réacteur de centrale nucléaire ~ 1000 MW)

Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> : 56 300 tonnes/an

# Toronto : ilot de chaleur urbain

Hypothèse 75 % des toits couverts avec toiture végétalisée

Energie économisée = 2,37 kWh/m<sup>2</sup> de toit vert  
coût correspondant : 12 millions de \$

Réduction des pics de consommation : 133 MW

Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 32 200 tonnes

# Chicago

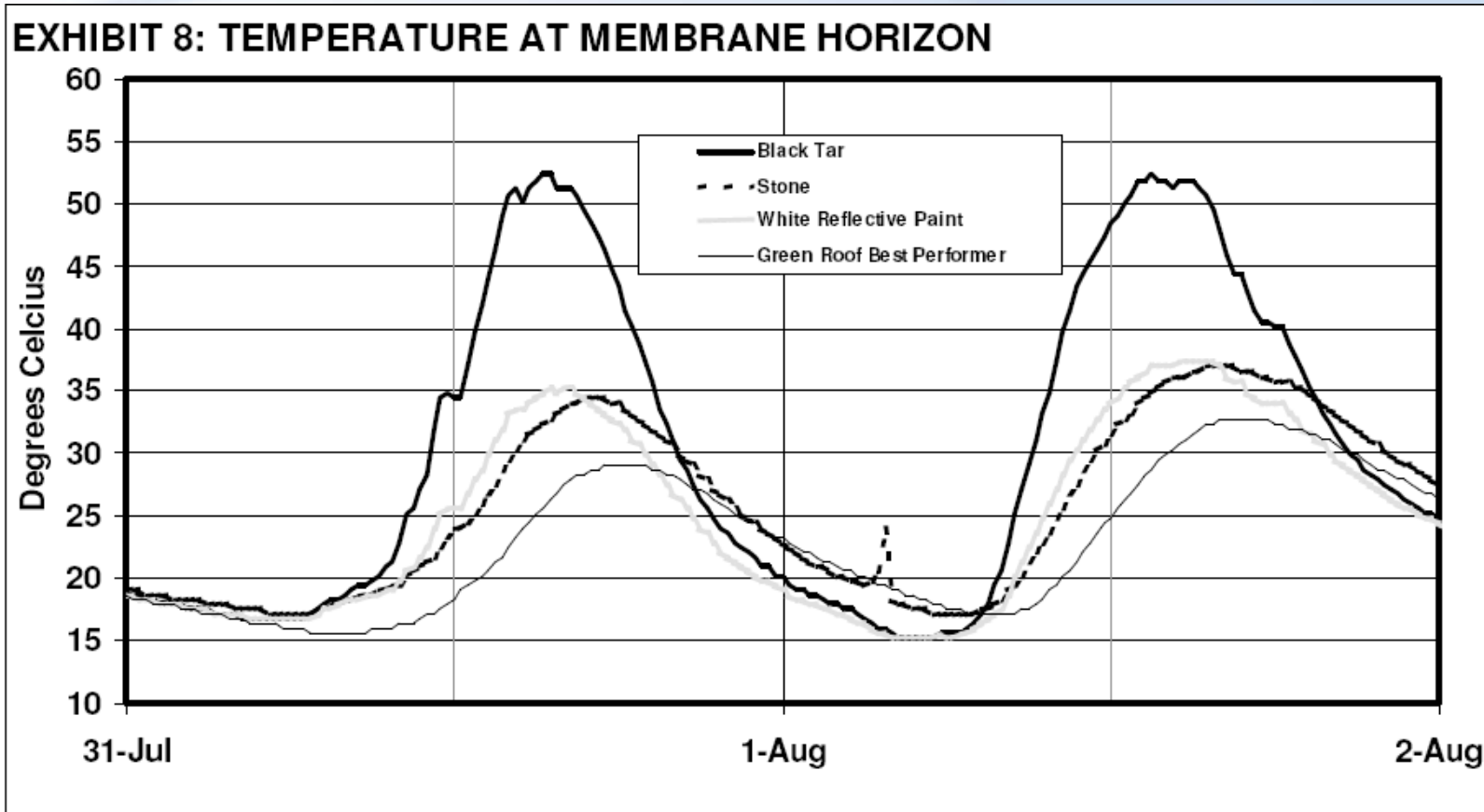
Comparaison et suivi de toits experimentaux de 4 m<sup>2</sup> :

- régime des eaux
- énergie

Dispositif



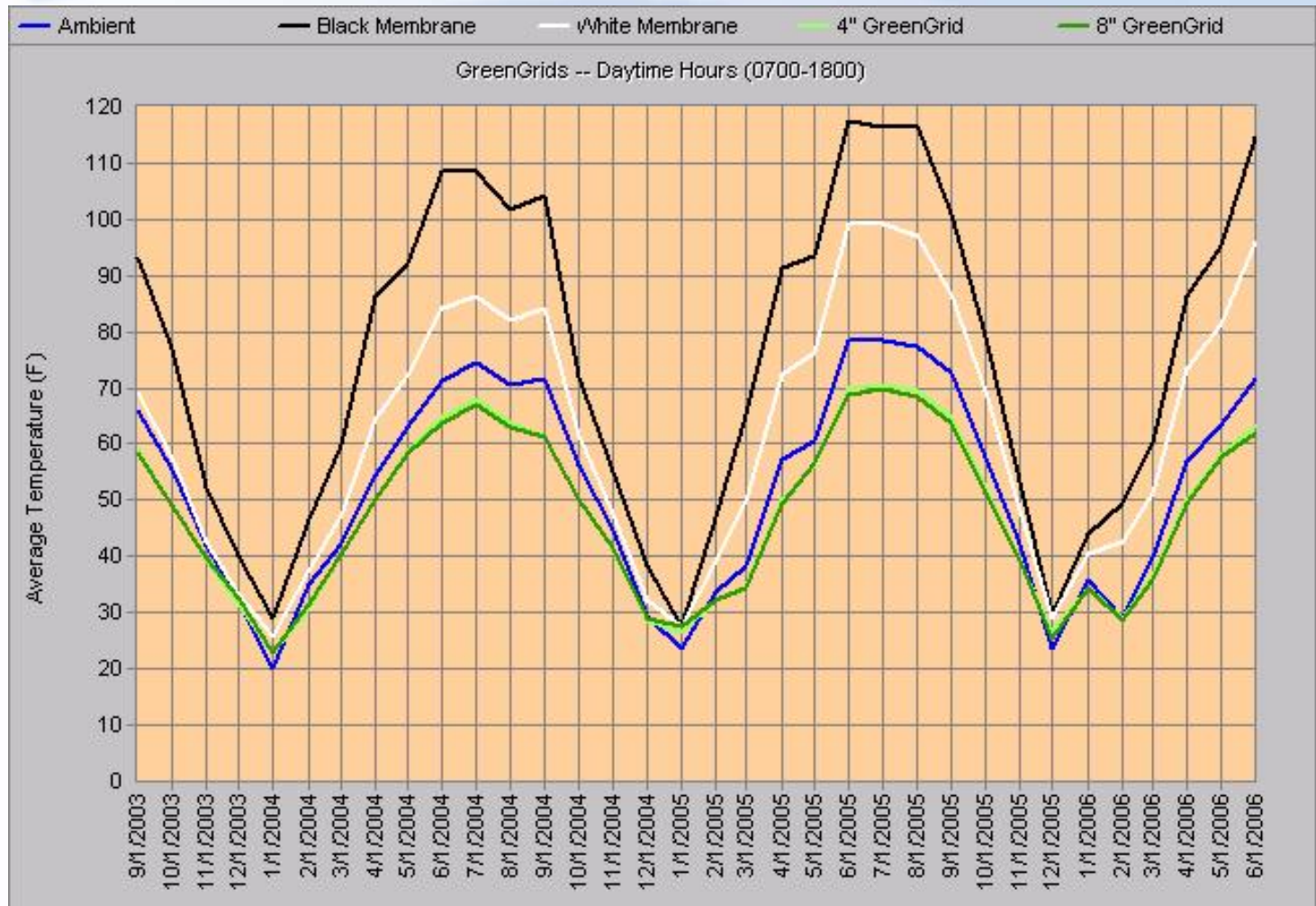
# Chicago : résultats



Suites : incitations fiscales, généralisation dans bâtiments publics, centre de ressources pour les particuliers et professionnels

# Greengrid (fabricant US de TEV)

<http://www.greengridroofs.com/system/livetempdata.htm>



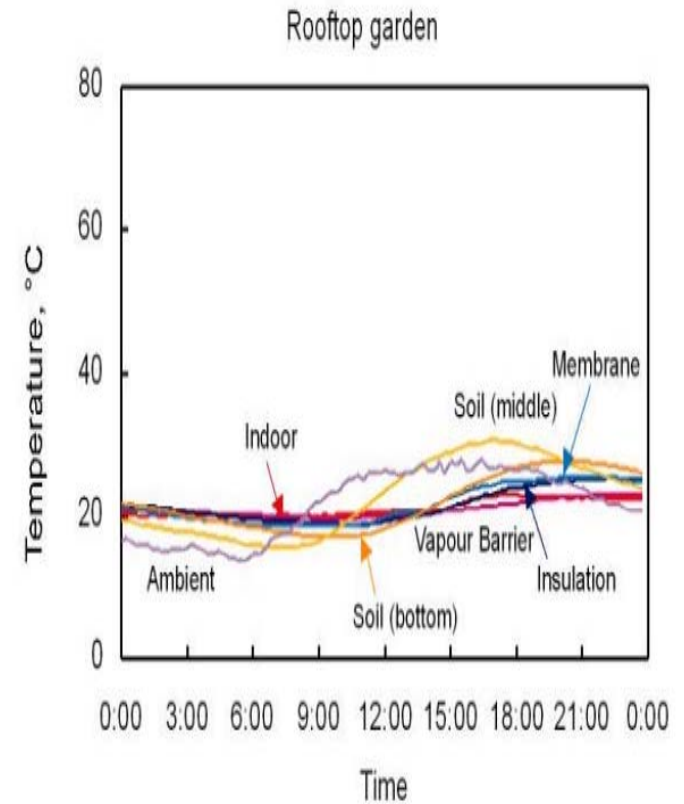
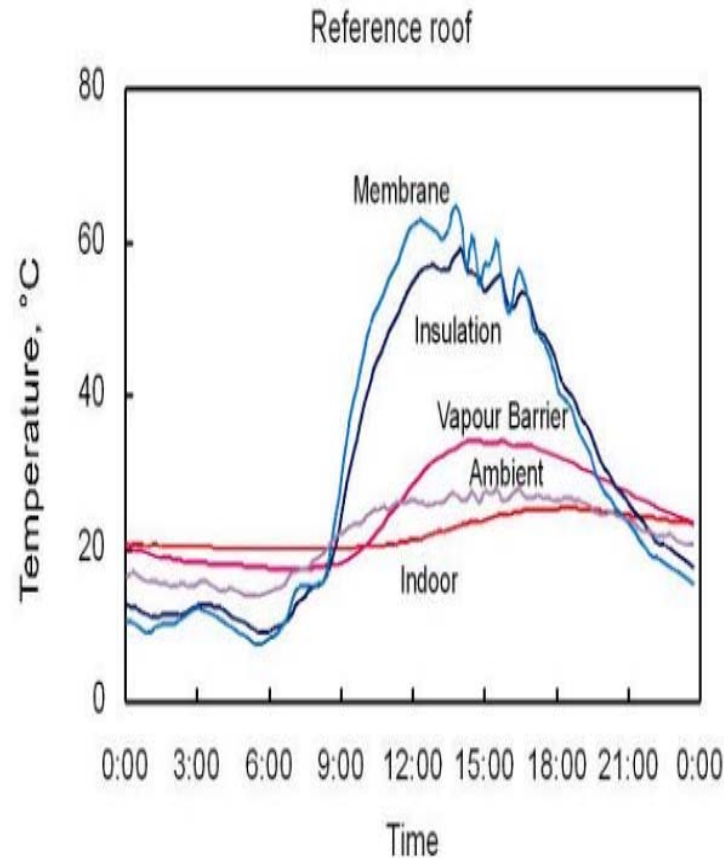
# British Columbia Institute of Technology (Vancouver)



*Green Roof Research Facility, Vancouver, BC, Canada*

# Effet des TTV sur la température

Travaux de Karen Liu et Brad Bass (BCIT)



# Effet des TTV sur la demande énergétique moyenne journalière

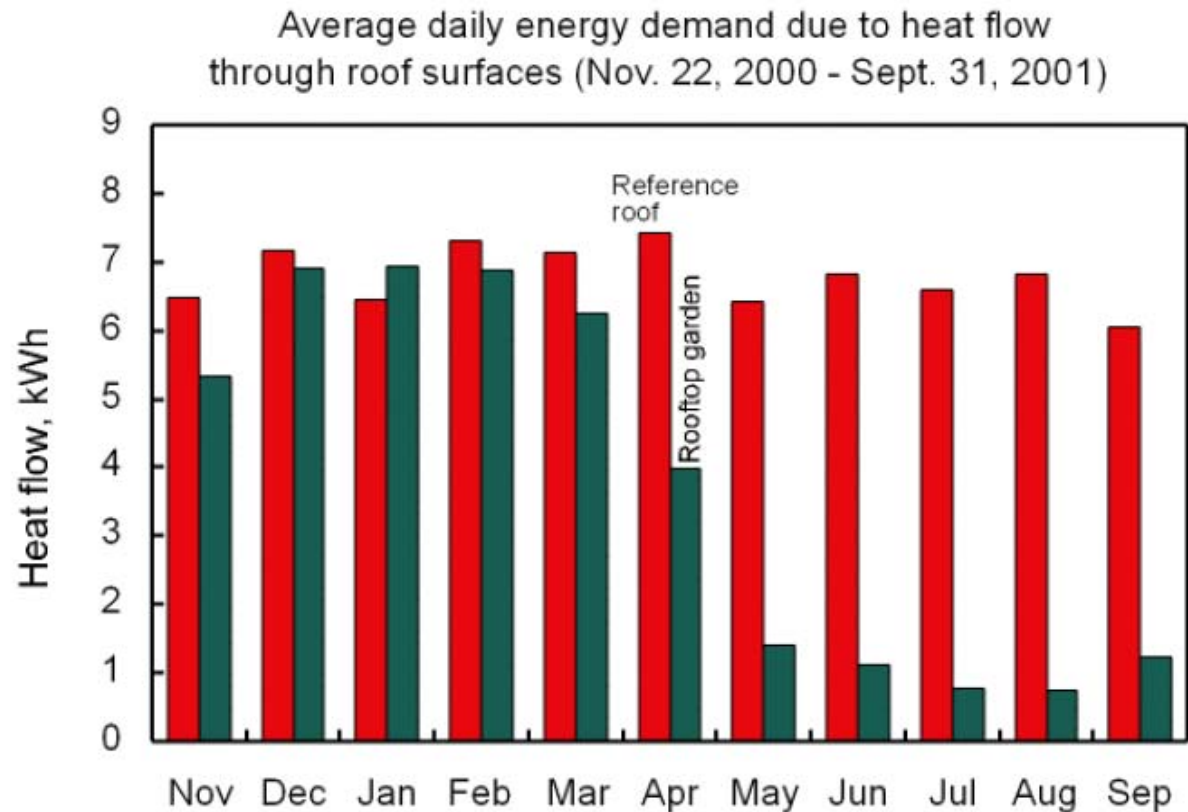


Figure 5 – Heat flow measurement showed that the average daily energy demand due to the heat flow through the rooftop garden was less than that of the reference roof in the spring and summer.

La TTV assure une réduction de la demande énergétique journalière

# Effet des TTV sur la température dans le substrat

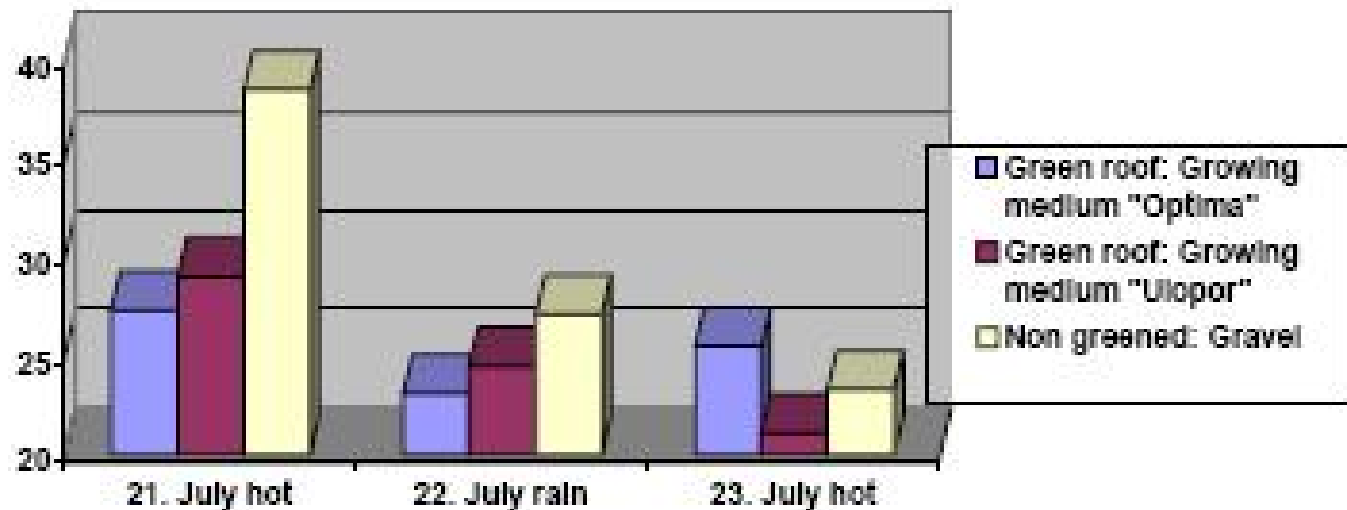


Fig 2: Temperature inside two substrates: Green-optima, Green Ulopor and under a gravel layer just above the sealing layer. Av. day temperature (x mean from 5 minute – value of the days) (Pt-100 – Values)

La TTV permet une réduction de la température dans le substrat pouvant dépasser 6 °C (d'après Köhler/Schmidt/Laar)

# Effet de la TTV sur la température de surface

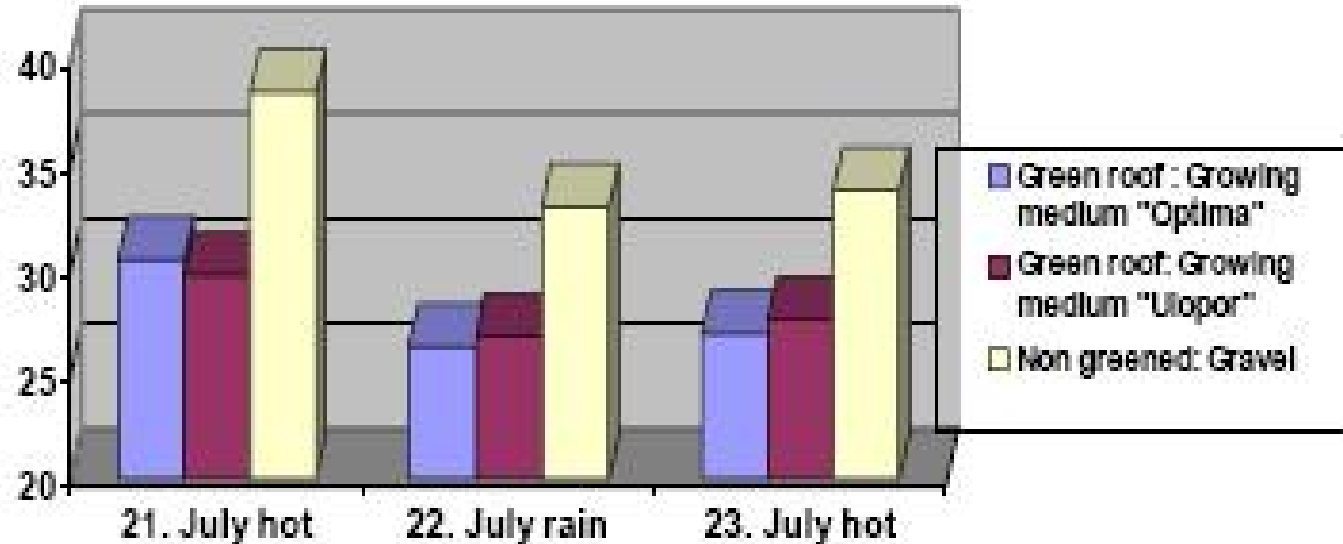


Fig. 3: Average surface temperature of two different green roofs and of a gravel layer (Infrared-temperature measurements) on a hot summer day (21<sup>st</sup> of July), on a rainy day (22<sup>nd</sup> of July and on the following day).

Réduction de  $T_{\text{surface}}$  de l'ordre de 5 °C  
(d'après Köhler/ Schmidt/Laar)

# Autres résultats

Wong et al. 2003 : flux de chaleur sur 24 h sur toit végétalisé = 10 % du flux pour un toit référence (Singapour)  
possibilité de baisser la température ambiante de 4°C en conditions tropicales

Onmura et al. (2001) : réduction du flux de chaleur sur 1 an de l'ordre de 50 % (japon)

Saiz et al. 2006 (Espagne) : lors d'un pic de chaleur, besoin de refroidissement réduit globalement de 10 % sur un bâtiment (- 25 % pour le dernier étage, puis -9 %, -2 % et -1 %)

# Synthèses/Bilans

Les effets positifs des TEV sur le climat des bâtiments ont été constatés et expliqués soit sur des modules expérimentaux, soit sur des bâtiments existants

A notre connaissance, pas de travaux en France sur le sujet. Les données disponibles viennent d'Allemagne, d'Amérique du Nord .....

Tous les travaux voient la TEV globalement, sans détailler le rôle de chaque composant (végétaux, substrat, couche de drainage, isolation)

# Synthèses/Bilans (suite)

## Mais

Fort besoin d'information des maîtres d'ouvrage :  
outil de prédiction des performances thermiques

Il existe des marges de progression et d'innovation

D'où l'intérêt de la démarche entreprise par le  
LEPTAB et le CRITT Horticole

# Méthodologie : 1<sup>ère</sup> étape : Compréhension et maîtrise des phénomènes physiques en jeu

Etudes des phénomènes de transfert de masse et de chaleur à l'échelle des composants du bâtiment, et à l'échelle de l'environnement extérieur

***Bâtiment*** : Forme architecturale, Composants, matériaux, Orientation, Inertie thermique, échanges entre intérieur et extérieur, facteur de forme.....

***Environnement proche du bâtiment*** : effet d'îlot de chaleur urbain....

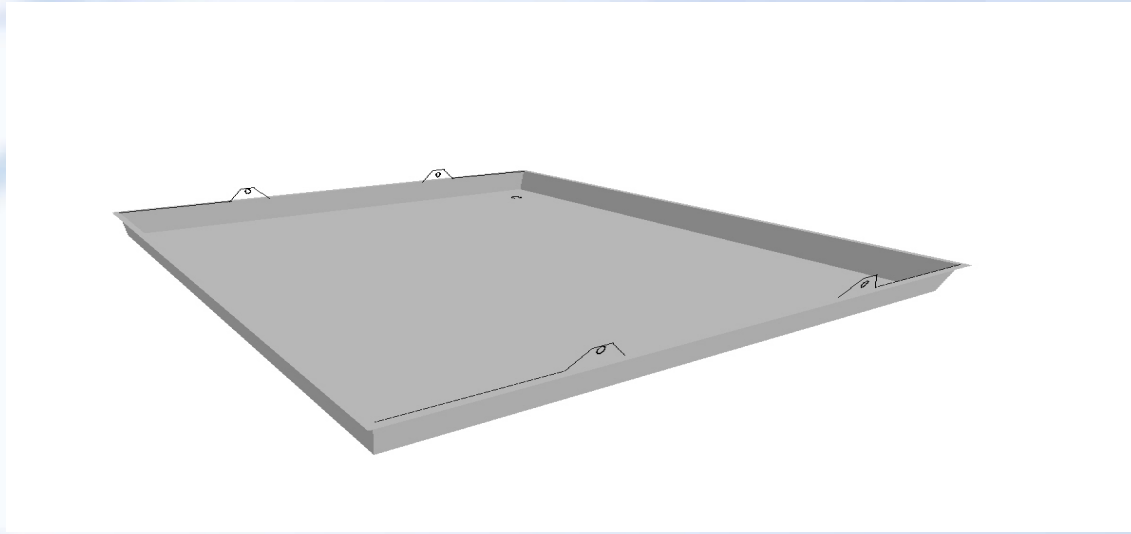
***Biologie, Ecologie et Agronomie*** : physiologie végétale, éco-sociologie, fonctionnement physique et chimique du substrat.....

**Nécessité d'une approche pluridisciplinaire :**  
**TEV = Génie civil + Génie végétal**

# Méthodologie : 2<sup>e</sup> étape = caractérisation

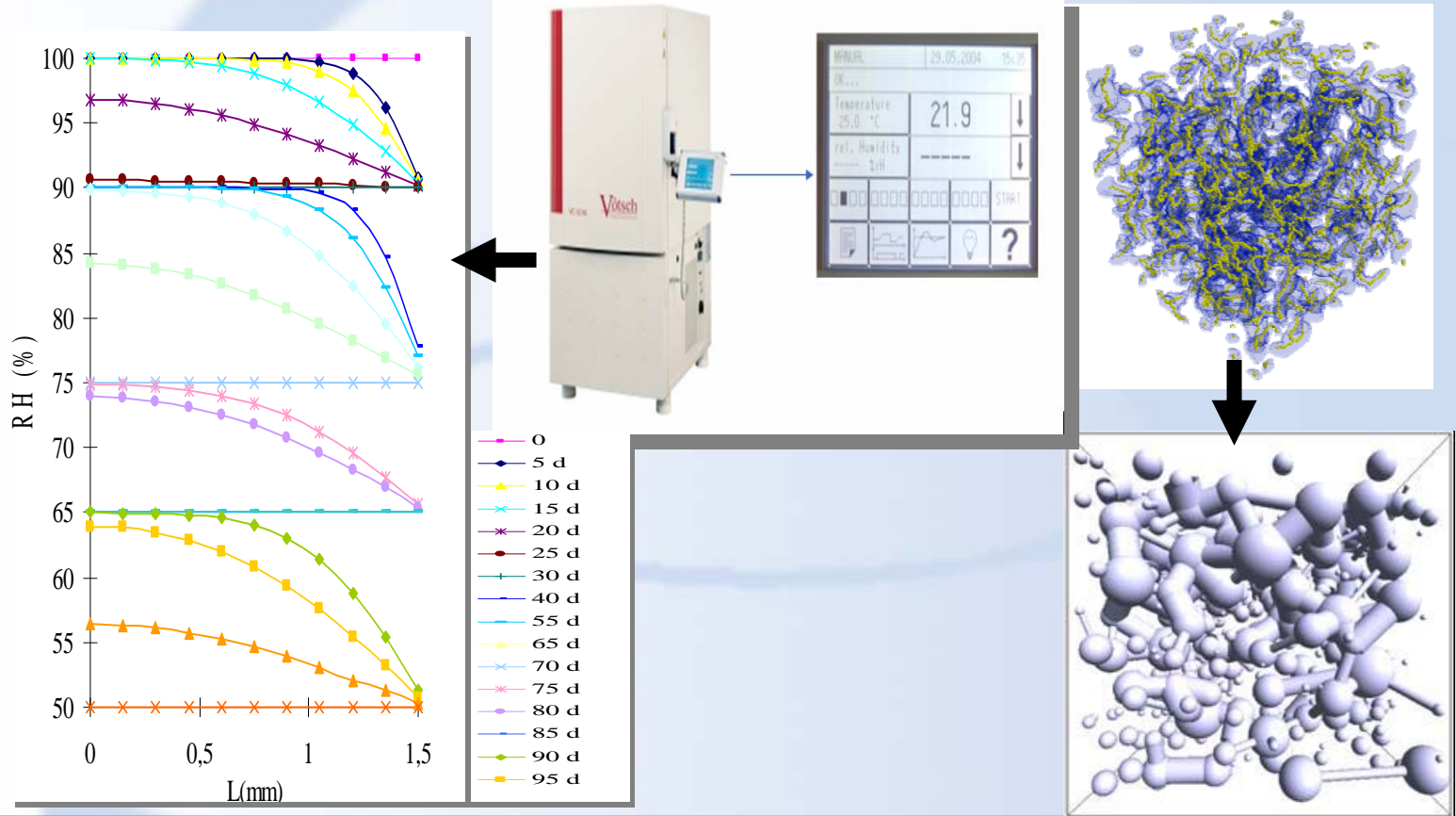
= Quantification du comportement de chacun des composant des TEV

Outil = modules mobiles de 1,8 m x 1,8 m pour faire varier les paramètres et mesurer : échanges de chaleur, teneur en eau, coef d'isolation, de réflexion, taux de couverture, indices foliaires.....



# Méthodologie : 2<sup>e</sup> étape = caractérisation à l'échelle du composant TTV

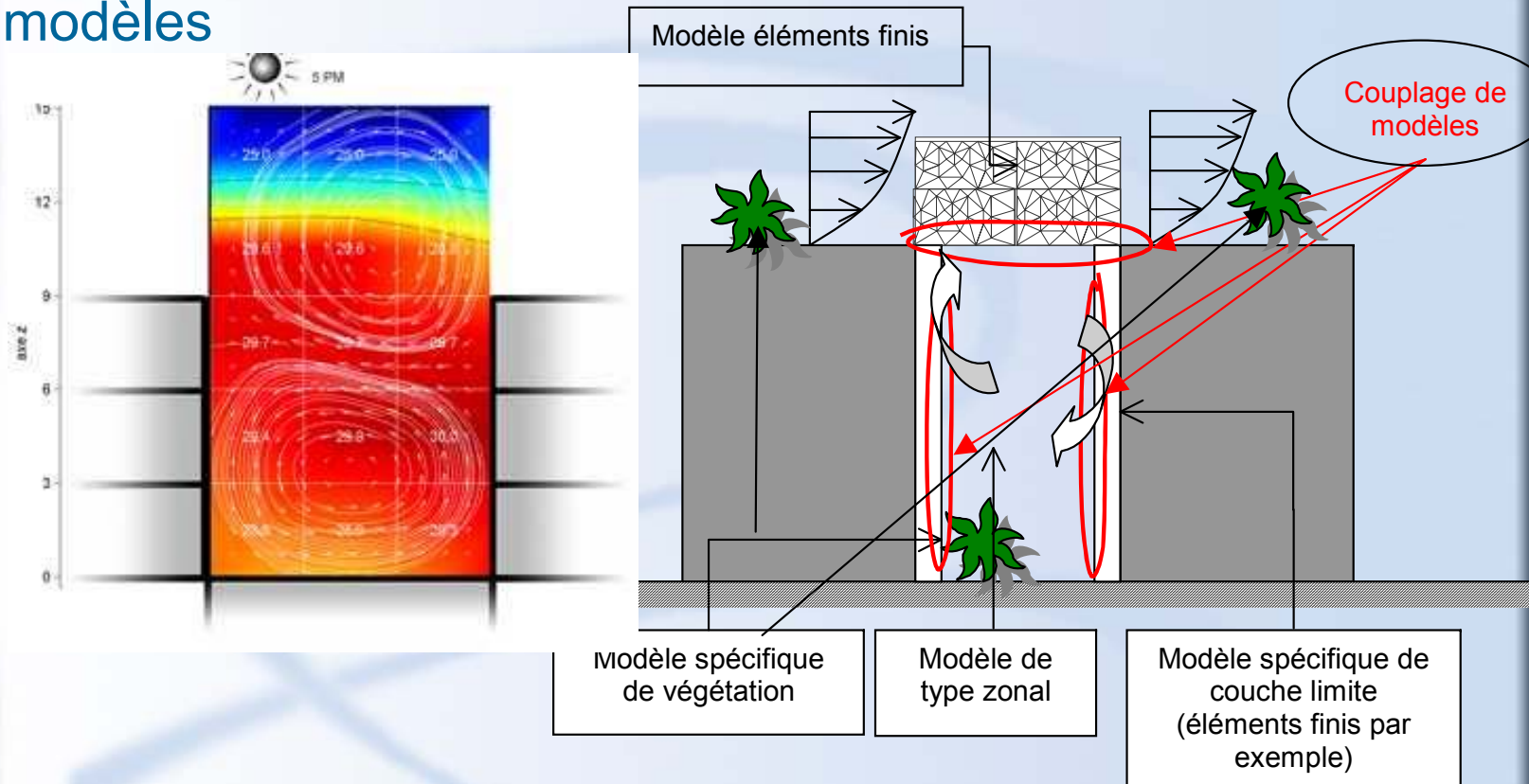
- ✓ Caractérisation du point de vue thermique :
- ✓ Caractérisation du point de vue hydrique
- ✓ Caractérisation du point de vue micro structurel



# Méthodologie : 3<sup>e</sup> étape mise au point de la modélisation à l'échelle du composant TTV

- Traduire les phénomènes physiques mis en jeu à l'échelle de la TTV sous forme mathématique (modèle mathématique) en prenant en compte les résultats obtenus durant la phase de caractérisation
- Définition des phénomènes physiques (Transfert de chaleur et Transfert hydrique)
- Choix des approches de modélisation
- Mise en équation de chacun des phénomènes
- Couplage de ces phénomènes (interaction)
- Evaluation du comportement des TTV pour différents scénarii
- Définition des paramètres les plus influents

# Méthodologie : 4<sup>e</sup> étape : implémentation des modèles



- Intégration des modèles développés dans un code de calcul évaluant le comportement des bâtiments
  - ☑ Evaluation de la performance énergétique des bâtiments
  - ☑ Evaluation du degré de confort intérieur
  - ☑ Evaluation de l'incidence sur le micro-climat urbain
  - ☑ Chiffrage des gains réalisés dans les Bâtiment avec TTV

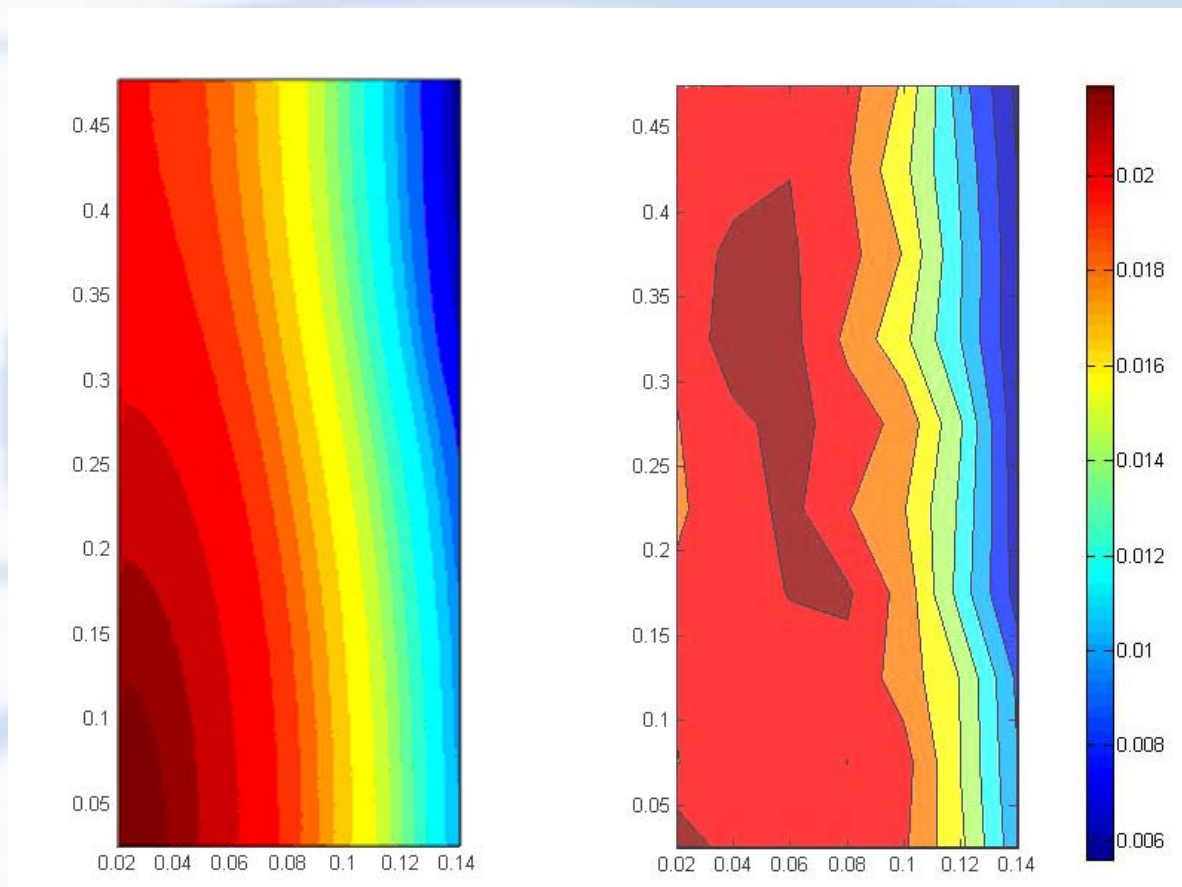
# Méthodologie : 5<sup>e</sup> étape : validation des modèles

## **Buts de cette phase**

Vérifier sur les modules expérimentaux et sur des bâtiments existants que les modèles mathématiques utilisés sont corrects et que les simulation numériques prédisent fidèlement ce qui se passe à l'échelle du bâtiment et du micro-climat urbain

- **Au point de vue énergétique**
- **Au point de vue confort thermique,**
- **Au point de vue environnemental**

# Méthodologie : 5<sup>e</sup> étape : Exemple de validation des modèles sur une parois d'un bâtiment



(a) modèle

(b)

mesures

Comparaison de la distribution de la teneur en humidité ( $\text{kg.kg}^{-1}$ )  
obtenues par le modèle et celle issue des expérimentaux

# Méthodologie : 6<sup>e</sup> étape : prédiction et optimisation

## **Modélisation validée permettra de :**

Prédire les performances énergétiques d'un bâtiment, en fonction de :

Sa localisation

Son environnement proche

Le type de toiture installée

## **Des études de cas permettront :**

Pour chaque condition climatique et typologie de bâtiment et le composant de la TTV qui procure

De procurer le confort maximum à moindre coût énergétique et environnemental

# Finalités/objectifs de notre action

Plusieurs finalités et objectifs :

☑ Donner des informations aux maîtres d'ouvrage

☑ Chiffrer les gains espérés

*(Confort, consommation énergétique, bilan CO<sub>2</sub>, temps de retour sur investissement),*

☑ Orienter les politiques publiques d'urbanisme

☑ Optimiser les systèmes de TEV en fonction des conditions particulières du lieu

☑ Faciliter et accélérer l'innovation

# Finalités/objectifs de notre action

