

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

Xavier Briottet (ONERA, Toulouse) et Nicolas Ferlay ( LOA, Université de Lille)

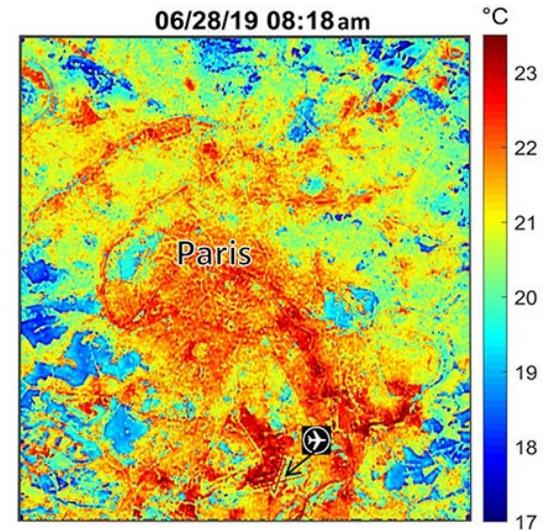
*Instrumentation pour la mesure de flux*



*Photomètre du réseau AERONET*



*Températures de surface (ECOSTRESS)*



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

## **PLAN DE LA PRÉSENTATION**

A) *Introduction / Motivation :*

**Interface** surface/atmosphère

**Bilan** énergétique de surface

Aspects **multiéchelles** et télédétection

B) **Données atmosphériques** : variables d'intérêts, variabilité, mesures, verrous

C) **Données concernant les surfaces** : variables d'intérêts, variabilité, mesures, verrous

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

## A) Introduction / Motivation :

### **Interface** surface/atmosphère

Les échanges entre surface et atmosphère sont d'un grand intérêt pour des communautés scientifiques avec des motivations éventuellement différentes :

- Atmosphère : détermine les **flux d'énergie** sur les surfaces  
*Flux radiatifs SW (en moy : 55 % de l'éclairement solaire) et LW, apport en eau liquide*
- Surface : définit des conditions à la **limite basse** de l'atmosphère  
*Albedo, source LW (températures), source de vapeur d'eau, rugosité*  
*Existence d'une Couche Limite Atmosphérique (CLA) sous l'influence directe de la surface :  
la turbulence dans la CLA impacte tous les échanges (thermiques, eau, quantité de mouvement, chimie) entre la surface et l'atmosphère*
- Rétroactions complexes entre surface et atmosphère  
*A différentes échelles spatiales et temporelles (ex: rétroactions ou réponses atmosphériques)*

( SW : Shortwave  
LW : Longwave )

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

## A) Introduction / Motivation :

### Interface surface/atmosphère

Les échanges entre surface et atmosphère scientifiques avec des motivations différentes

From Kershaw (2017, IOP)

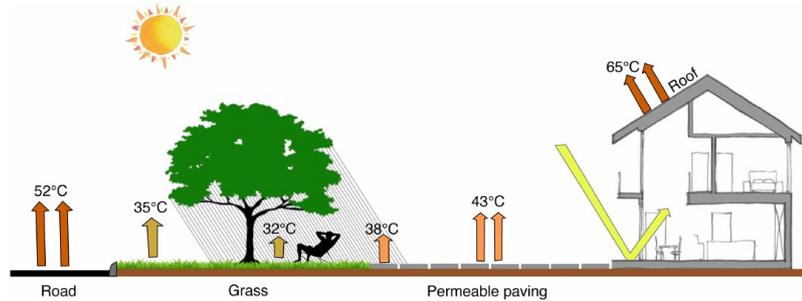


Figure 3.12. Indicative temperatures of different surfaces around buildings. Temperatures are indicative of a sunny day in a warm dry climate.

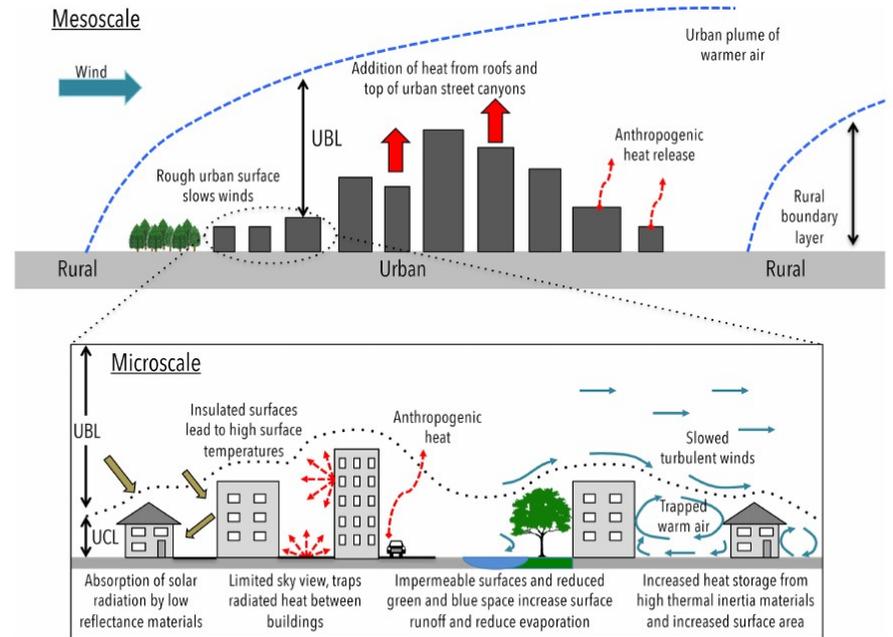


Figure 4.4. Illustration of the energetic processes that lead to the UHI, showing the UBL (top) and the UCL (bottom).

- Rétroactions complexes entre surface et atmosphère  
A différentes échelles spatiales et temporelles

Exemple de situation complexe

Lien thème 3

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

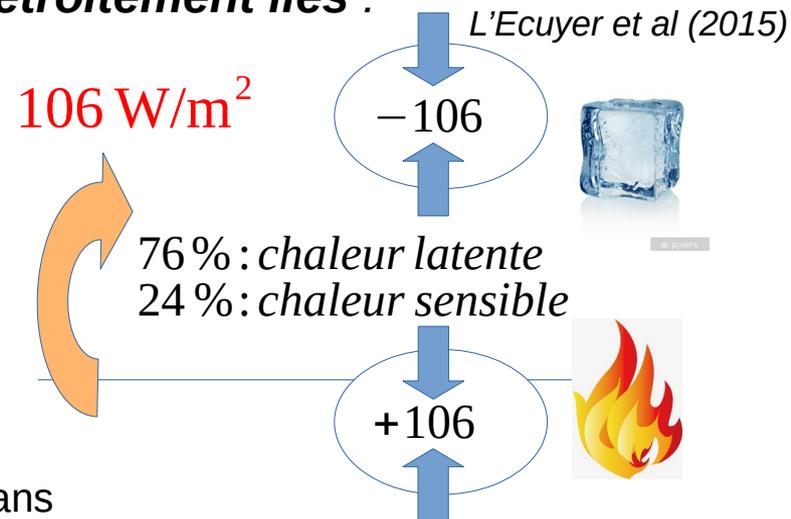
## A) Introduction / Motivation :

### **Interface** surface/atmosphère

Les échanges entre surface et atmosphère sont d'un grand intérêt pour des communautés scientifiques avec des motivations éventuellement différentes :

Les **bilans énergétiques** de la troposphère et surface **étroitement liés** :

- Globalement :
  - Atmosphère** en déséquilibre radiatif négatif :  
**chauffée** (non radiat.) **par la surface**
  - Surface** en déséquilibre radiatif positif  
(malgré la fenêtre atmosphérique) :  
**refroidie** (non radiat.) **par l'atmosphère**
- Dynamique atmosphérique à différentes échelles
  - Puise son énergie de la surface terrestre
  - Dépend des variations spatiotemporelles de ces bilans



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

A) Introduction / Motivation :

**Bilan énergétique de surface** (bilan de flux ; simplifié) :

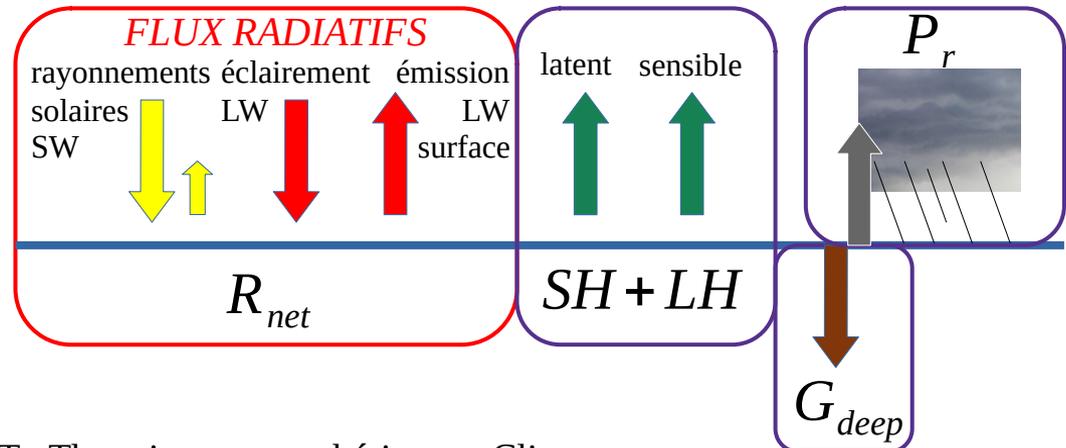
quand équilibre 
$$R_{net} = (SH + LH) + G_{deep} + P_r$$

$R_{net}$  : Echange net par rayonnement

$SH$  et  $LH$  : Echange sensible et latent

$G_{deep}$  : Echange d'énergie avec le sol

$P_r$  : Flux d'énergie lié aux précipitations



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

A) Introduction / Motivation :

**Bilan énergétique de surface** (bilan de flux ; simplifié) :

quand équilibre 
$$R_{net} = (SH + LH) + G_{deep} + P_r$$

$$R_{net} = S_W \downarrow - S_W \uparrow + L_W \downarrow - L_W \uparrow = (1 - A) S_W \downarrow + (L_W \downarrow - \epsilon_S \sigma T_{surf}^4)$$

$R_{net}$  : Echange net par rayonnement

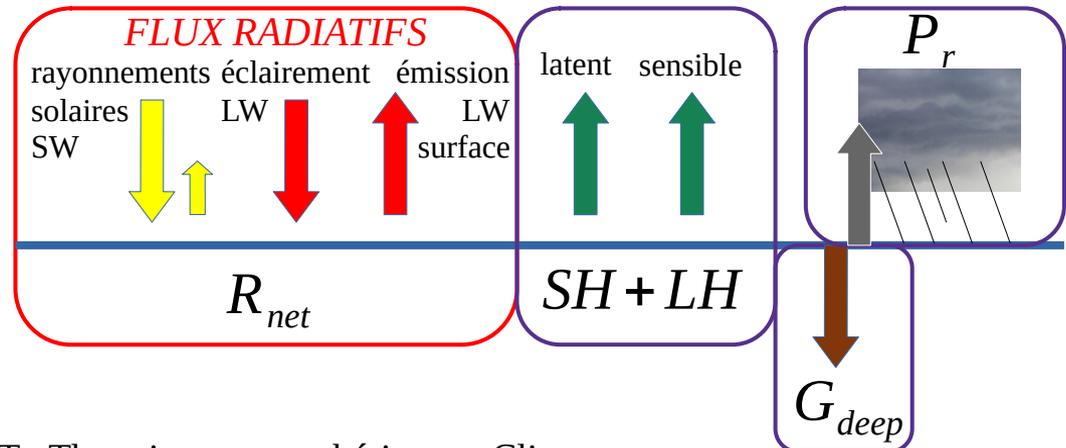
$SH$  et  $LH$  : Echange sensible et latent

$G_{deep}$  : Echange d'énergie avec le sol

$F_r$  : Flux d'énergie lié aux précipitations

$T_{surf}$  : température de surface

$A$  et  $\epsilon_S$  : albedo et émissivité de la surface



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

A) Introduction / Motivation :

**Bilan énergétique de surface** (bilan de flux ; simplifié) :

quand équilibre 
$$R_{net} = (SH + LH) + G_{deep} + P_r$$

$$R_{net} = S_W \downarrow - S_W \uparrow + L_W \downarrow - L_W \uparrow = (1 - A) S_W \downarrow + (L_W \downarrow - \epsilon_S \sigma T_{surf}^4)$$

Bilan général : 
$$C_g \frac{dT_{surf}}{dt} = R_{net} - (SH + LH) - G_{deep} - P_r$$

$R_{net}$  : Echange net par rayonnement

$SH$  et  $LH$  : Echange sensible et latent

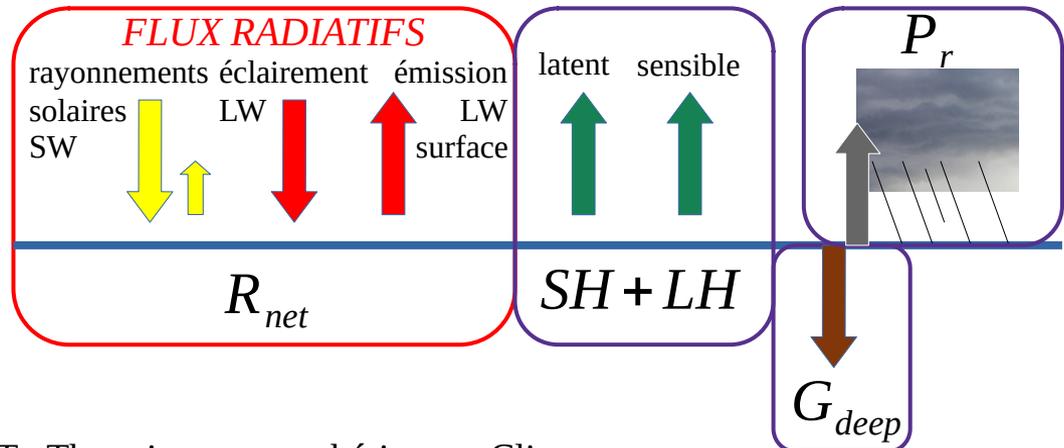
$G_{deep}$  : Echange d'énergie avec le sol

$P_r$  : Flux d'énergie lié aux précipitations

$T_{surf}$  : température de surface

$A$  et  $\epsilon_S$  : albedo et émissivité de la surface

$C_g$  : capacité thermique du sol



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

A) Introduction / Motivation :

**Bilan énergétique de surface** (bilan de flux ; simplifié) :

quand équilibre 
$$R_{net} = (SH + LH) + G_{deep} + P_r$$

$$R_{net} = S_W \downarrow - S_W \uparrow + L_W \downarrow - L_W \uparrow = (1 - A) S_W \downarrow + (L_W \downarrow - \epsilon_S \sigma T_{surf}^4)$$

Bilan général : 
$$C_g \frac{dT_{surf}}{dt} = R_{net} - (SH + LH) - G_{deep} - P_r$$

$R_{net}$  : Echange net par rayonnement

$SH$  et  $LH$  : Echange sensible et latent

$G_{deep}$  : Echange d'énergie avec le sol

$P_r$  : Flux d'énergie lié aux précipitations

$T_{surf}$  : température de surface

$A$  et  $\epsilon_S$  : albedo et émissivité de la surface

$C_g$  : capacité thermique du sol



Flux : mesure ? estime ? sensibilité ? précision attendue ?

Composition de l'atmosphère agissant sur ces flux ?

aérosols, nuages, gaz



Paramètres de surface

variabilité ?  
mesure ?  
estimation ?



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

A) Introduction / Motivation :

**Bilan énergétique de surface** (bilan de flux ; simplifié) :

quand équilibre 
$$R_{net} = (SH + LH) + G_{deep} + P_r$$

$$R_{net} = S_W \downarrow - S_W \uparrow + L_W \downarrow - L_W \uparrow = (1 - A) S_W \downarrow + (L_W \downarrow - \epsilon_S \sigma T_{surf}^4)$$

Bilan général : 
$$C_g \frac{dT_{surf}}{dt} = R_{net} - (SH + LH) - G_{deep} - P_r$$

$R_{net}$  : Echange net par rayonnement

$SH$  et  $LH$  : Echange sensible et latent

$G_{deep}$  : Echange d'énergie avec le sol

$P_r$  : Flux d'énergie lié aux précipitations

$T_{surf}$  : température de surface

$A$  et  $\epsilon_S$  : albedo et émissivité de la surface

$C_g$  : capacité thermique du sol

- \* Variabilités spatiale et temporelle ?
- \* Constantes de temps ? (ex. : 1h dans la CLA)
- \* Effet météorologique / Effet Climatique
  - \* Local Climate Zone, îlots de chaleur
  - \* Projection climatique aux échelles régionales (ex. : ALADIN-CLIMAT)
- \* Résolution spatiale et temporelle des mesures

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles, et leurs accès

## A) Introduction / Motivation :

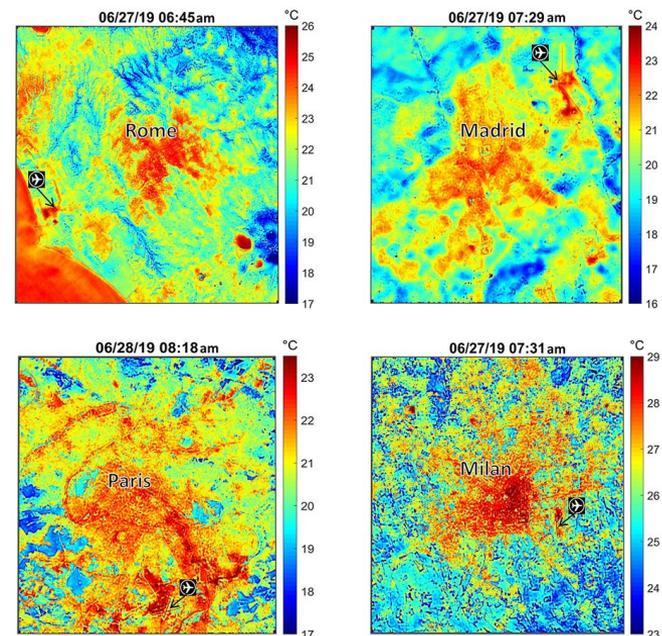
### Exploitation de la télédétection

- Estimation des propriétés optiques atmosphériques (aérosols, nuages, vapeur d'eau...)
- Estimation des propriétés des surfaces (températures, émissivité, humidité)

- à grande échelle à basse ou moyenne résolutions spatiales ( 100m → 10 km)
- de manière ciblée à haute résolution ( ~ 1m)

- Au moyen de satellites (polaires ( /jour) ou géostationnaires (/15 min))
- Au moyen de mesures aéroportés, ou depuis le sol

### Illustration : ECOSTRESS surface temperatures



These maps of four European cities show ECOSTRESS surface temperature images acquired in the early mornings of June 27 and 28, 2019, during a heatwave. The images have been sharpened to delineate key features such as airports. Airports and city centers are hotter than surrounding regions because they have more surfaces that retain heat (asphalt, concrete, etc.). Credit: NASA/JPL-Caltech

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

*B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous*

## **Flux non radiatifs**

*Flux de chaleur sensible et latent, et de quantité de mouvement,*

*Principe de la mesure : modèle de type Bulk (covariance des fluctuations)*

*Flux dans le sol*

*Exemple de mesures, de réseaux :*

*Celles du Groupe Thématique GT5 'Flux de surface' de l'infrastructure de recherche ACTRIS France (mesures sur 3 sites : Météopole, P2OA, SIRTA)*

*→ Données sur AERIS (pôle de données et de services pour l'atmosphère, un des pôles de l'IR Data Terra)*

*FluxNet : réseau mondial de sites de tours micrométéorologiques (dédié biosphère ; échange de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, et énergie) (212 (ou 683?) sites)*

*Modèles d'échange surface atmosphère :*

*ex. : ORCHIDEE (LMDZ) SURFEX (MétéoFrance) : peuvent être couplés à des modèles atmos.et hydrol. – ex. : modèle TEB (Masson et al (2000)) dans SURFEX*



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

Lien thème 2 :  
Ressource solaire  
(prévisibilité ?)

*B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous*

## **Flux radiatifs en surface**

*Mesures des flux  $SW\downarrow$  et  $LW\downarrow$*

*GHI or SSR or SSI*

*SW : pyranomètre et pyréliomètre (Kipp & Zonen, EKO)*

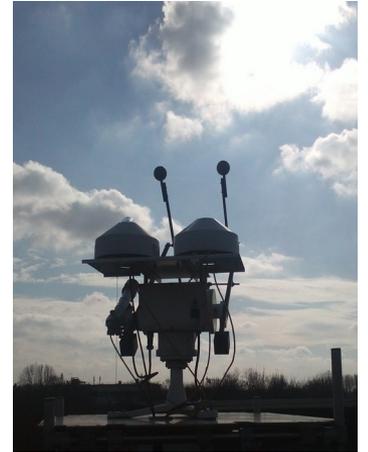
*LW : pyrgéomètre*

*Sites BSRN (77 en tout, EUR : 14, FR : 2) ; autres*

*Mesure du rayonnement net  $R_{net}$  (ex, radiomètre CNR4 de Kipp & Zonen)*

*Estimation des flux  $SW$  :*

- à partir de mesures satellites : détermination de cloud index et clearness index, ou utilisation de modèles de transfert radiatif Voir la famille d'algorithmes Heliosat (> 1982; McClear (2013))
- à partir de modèles atmosphériques



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

Lien thème 2 :  
Ressource solaire  
(prévisibilité ?)

*B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous*

## **Flux radiatifs en surface**

Mesures des flux  $SW\downarrow$  et  $LW\downarrow$

*GHI or SSR or SSI*

*SW : pyranomètre et pyréliomètre (Kipp & Zonen, EKO)*

*LW : pyrgéomètre*

*Sites BSRN (77 en tout, EUR : 14, FR : 2) ; autres*

*Mesure du rayonnement net  $R_{net}$  (ex, radiomètre CNR4 de Kipp & Zonen)*

*Estimation des flux  $SW$  :*

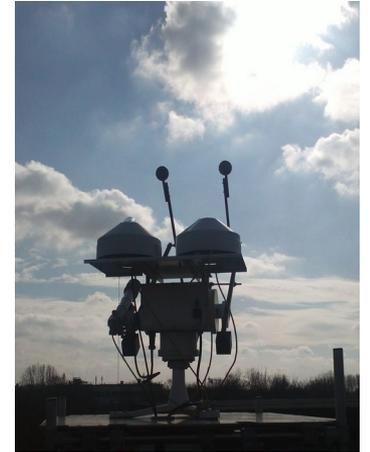
- à partir de mesures satellites : détermination de cloud index et clearness index, ou utilisation de modèles de transfert radiatif
- Voir la famille d'algorithmes Heliosat ( > 1982; McClear (2013))
- à partir de modèles atmosphériques

## **Opportunité des réseaux de mesures**

*Réseau infoclimat (amateurs ; 1808 stations )*

*400 stations MétéoFrance*

*Réf. : Sencrop (météo agricole : ex. 584 stations en Ile de France IDF : 584)*



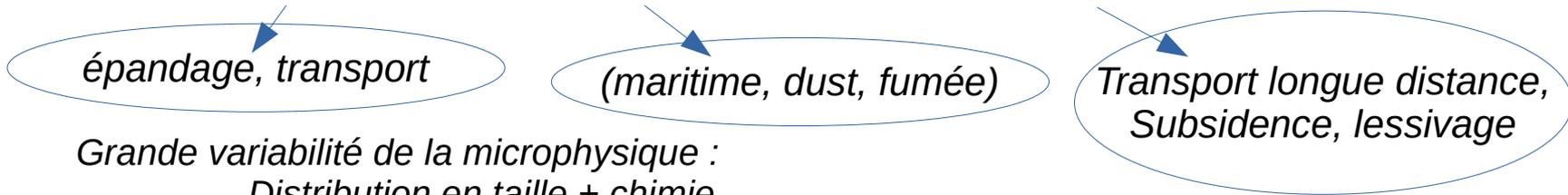
# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

## Aérosols:

Variabilité temporelle, à différentes échelles (saison, journée)

Dépend des émissions, de la masse d'air, des conditions météorologiques



Grande variabilité de la microphysique :

Distribution en taille + chimie

Vieillessement, Dépendance avec la vapeur d'eau

indice de réfraction  
 $m = m_r - i m_i$

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

*B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous*

## **Aérosols:**

*Variabilité temporelle, à différentes échelles (saison, journée)*

*Dépend des émissions, de la masse d'air, des conditions météorologiques*

*Grande variabilité de la microphysique :*

Quantifiés par: épaisseur optique  $\tau$ , coefficient d'angström  $\gamma$ , paramètre d'asymétrie  $g$   
et albedo de diffusion simple  $\varpi$

*ex. : OPAC  
Hess et al  
(1998)*

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

*B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous*

## **Aérosols:**

*Variabilité temporelle, à différentes échelles (saison, journée)*

*Dépend des émissions, de la masse d'air, des conditions météorologiques*

*Grande variabilité de la microphysique :*

*Quantifiés par: épaisseur optique  $\tau$ , coefficient d'angström  $\gamma$ , paramètre d'asymétrie  $g$   
et albedo de diffusion simple  $\varpi$*

*ex. : OPAC  
Hess et al  
(1998)*

*Effet radiatif :*

*dépend des tailles et composition chimique des aérosols*

*effet direct surtout SW (forte dépendance spectrale); LW : effet du mode grossier*

*effets non directs (semi-direct ; indirects (interaction aérosols /nuages))*

## Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

*B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous*

### **Aérosols:**

*Variabilité temporelle, à différentes échelles (saison, journée)*

*Dépend des émissions, de la masse d'air, des conditions météorologiques*

*Grande variabilité de la microphysique :*

*Quantifiés par: épaisseur optique  $\tau$ , coefficient d'angström  $\gamma$ , paramètre d'asymétrie  $g$   
et albedo de diffusion simple  $\omega$*

*ex. : OPAC  
Hess et al  
(1998)*

*Effet radiatif :*

*dépend des tailles et composition chimique des aérosols*

*effet direct surtout SW (forte dépendance spectrale); LW : effet du mode grossier*

*effets non directs (semi-direct ; indirects (interaction aérosols /nuages))*

*Importance ailleurs que dans les pays où le ciel est toujours bleu ??*

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

*B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous*

## **Aérosols:**

*Variabilité temporelle, à différentes échelles (saison, journée)*

*Dépend des émissions, de la masse d'air, des conditions météorologiques*

*Grande variabilité de la microphysique :*

*Quantifiés par: épaisseur optique  $\tau$ , coefficient d'angström  $\gamma$ , paramètre d'asymétrie  $g$   
et albedo de diffusion simple  $\varpi$*

*ex. : OPAC  
Hess et al  
(1998)*

*Effet radiatif :*

*dépend des tailles et composition chimique des aérosols*

*effet direct surtout SW (forte dépendance spectrale); LW : effet du mode grossier*

*effets non directs (semi-direct ; indirects (interaction aérosols /nuages))*

*Importance ailleurs que dans les pays où le ciel est toujours bleu ?? a priori oui !*

*Exemple à Lille : Situation de soleil clair représente : - 33 % des situations Chesnoiu et al (2022)*

*- 55 % de l'énergie globale mesurée (GHI)*

*- 86 % de l'énergie directe mesurée*

*Pour ces situations, la sensibilité du rayonnement aux aérosols est très grande.*

*Dépôt sur les surfaces*

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

*B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous*

## **Aérosols:**

*Variabilité temporelle, à différentes échelles (saison, journée)*

*Dépend des émissions, de la masse d'air, des conditions météorologiques*

*Grande variabilité de la microphysique :*

*Quantifiés par: épaisseur optique  $\tau$ , coefficient d'angström  $\gamma$ , paramètre d'asymétrie  $g$   
et albedo de diffusion simple  $\varpi$*

*ex. : OPAC  
Hess et al  
(1998)*

*Effet radiatif :*

*dépend des tailles et composition chimique des aérosols*

*effet direct surtout SW (forte dépendance spectrale); LW : effet du mode grossier*

*effets non directs (semi-direct ; indirects (interaction aérosols /nuages))*

*Importance ailleurs que dans les pays où le ciel est toujours bleu ?? a priori oui !*

*Mesures/Estimation :*

*mesures sol : AERONET (colonne; AOD, AE, SSA); mesure de jour; 450 sites*

*Lidar (profil vertical)*

*mesures satellite : PARASOL, MODIS ; difficulté quand nuages, au dessus des terres*

*modèles atmosphériques (avec modèle d'émission, assimilation de données, réanalyses) :*

*MACC, CAMS, MERRA-2*

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

## B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

### Aérosols:

Variabilité temporelle

Dépend de la saison

Grande variabilité spatiale

Quantifiés par des modèles

Effet radiatif :

dépend des propriétés optiques

effet direct et indirect

effets non linéaires

Importance accrue des mesures

Mesures/Estimation :

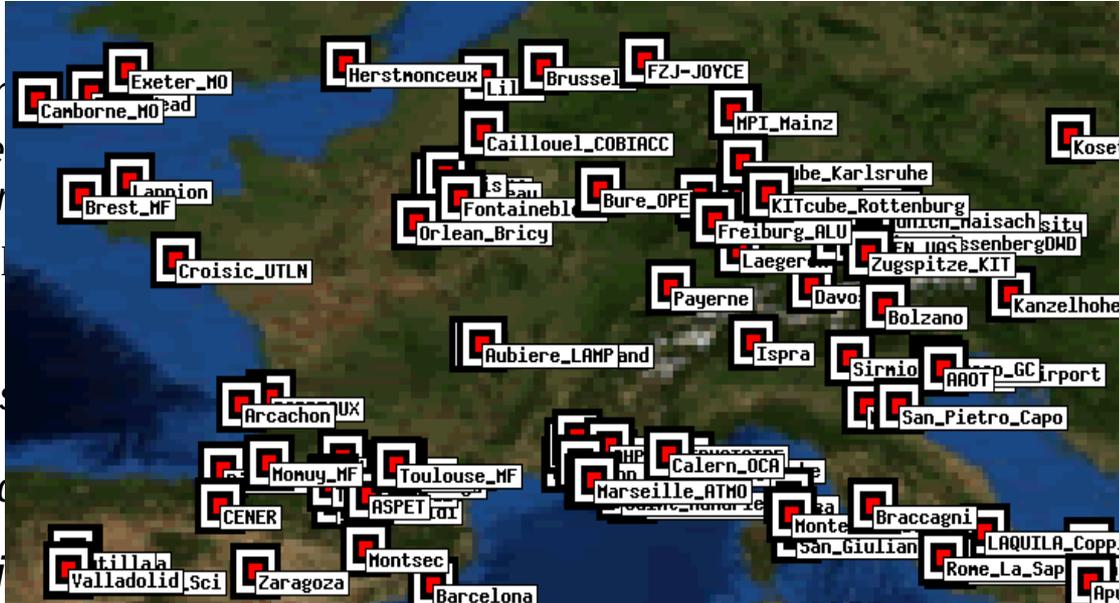
mesures sol : AERONET (colonne; AOD, AE, SSA); mesure de jour; 450 sites

Lidar (profil vertical)

mesures satellite : PARASOL, MODIS ; difficulté quand nuages, au dessus des terres

modèles atmosphériques (avec modèle d'émission, assimilation de données, réanalyses) :

MACC, CAMS, MERRA-2



ex. : OPAC  
Hess et al  
(1998)

symétrie  $g$   
simple  $\omega$

grossier

? a priori oui !

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

## Aérosols:

Variabilité, à différentes échelles (saison, journée)

Illustration : Université de Lille, Villeneuve d'Ascq

À partir de mesures sol (AERONET)

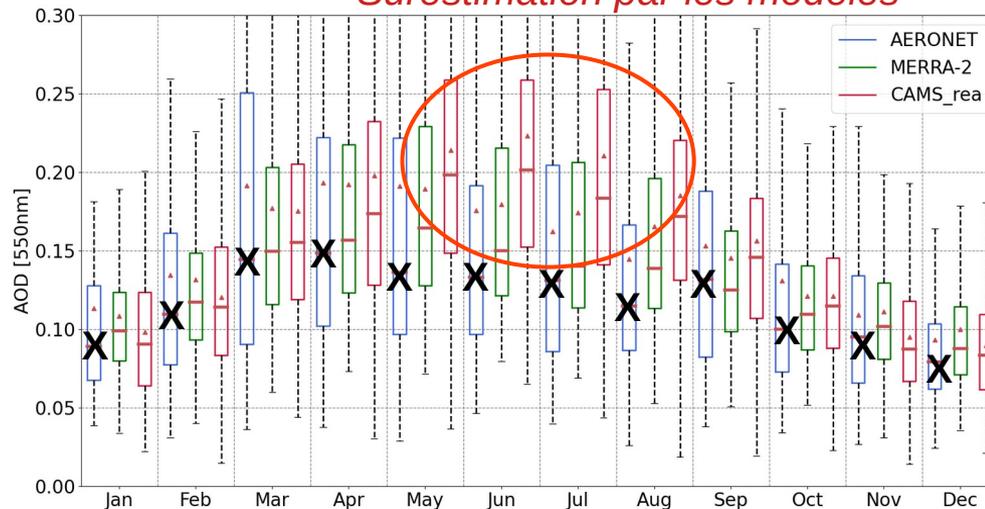
Estimation par les réanalyses de MERRA-2 (USA) et CAMS (EU)

Reanalysis	Spatial resolution (°)	Temporal resolution (hours)	Period
CAMS	0.5 × 0.5	3	2003–2017
MERRA-2	0.5 × 0.625	1	1980–now

AOD information	Assimilated data sources
AOD469, AOD550, AOD670, AOD865, AOD1240	MODIS, AATSR
AOD550, AE, SAOD550	MODIS, MISR, AVHRR, AERONET

Climatologie mensuelle (2010-2019) de l'AOD  
Surestimation par les modèles



(résultats de G. Chesnoiu, 2021, doctorant LOA)

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

*B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous*

## **Nuages :**

**Très grande variabilités spatiales et temporelles (saison, journée, secondes)**

*Dépendance en fonction de la masse d'air (état, chgts) et de ses évolutions, effets locaux*

*Complexité de la microphysique si nuage de glace ou phase mixte*

**Couverture fractionnaire**

*Effet radiatif : dépend du type de nuages (forçage négatif pour nuage haut, positif pour bas)  
large gamme d'épaisseur optiques*

*Effet SW des cirrus proches de celui des aérosols*

*Effets 3D ! : ombrage, channelling, éclaircissement des côtés des nuages : limite du  
modèle du nuage plan parallèle homogène → code : Monte Carlo,  
Spartacus*

**Mesures/Estimation :**

*sol : AERONET, skyimager (utile pour des prévisions en temps réel)*

*satellite : résolution de 250m, 1 km, 10 km, satellite polaire et géostationnaire*

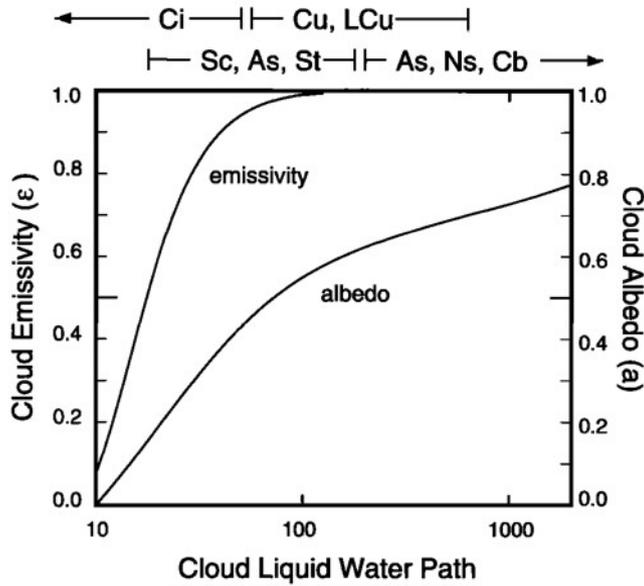
*modèles atmosphériques : CAMS, MERRA2 (CN à 3 altitudes + recouvrement)*

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

## Nuages :

Effets SW et LW importants



Adapté de Stephens (78)

Paramètres importants :

épaisseur optique  $\tau_{vis}$

diffusion avant

LWP

altitude de la base  
des nuages

SW

LW

Forçage radiatif LW des nuages à la surface : effet de la vapeur d'eau

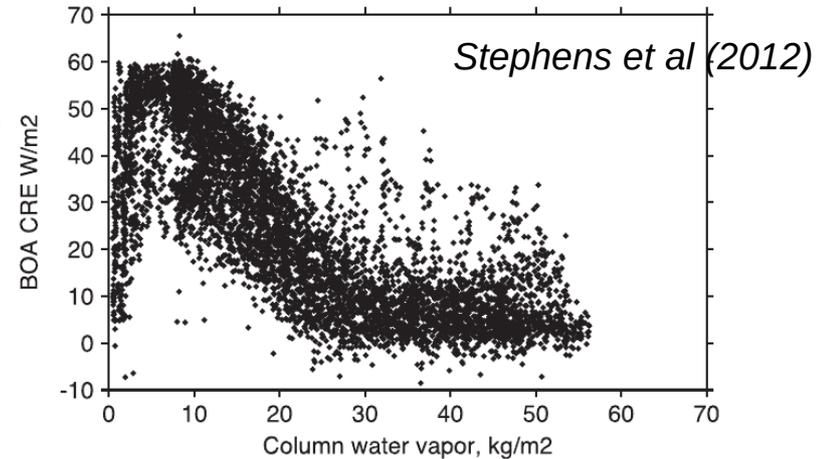


FIG. 2. The effect of clouds on the downwelling longwave flux at the earth's surface as a function of column water vapor.

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

**Vapeur d'eau** : sa «mesure» ...

Satellite :

\* Capteurs hyperfréquences passifs sur satellites à orbite polaire (IASI) ; infrarouge (historique ; profil) ;

\* Imageurs dans l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge ; exploitation de deux canaux (résol. spatiale (~1 km))

\* Limbosondeurs, GPS, microonde

*Verrous* : quand présence de nuages  
variabilité tridimensionnelle

In situ :

radiosondes (résol. verticale. 5m), ballons, avions commerciaux

Sol :

mat instrumenté, lidar vapeur d'eau, radiomètre microonde (passif), AERONET

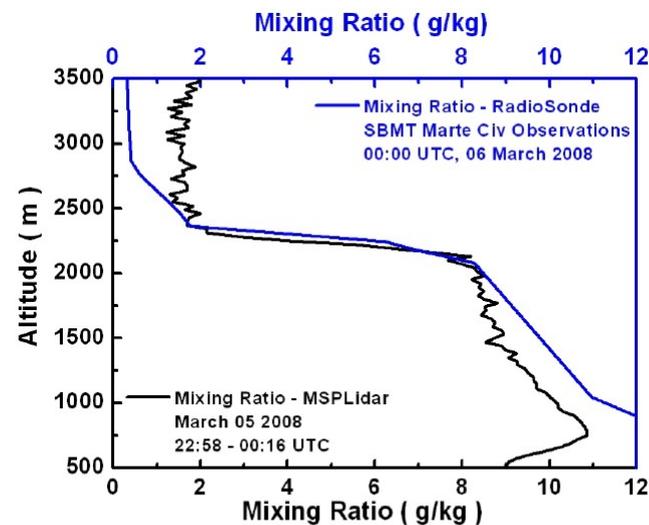


Figure 3. The water-vapor mixing ratio from the 408nm Raman channel and from radiosonde data at Sounding Base Marte Civil (SBMT).

Landulfo et al (2008)

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

## B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

### Vapeur d'eau : sa «mesure» ...

#### Satellite :

- \* Capteurs hyperfréquences passifs sur satellites à orbite polaire (IASI) ; infrarouge (historique ; profil) ;
- \* Imageurs dans l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge ; exploitation de deux canaux (résol. spatiale (~1 km))
- \* Limbosondeurs, GPS, microonde

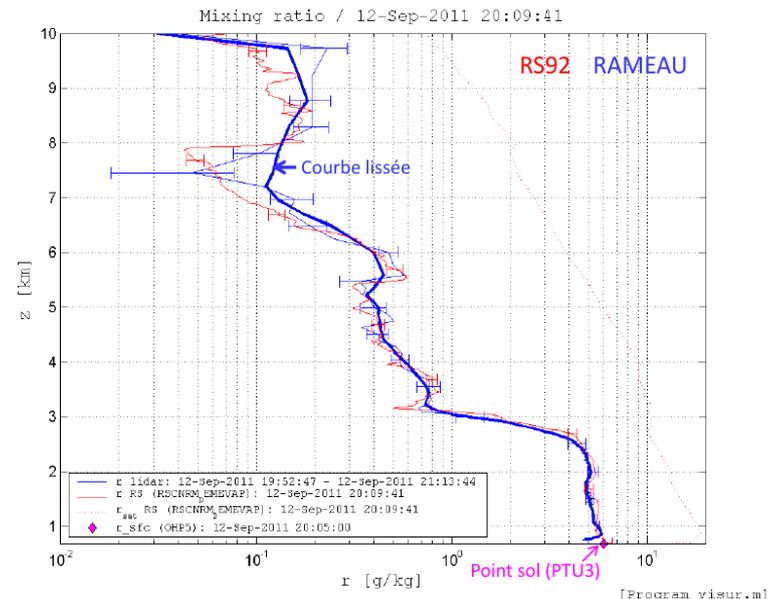
Verrous : quand présence de nuages  
variabilité tridimensionnelle

#### In situ :

radiosondes (résol. verticale. 5m), ballons,  
aéronefs commerciaux

#### Sol :

mat instrumenté, lidar vapeur d'eau, radiomètre microonde (passif), AERONET



Bock et al (2012)

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

**Vapeur d'eau** : sa «mesure» ...

Satellite :

\* Capteurs hyperfréquences passifs sur satellites à orbite polaire (IASI) ; infrarouge (historique ; profil) ;

\* Imageurs dans l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge ; exploitation de deux canaux (résol. spatiale (~1 km))

\* Limbosondeurs, GPS, microonde

Verrous : quand présence de nuages  
variabilité tridimensionnelle

In situ :

radiosondes (résol. verticale. 5m), ballons, avions commerciaux

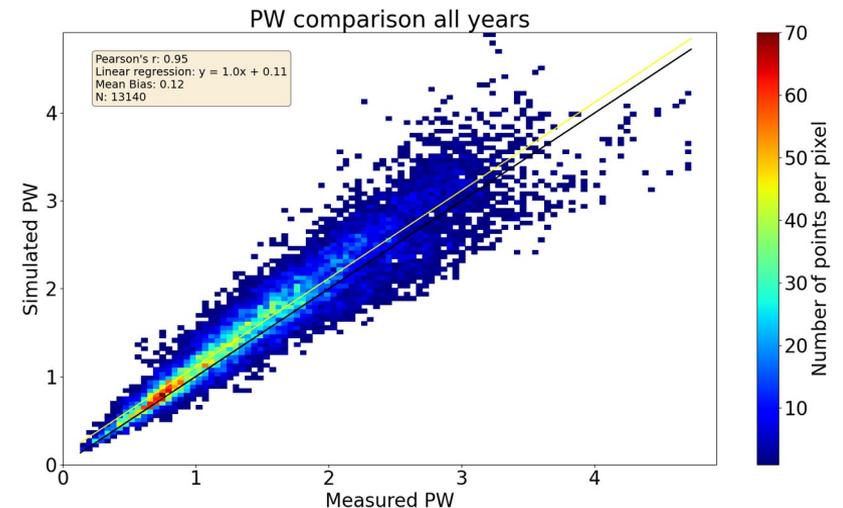
Sol :

mat instrumenté, lidar vapeur d'eau, radiomètre microonde (passif), AERONET

... son «estimation» (modèle)

Illustration : Université de Lille, V. d'Ascq

MERRA vs AERONET 2010 – 2020 (1h)



(comparaison de G. Chesnoiu, doctorant LOA)

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

## PLAN DE LA PRÉSENTATION

A) Introduction / Motivation :

**Interface** surface/atmosphère

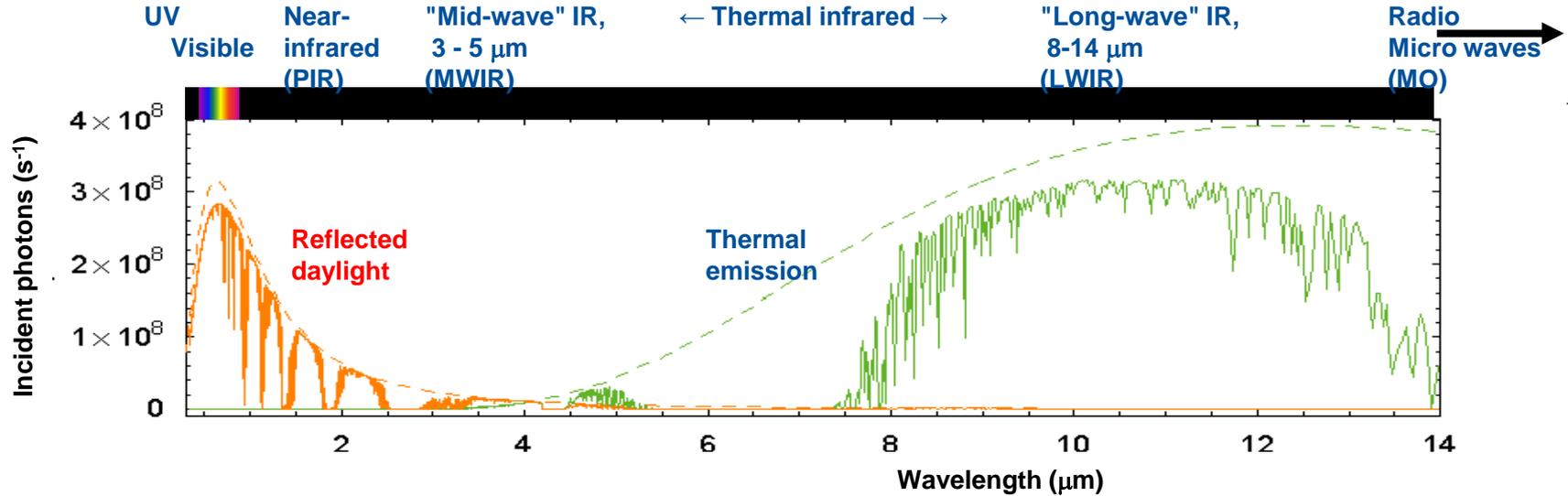
**Bilan** énergétique de surface

Aspects **multiéchelles** et télédétection

B) **Données atmosphériques** : variables d'intérêts, variabilité, mesures, verrous

C) **Données concernant les surfaces** : variables d'intérêts, variabilité, mesures, verrous

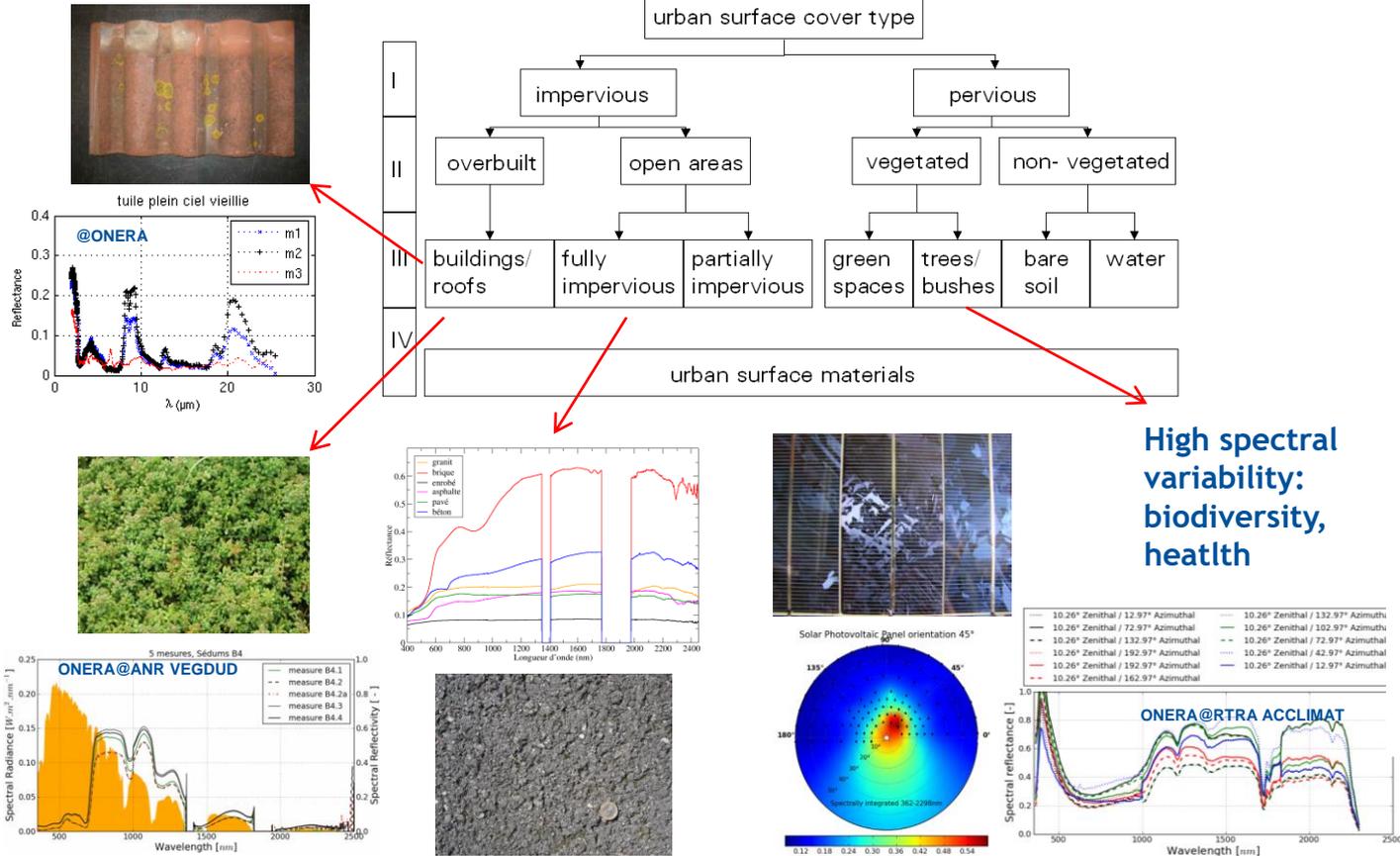
# Main sources in the optical range



Optical properties: Reflectance

Emissivity LSE  
Surface temperature LST

# Optical properties in urban area: Data base



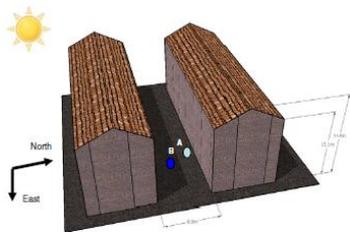
- Specific signature per class
- Sometimes high intra-class variability
- Inter-class discrimination not always easy
- Directional effect of the OP
- The entire optical range is rarely available: ASTER, SLUM, MEMOIRES, ANR HYP

High spectral variability: biodiversity, health

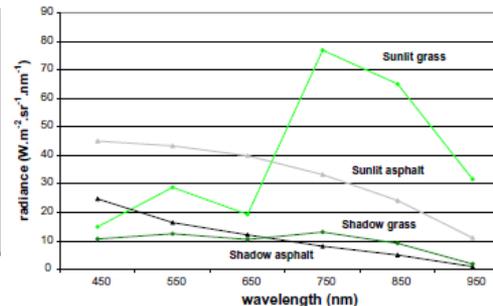
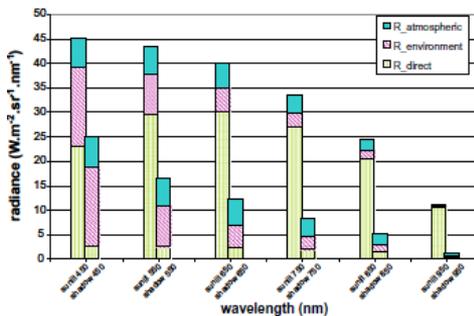
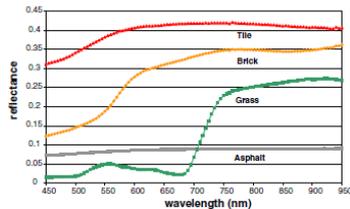
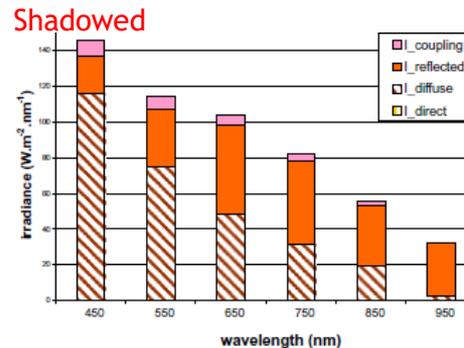
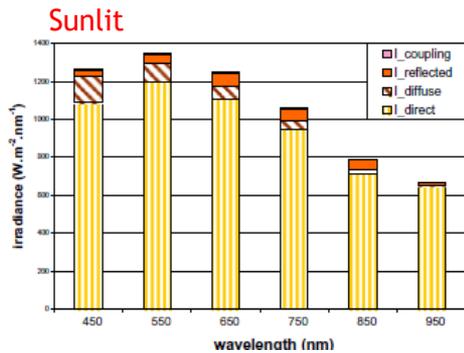


# Radiative transfer [0.4; 2.5] $\mu\text{m}$

Relative contribution of the different radiative terms at BOA and TOA levels

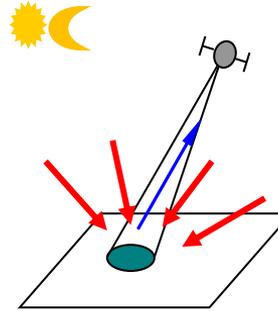
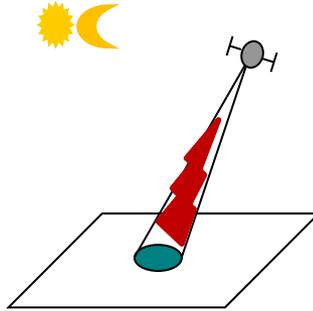
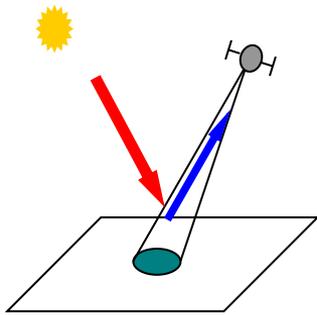


Adeline et al., 2012

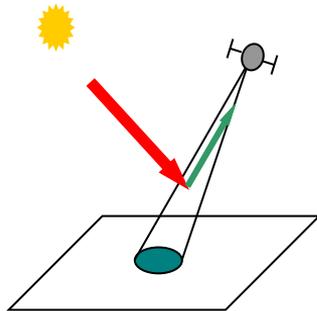


Reflectance retrieval tools: Cochise, ICARE (ONERA), , ATCOR4 => Albedo estimation

# Radiative transfer [8.0; 14.0] $\mu\text{m}$ :

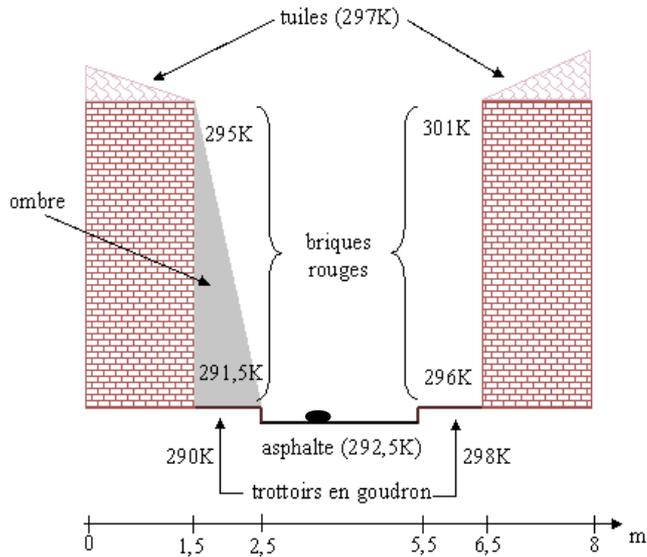


Radiances coming from the target



Radiance not coming from the target

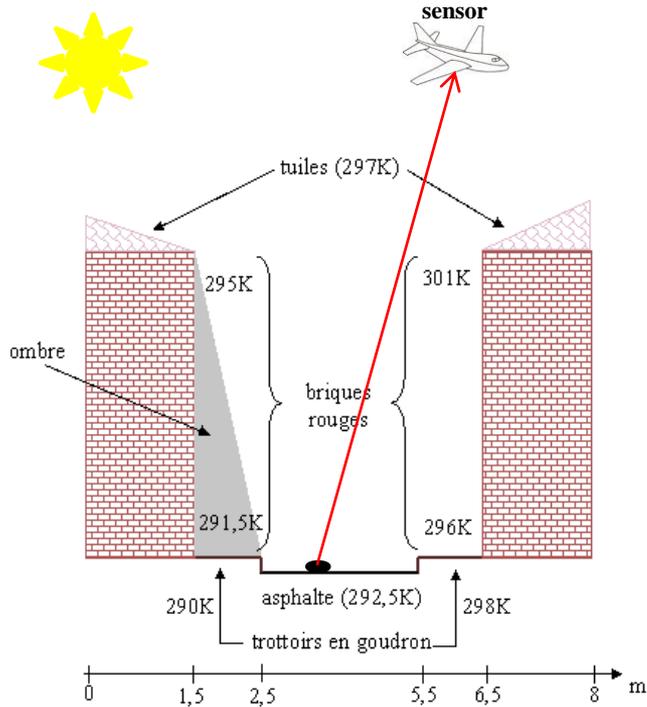
# Radiative transfer [8.0; 14.0] $\mu\text{m}$



- Analyse radiative :

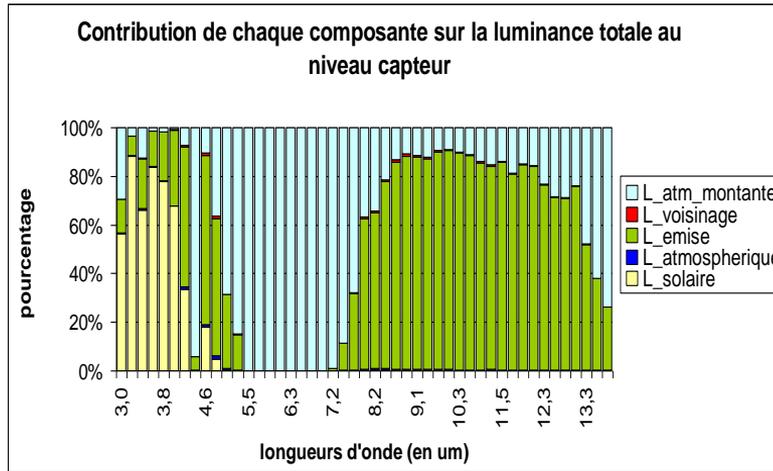
Fontanilles, Briottet, Tremas, 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31), pp. 5799-5810

# Radiative transfer [8.0; 14.0] $\mu\text{m}$



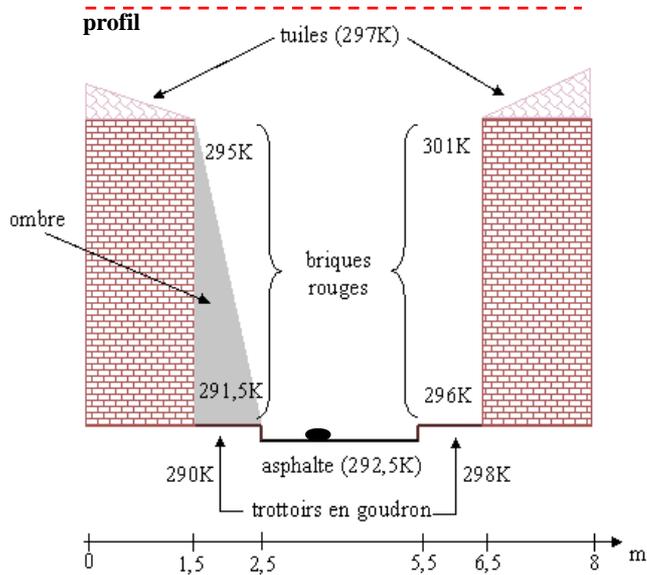
## ▪ Analyse radiative :

### ➤ Décomposition au niveau capteur



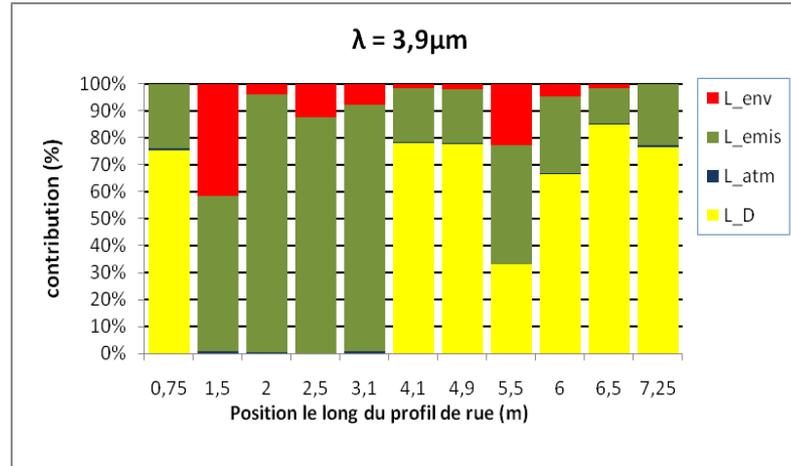
Fontanilles, Briottet, Tremas, 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31), pp. 5799-5810

# Radiative transfer [8.0; 14.0] $\mu\text{m}$



## ▪ Analyse radiative :

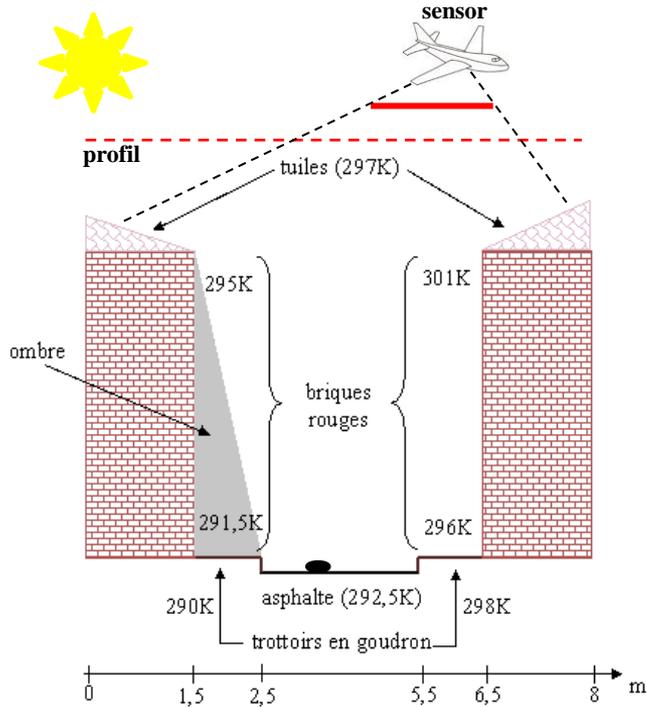
### ➤ Décomposition de la luminance BOA :



L\_D : réflexion de la lumière solaire directe sur la cible

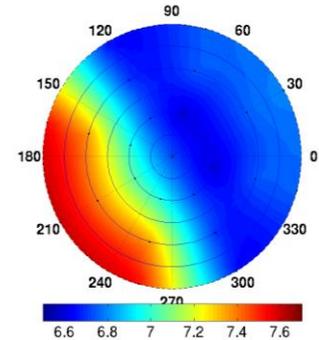
Fontanilles, Briottet, Tremas, 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31), pp. 5799-5810

# Radiative transfer [8.0; 14.0] $\mu\text{m}$

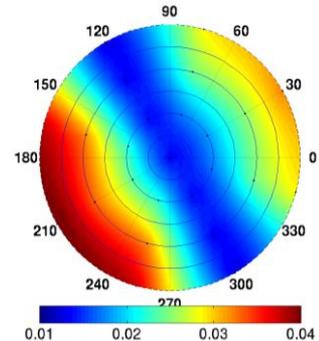


- **Effets directionnels :**  
( $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$ )

Luminance capteur à 8,6  $\mu\text{m}$  :

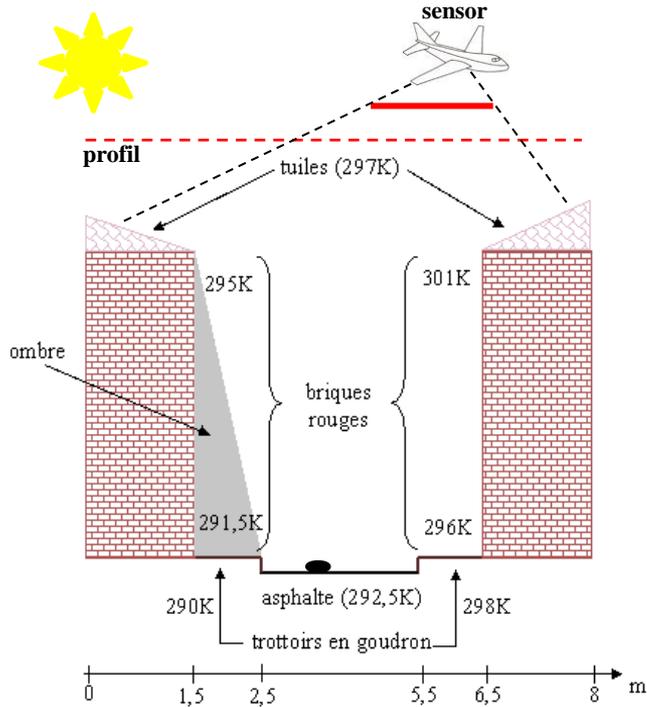


Luminance solaire :



Fontanilles, Briottet, Tremas, 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31), pp. 5799-5810

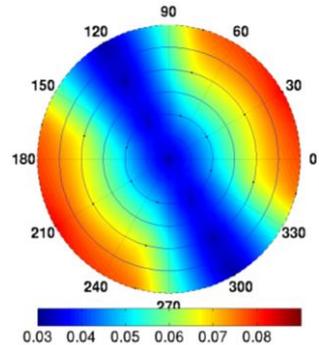
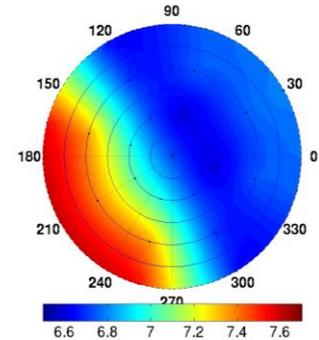
# Radiative transfer [8.0; 14.0] $\mu\text{m}$



- **Effets directionnels :**  
( $\text{W/m}^2/\mu\text{m/sr}^{-1}$ )

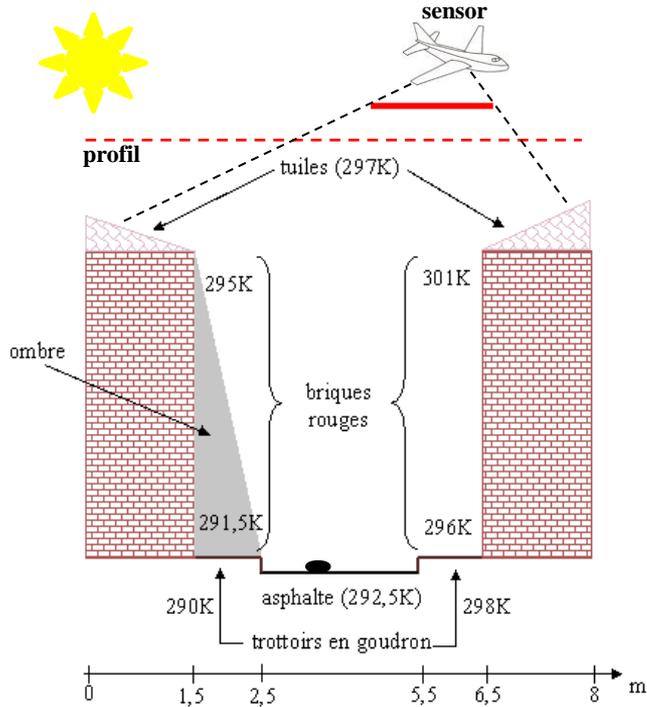
Luminance capteur à 8,6  $\mu\text{m}$  :

Luminance atmosphérique :



Fontanilles, Briottet, Tremas, 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31), pp. 5799-5810

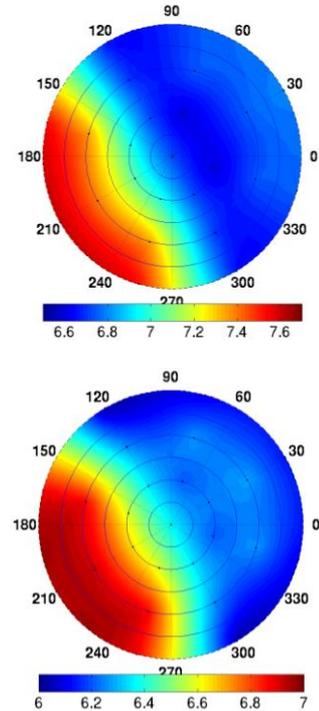
# Radiative transfer [8.0; 14.0] $\mu\text{m}$



- **Effets directionnels :**  
( $\text{W/m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$ )

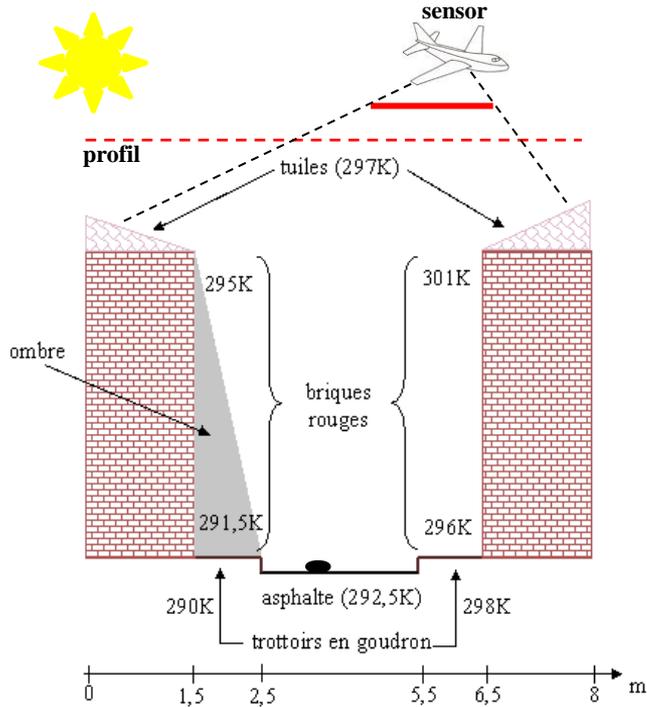
Luminance capteur à 8,6  $\mu\text{m}$  :

Luminance émise :



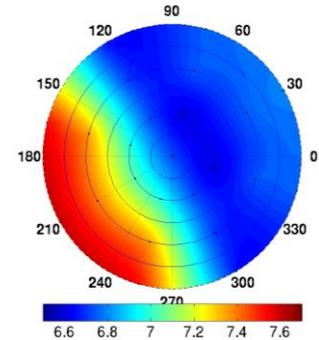
Fontanilles, Briottet, Tremas, 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31), pp. 5799-5810

# Radiative transfer [8.0; 14.0] $\mu\text{m}$

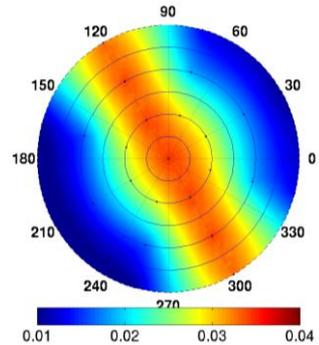


- **Effets directionnels :**  
( $\text{W/m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$ )

Luminance capteur à 8,6  $\mu\text{m}$  :

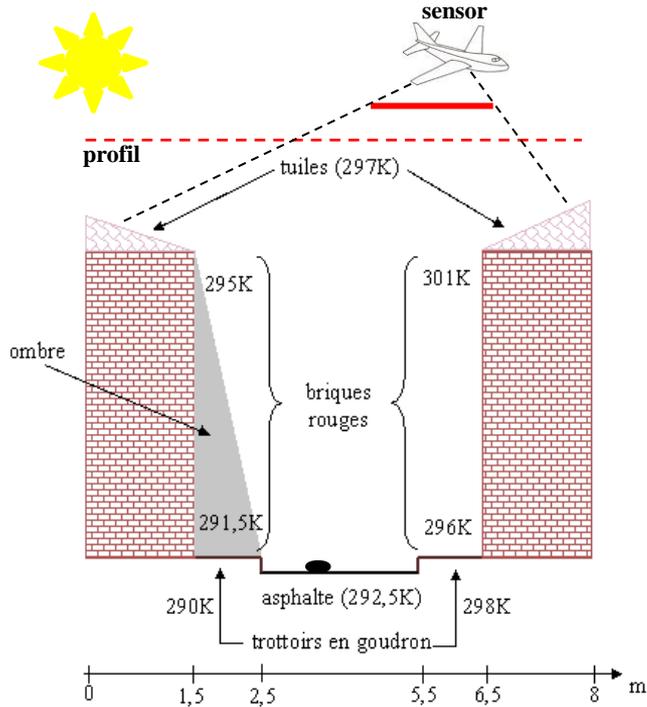


Luminance due au voisinage :



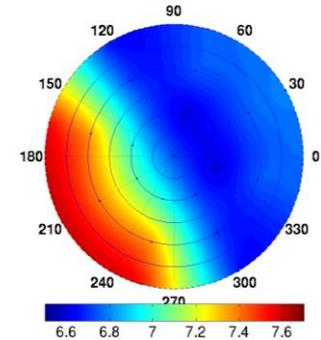
Fontanilles, Briottet, Tremas, 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31), pp. 5799-5810

# Radiative transfer [8.0; 14.0] $\mu\text{m}$

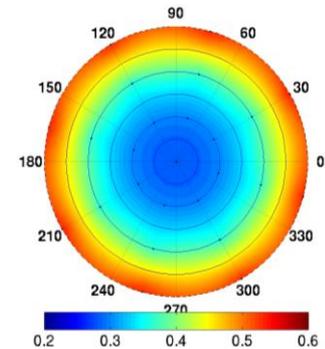


- **Effets directionnels :**  
( $\text{W/m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}^{-1}$ )

Luminance capteur à 8,6  $\mu\text{m}$  :



Luminance atmosphérique montante :



Fontanilles, Briottet, Tremas, 2008. TITAN : an Infrared Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3D Surface - Application over Urban Areas, *Applied Optics*, 47(31), pp. 5799-5810

# Estimation de la LST et LSE

## • Importance de l'émissivité

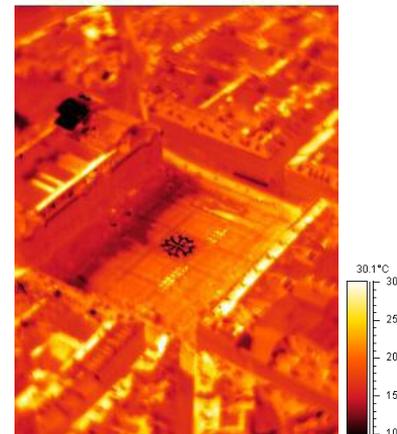
$$• T_B^4 = \epsilon \cdot T_S^4$$

• Sur une image thermique, différentes températures de brillance ne signifient pas forcément que les objets ont une température de surface différente

Matériaux	Emissivité moyenne (8-14 $\mu\text{m}$ )
Eau claire	0.98-0.99
Bois	0.93-0.94
Verre	0.77-0.81
Métal poli	0.16-0.21
Peinture	0.90-0.96



Source: Dr. Claudia Künzer



Températures de brillance aéroportées  
11/07/2004, 10h (heure locale)

# Atmospheric correction in the LWIR range

## Flat surface assumption

Radiance at sensor-level:

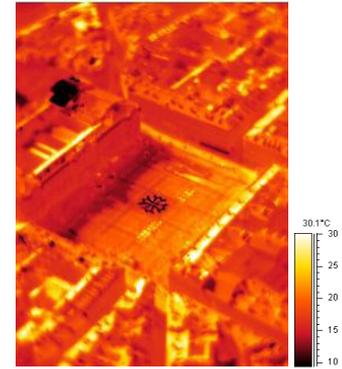
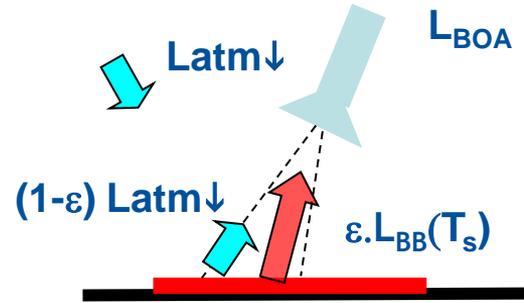
$$L_{\lambda,sensor} = \tau_{\lambda}^{atm,sensor} L_{\lambda,BOA} + L_{\lambda}^{atm\uparrow,sensor}$$

With:  $L_{\lambda,BOA} = L_{\lambda,surface} + [1 - \epsilon_{\lambda}] L_{\lambda}^{atm\downarrow}$

$$L_{\lambda,surface} = \epsilon_{\lambda} L_{BB}(T_s)$$

$$LST = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{c_1}{\lambda^5 L_{\lambda,surface}} + 1\right)} \quad [K]$$

$c_1$  and  $c_2$  being the constants in the Planck's law.



Températures de brillance  
aéroportées  
11/07/2004,10h (heure locale)

Matériaux	Emissivité moyenne (8-14 μm)
Eau claire	0.98-0.99
Bois	0.93-0.94
Verre	0.77-0.81
Métal poli	0.16-0.21
Peinture	0.90-0.96

For a number of N spectral bands, there are N observed radiances and N+1 unknowns : N emissivities and one LST, consequently, the system is undetermined.

Methods as a function of the nb of spectral band: single band, two bands (SW, RMSE day LST < 2K; RMSE night LST < 0.7K) or 3-10 bands (TES, combination of daytime/nighttime acq., TISI, or multi-angle observations) or hyperspectral (spectral smoothness)

# Example of LST, LES retrieval: TES method

## Flat surface assumption: TES

Initially, developed by [Gillespie, 1999] with at least 3 bands. Can estimate LST and LSE

**Principle:** 3 modules

- Normalized Emissivity Method (NEM): uses an initial emissivity value (here 0.99) and iteratively corrects it for the reflected downward atmospheric radiance.
- RATIO: module normalizes the new emissivities by the sum of all found emissivities in all the thermal bands. This allows to preserve the shape of the spectrum and to be less sensitive to errors in temperature estimation.
- Maximum-Minimum Difference (MMD): converts normalized emissivities into actual emissivities using the empirical MMD law.

$$\varepsilon_{min} = a - b * MMD^c$$

With a, b, c estimated in a learning stage with prior data base

3/4 bands, Typic:

RMSE LST < 1K

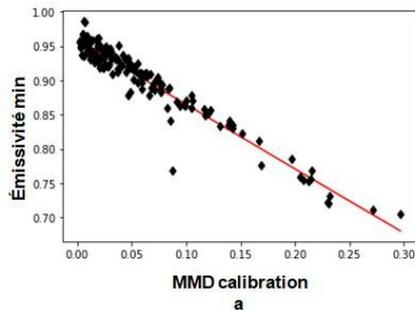
RMSE LSE < 1%

TES can estimate LST and LES, required:

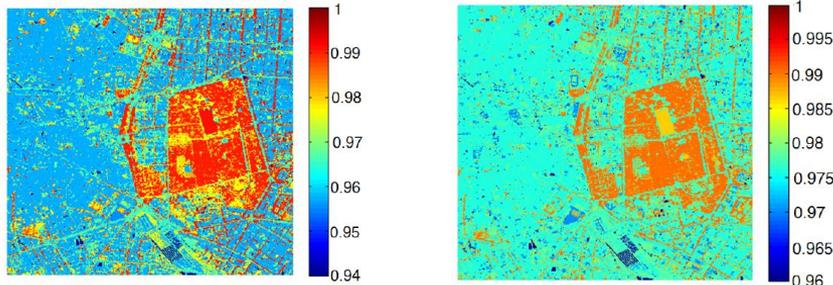
- At least 3 bands
- Atmospheric correction is necessary to have  $L_{\lambda,BOA}$

# Example of LST, LES retrieval: TES method

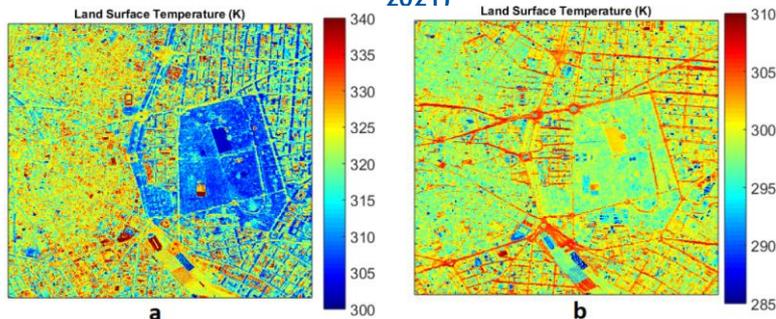
## Flat surface assumption: TES illustration (Michel A., 2021)



MMD law



Emissivity maps over Retiro Park: 4-m emissivity map (left) in the AHS band 76 (10.71 μm) ; (right) in the AHS band 76 (10.71mm) (Michel A., 2021)



LST in K retrieved from the 7-b TES of [62] over the Retiro park daytime (a) and nighttime (b)

# Limitations due to urban roughness, scale

Atmospheric correction

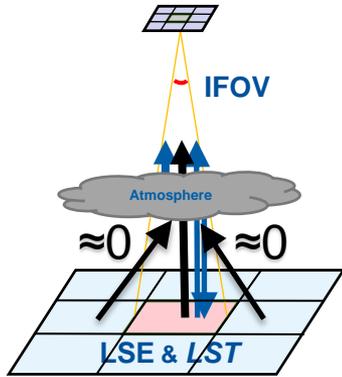
- Environment effect

LST, LES retrieval

- Directional temperature
- Temporal variation of the LST

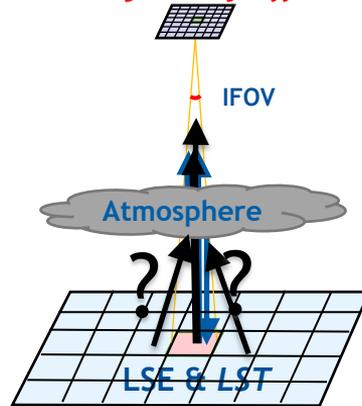
# Atmospheric correction in the LWIR range (@ Zheng PhD, 2020, ICube)

**Low spatial resolution**  
(GSD > 100 m)



**High spatial resolution (GSD < 100 m)**

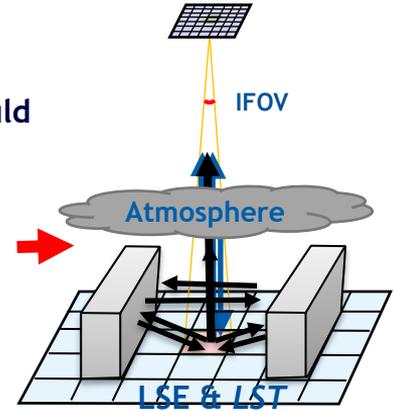
**Adjacency effect**



Some radiative effects could not be neglected:

- Adjacency effect
- The 3-D structure

**3-D structures**

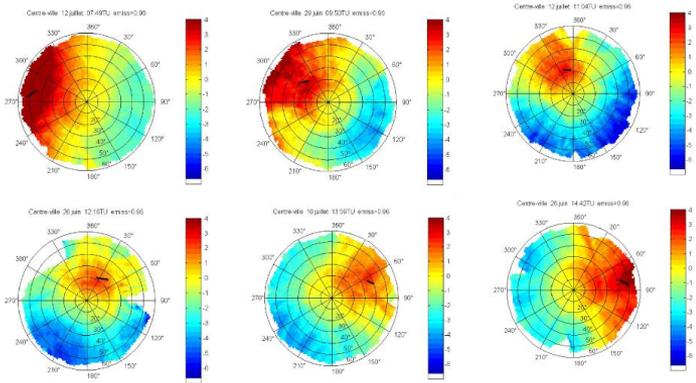


An error up to 4 K is obtained with SW or TES method using the flat surface assumptions

- Adjacency effect  $\geq 2.0$  K in turbid atmosphere with pixel size of 30 m.
- The **hotter** the adjacent pixels, the **larger** the Adjacency Effect magnitude.
- Magnitude of Adjacency Effect  $\leq 0.5$  K if atmospheric visibility is  $\geq 23$  km or image spatial resolution is **coarser than 1.0 km**.

Zheng et al., 2020 proposed a new retrieval method for urban medium

# Directional temperature at decametric scale (Lagouarde et al., 2010)

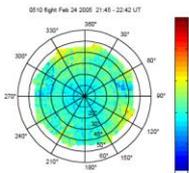


Day

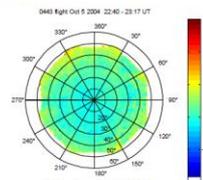
MARSEILLE centre ville (ESCOMPTE 2001)

Toulouse CAPITOUL  
isotropy with zenith  
(within the 0 - 50° range  
with M740 camera)  
azimutal viewing direction

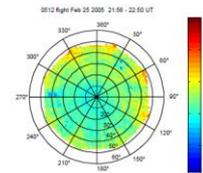
Night



February 24, 2005



October 5, 2004



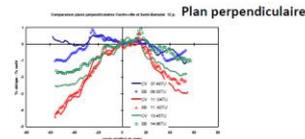
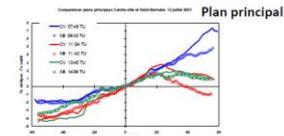
February 25, 2005

Effet de la structure du milieu urbain : comparaison centre-ville / Saint-Barnabé (ESCOMPTE Marseille)

Centre-ville  
Bâti ancien dense  
Bâtiments ~20m



Saint-Barnabé  
Mélange bâti/végétation  
pavillons/jardins



→ hot spot centre ville plus marqué

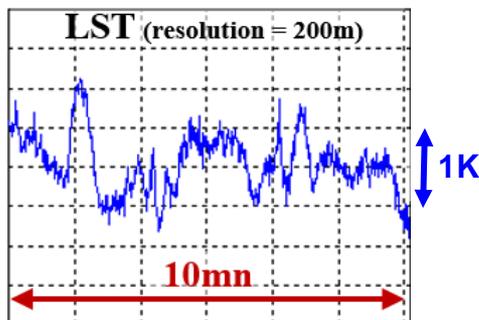
Energy budget and monitoring required a normalised LST

Modèles de transfert :

- TUF-3D (Krayenhoff et Voogt, BLM 2007, 123(3)) - TUF-3D/MAESPA (urbain + vegetation)
- DARTEB J.-P. Gastellu-Etchegorry, [http://www.cesbio.ups-tlse.fr/us/dart\\_archives.html](http://www.cesbio.ups-tlse.fr/us/dart_archives.html)
- SOLENE (D. Groleau/CERMA-IRSTV, Hénon et al., TAC)
- TEB (Météo France)
- ...

# Atmospheric turbulence on LST (@Lagouarde et al.)

LST measurements are affected by atmospheric turbulence:



**Experimental characterization of the uncertainty on LST, at 50 m resolution:**

**+/-0.6K for ~60% of the measurements**

**+/-0.8K for ~80% of the measurements**

- ❑ **Temporal fluctuations over dry maize field or bare soil** (from experimental measurements)
- ❑ **Two main classes**
  - ❑ **Surface Boundary Layer** turbulence effect on LST is smoothed by spatial integration on the pixel: **meters & seconds**
  - ❑ **Planetary Boundary Layer** turbulence affects LST whatever the pixel size: **kms & minutes**  
→ **uncertainty on instantaneous LST meas. from space**

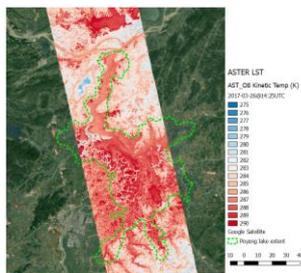
*Lagouarde et al., RSE 2013*

*Lagouarde et al., RSE 2015*

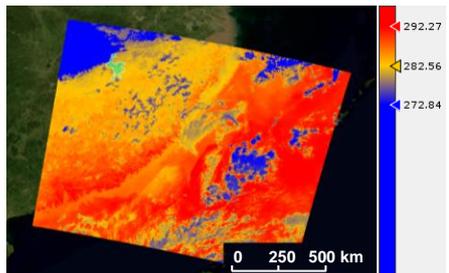
# Capteurs actuels

	<b>ASTER</b> (NASA/METI)	<b>Landsat 8</b> (NASA)	<b>MODIS</b> (NASA)	<b>Sentinel 3</b> (ESA/EUMETSAT)	<b>Meteosat 10</b> (EUMETSAT)	<b>TRISHNA</b> (CNES, ISRO)
Résolution spatiale	90m	100m (30m)	1 km	1 km	3 km	50-60 m
Résolution temporelle	16 jours	16 jours	2 x par jour	1 jour	¼ h	3 / 8 days
Nb de bandes (8-14 µm)	5	2	8	2	5	4
Date de lancement	1999	2013	1999	2016	2012	2025

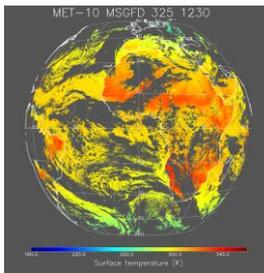
ASTER LST



Sentinel 3 LST



MeteoSat 10 LST



- ➔ Résolution spatio/temp.: limitations des capteurs actuels
- ➔ Arrivée de TRISHNA
- ➔ Préparation avec l'ANR DIAMS

**BUT 50-60 m is not sufficient for urban area  
=> Desagregation**

# Change of scale: Desaggregation en LST

## Principle:

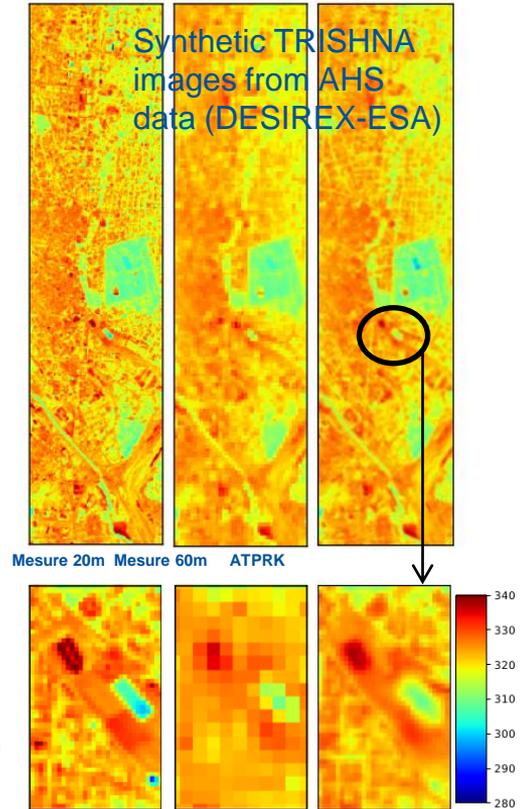
- Train a relation linking LST and a indice (NDVI or NDBI) at the native LWIR image and an aggregated VISNIR-SWIR image
- This empirical function is then supposed to be scale invariant
- Apply to function at the native VISNIR-SWIR image to built the desaggregated LWIR image

## Method successful for day or night LWIR images

- **Night SUHI with AATPRK + NDBI**

## Illustration over Madrid

- The geometric organisation of the city is retrieved
- Some limitations over dense area (old downtown)



Granero-Belinchon, Michel, Lagouarde, Sobrino, Briottet, 2019. Multi-Resolution Study of Thermal Unmixing Techniques over Madrid Urban Area: Case Study of TRISHNA Mission. *Remote Sensing*, 11(10), 1251

Granero-Belinchon, Michel, Lagouarde, Sobrino, Briottet, 2019. Night Thermal Unmixing for the Study of Microscale Surface Urban Heat Islands with TRISHNA-Like Data. *Remote Sensing*, 11(12), 1449

Cubero-Castan, Chanussot, Achard, Briottet, Shimoni, 2015. A physics-based unmixing method to estimate subpixel temperatures on mixed pixels, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(4).

Granero-Belinchon, Michel, Achard and Briottet, Spectral Unmixing for Thermal Infrared Multi-Spectral Airborne Imagery over Urban Environments: Day and Night Synergy, *Remote Sens.* 2020, 12, 1871; doi:10.3390/rs12111871

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

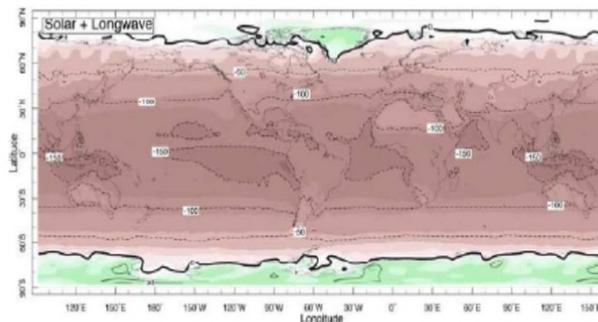
*Planches additionnelles*

Issu du cours de F. Codron (LOCEAN)

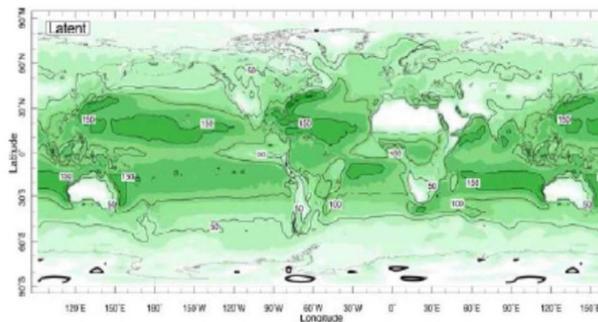
Flux de chaleur  
Surface->atmosphère

➤ Gains radiatif et pertes  
turbulentes en surface,  
sauf régions polaires.

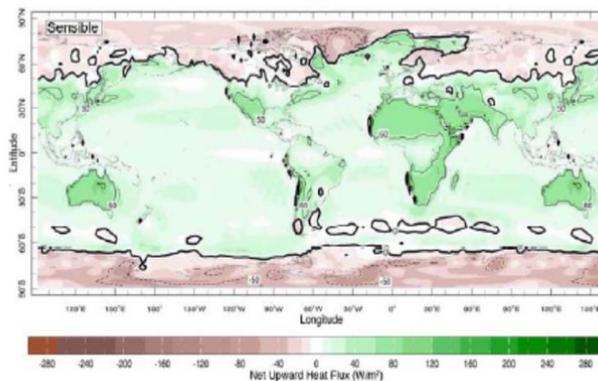
Radiatif



Latent



Sensible



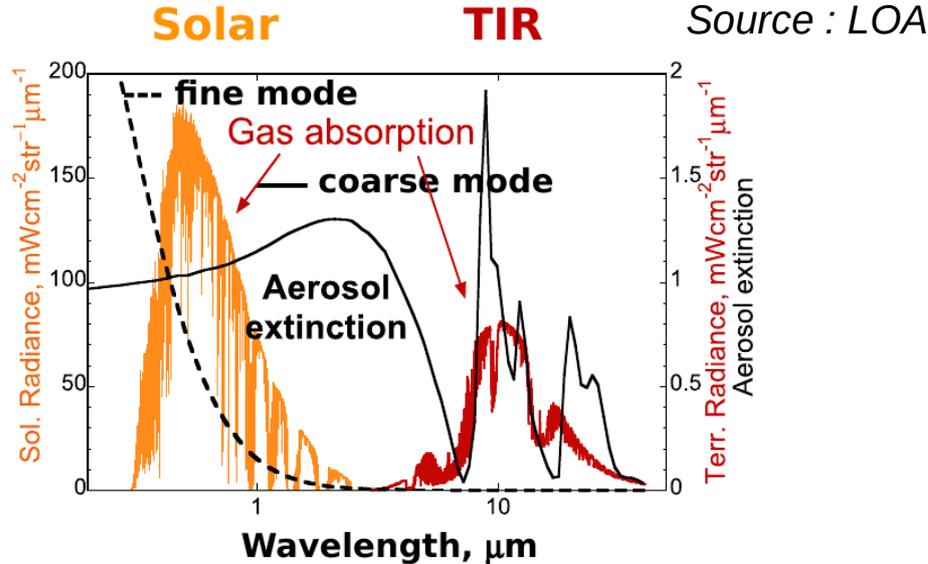
# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

B) Données atmosphériques : variables d'intérêts, mesures, verrous

Aérosols :

Effets radiatifs SW et LW

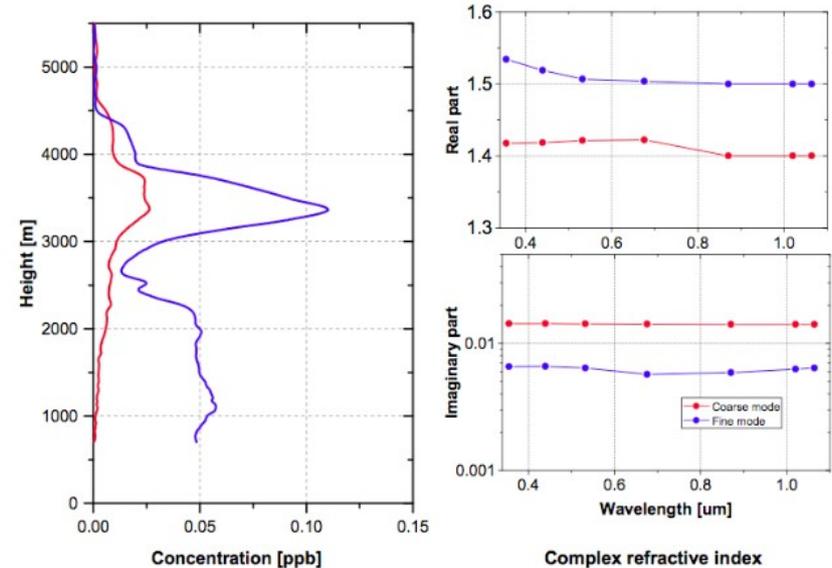
ex : poussière minérale (quartz)



Effet SW :  $-100\text{W/m}^2$  Haywood et al (2005)

Effet LW :  $+50\text{W/m}^2$

Exemple de caractérisation des aérosols à partir d'une synergie photomètre-lidar (campagne SHADOW-2 Sénégal)



Source : LOA

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

## B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

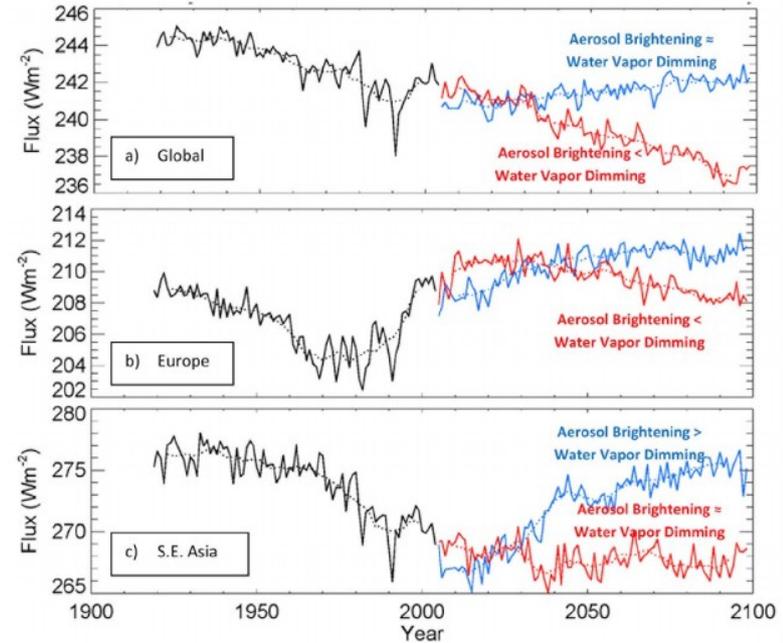
Aérosols et vapeur d'eau :  
Effet radiatif SW global

Global dimming and brightening [of SW radiation], a review : Martin Wild 2009  
Wild et al (2020), Haywood et al (2011)

Du au changement des émissions d'aérosols  
(économie, régulation de la pollution)

(Kvalevag et al 2007, Nabat et al 2014  
Gutiérrez et al 2020)

HAYWOOD ET AL.: FUTURE GLOBAL DIMMING/BRIGHTENING



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

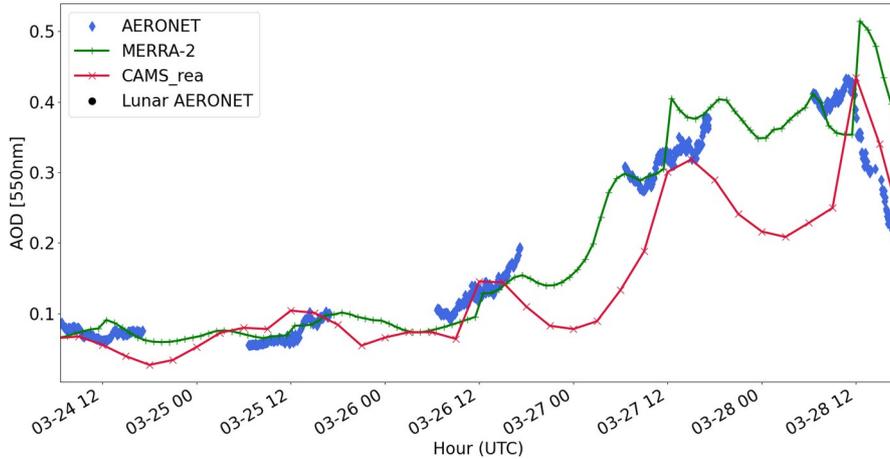
B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

Aérosols :

Variabilité, à différentes échelles (saison, journée)

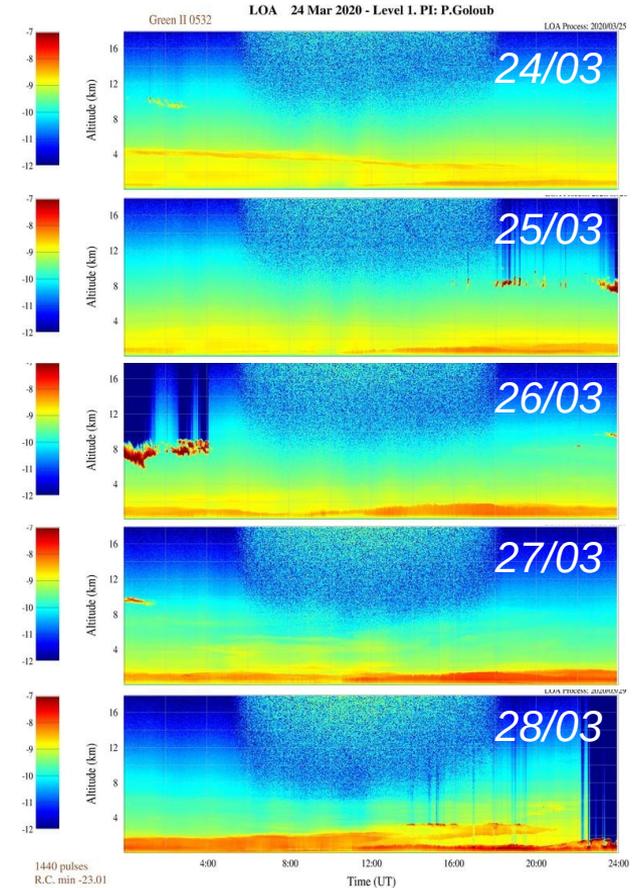
Illustration : Université de Lille, Villeneuve d'Ascq

Variation sur quelques jours en mars 2020



(analysé par G. Chesnoiu, 2021, doctorant LOA)

Profils Lidar de ces journées



# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

## B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

Nuages

**Transmittance atmosphérique "instantanée" (1 min): peut être très élevée et dépasser l'unité !**

A propos  
d'effets  
radiatifs  
3D

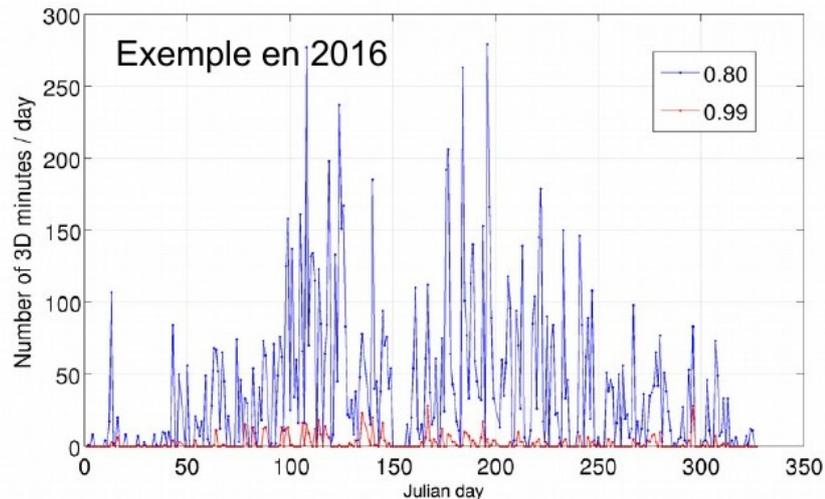
Explication: - couverture nuageuse fractionnaire cause des effets radiatifs 3D efficaces  
- les nuages se comportent comme des sources additionnelles  
- le rayonnement direct est élevé alors que le diffus augmente

Comptage des "3D minutes"

quand  $T > 0.80$

quand  $T > 0.99$

Pas  
des événements  
rares !



Important : ce n'est pas un artéfact du processus de mesure !

# Thème 1 : Données d'intérêt et leurs caractères multiéchelles

## B) Données atmosphériques : variables d'intérêt, mesures, verrous

Nuages

"plane parallel" methods. Inhomogeneous columns that are independent of each other  
**Independent Column Approximation (ICA)**, or using the  
**Independent Pixel Approximation (IPA)**.

A propos  
d'effets  
radiatifs  
3D

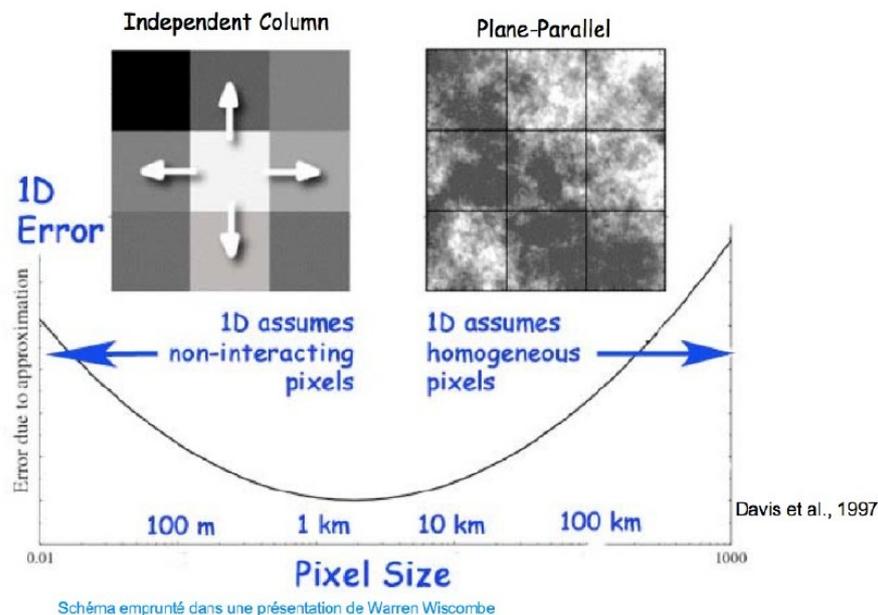


Figure – Impact of cloud heterogeneities at TOA as a function of the spatial resolution