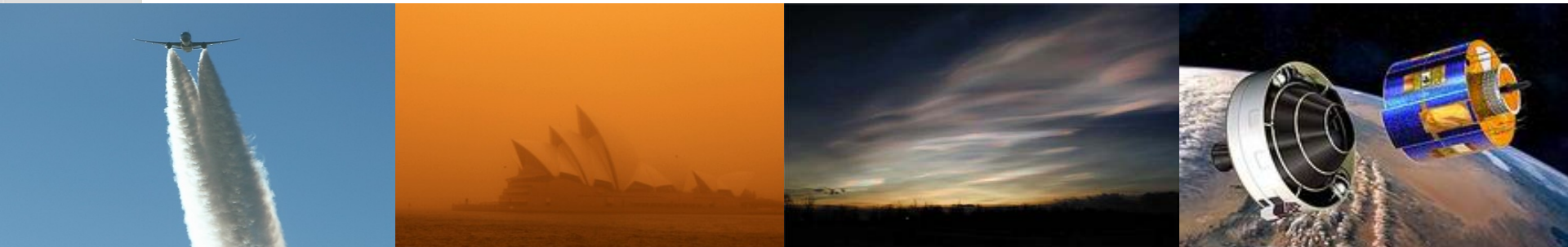


# Ressource solaire

Pierre Ineichen

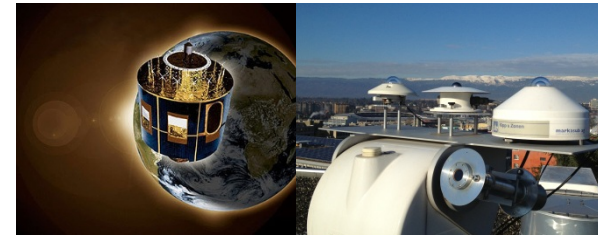
Université de Genève – Institut des sciences de l'environnement  
Département F.-A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau



# Ressource solaire: de la mesure à l'utilisation

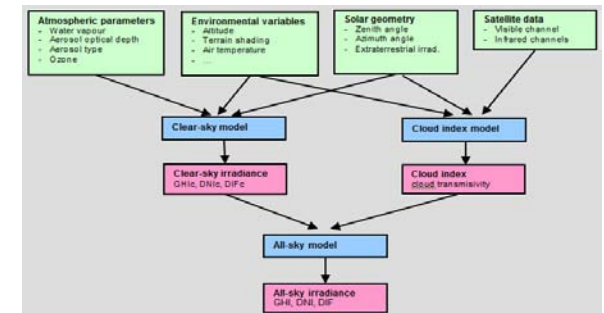
## Constat #1

- ☀ Il est illusoire de développer et de valider des modèles de la ressource solaire sans mesures au sol de grande précision



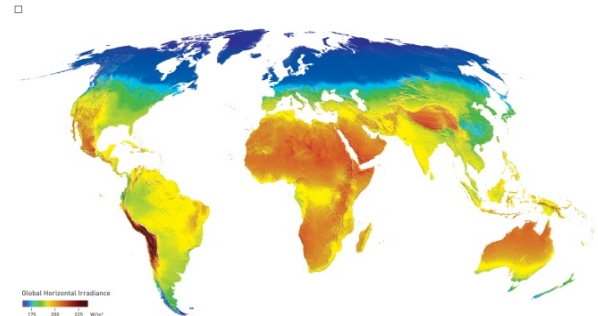
## Constat #2

- ☀ Des mesures de la ressource solaire bancables passent par un processus contraignant d'acquisition et strictes de contrôle de qualité

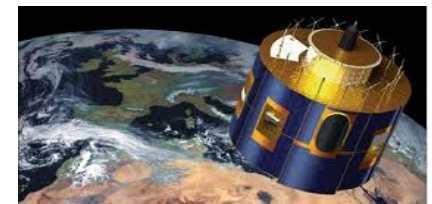
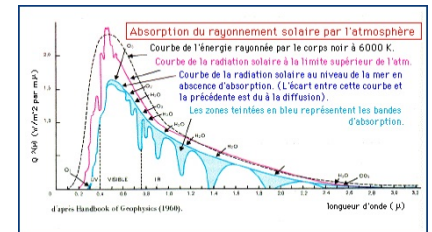
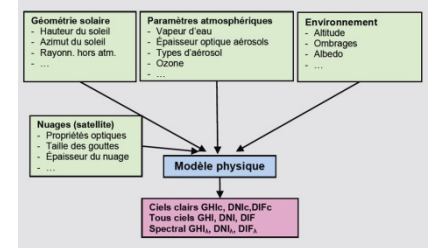
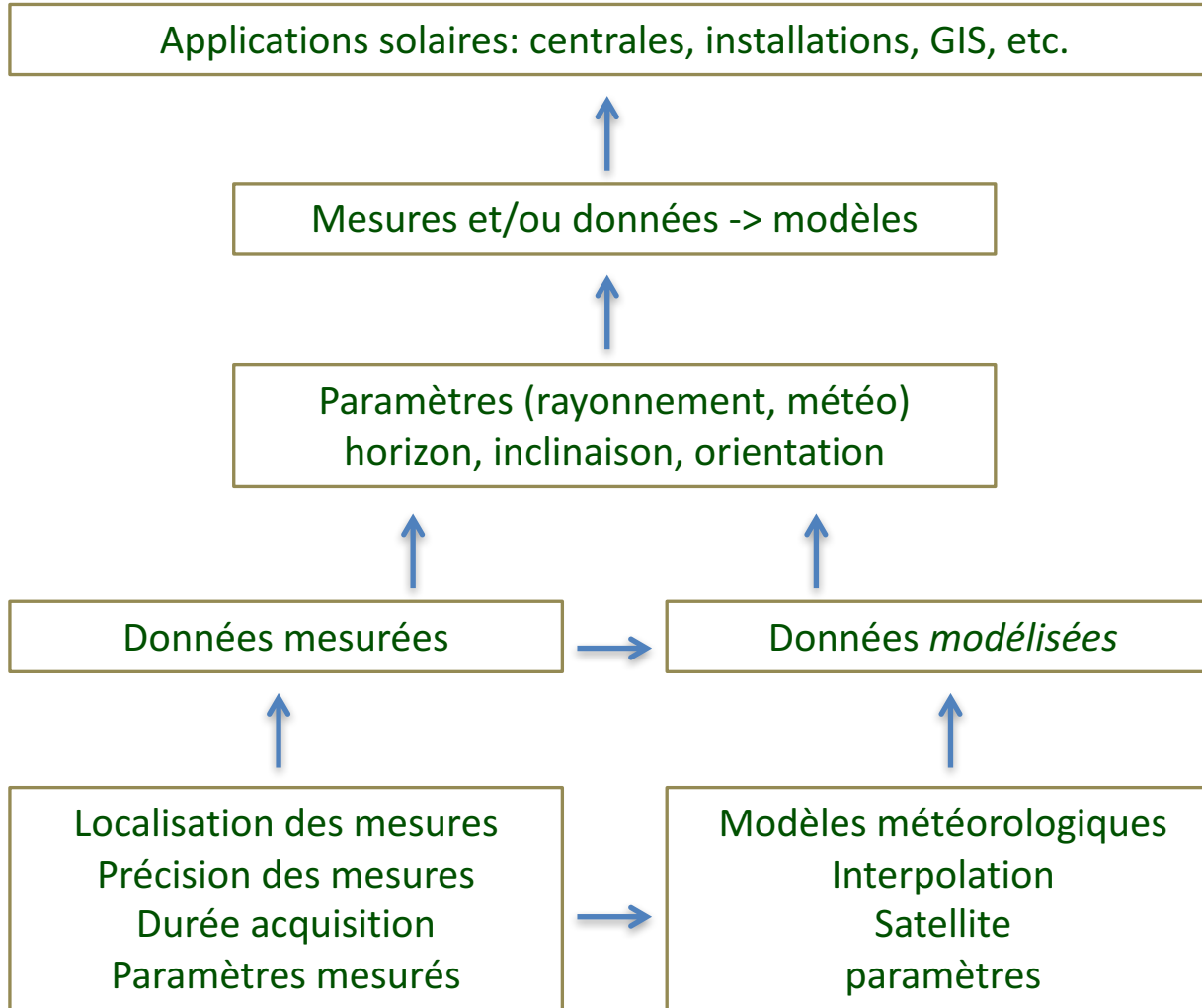


## Constat #3

- ☀ Des données modélisées de qualité sont basées sur la connaissance précise des données d'entrée aux modèles, de granularité spatiale et temporelle adaptées (principalement les aérosols et la vapeur d'eau contenus dans l'atmosphère)



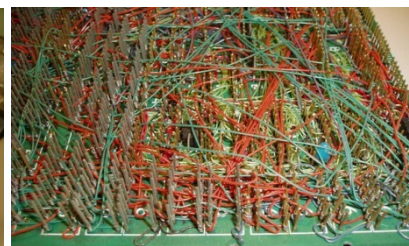
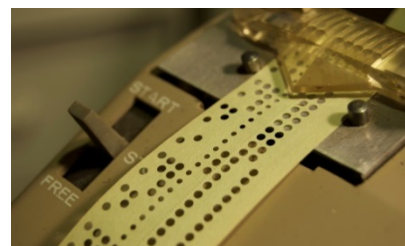
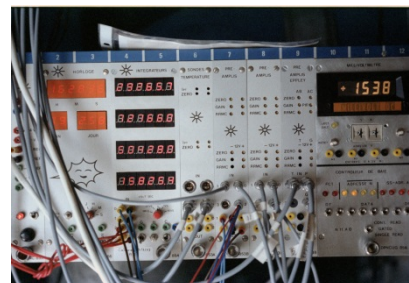
# Ressource solaire: de la mesure à l'utilisation



# Historique des mesures banquables à Genève

## Systèmes d'acquisition

- ✴ Impression graphique (1978 - 1979)
  - ✴ Digitalisation -> fichiers informatiques
- ✴ Télétype (1979-1980)
  - ✴ 10 mètres de ruban par jour
  - ✴ Relecture sur CDC8000
- ✴ Bandes magnétiques Tektronix
  - ✴ Relecture des cassettes non portables
- ✴ Acquisition sur PC et datalogger
  - ✴ Portabilité sur disquettes
- ✴ Datalogger (2010 - )
  - ✴ Transmission internet





# Historique des mesures bancaables à Genève

## Paramètres de l'acquisition

- ✱ ScII (1979-) et Sauverny (1980-1981)
  - ✱ Global, diffus, infra-rouge,  $T_a$  et  $T_h$  (HR)
- ✱ ScII (1986-)
  - ✱ Global, diffus, direct, verticaux, réfléchi, température, humidité et vent
- ✱ Ansermet (1990-)
  - ✱ Global, direct, illuminance, verticaux, luminance, température, humidité et vent
- ✱ Prairie (2010-)
  - ✱ Global, diffus, direct,  $T_a$ , HR et vent
- ✱ Battelle (2010-)
  - ✱ Global, direct, infra-rouge, température, humidité et vent
- ✱ Bernex (2010-)
  - ✱ Global, diffus, infra-rouge,  $T_a$ , HR et vent



# Historique des mesures banquables à Genève

	ScII					Sny	Jct	Bat	Ber	Pra	Pra
	1978	1979	1980	1986	1980	1991	2010	2010	2010	2010	2016
	1979	1980	1982	1987	1981	2010					
Horizontal global irradiance	CM5	CM5	CM5	CM10	CM6	CM10	CM10	CM10	CM10	CM10	CM10
Horizontal diffuse irradiance (shading ring)	CM5	CM5	CM5	CM10						CM10	
Horizontal diffuse irradiance (shading disk)				CM10	CM5						
Horizontal diffuse irradiance (SPN1)									SPN1		
Normal beam irradiance				NIP		NIP	NIP	SPN2			CHP1
Vertical north		CM5	CM6	CM10							
Vertical east		CM5	CM6	CM10							
Vertical south		CM5	CM6	CM10							
Vertical wset		CM5	CM6	CM10							
South 45°		CM5	CM6	CM10							
South 30° and 60°				CM10							
Infrared sky radiation		PIR	PIR	PIR	PIR				PIR		
Ultraviolet UVB (1994)						YES					
Illuminances (horizontal and vertical, 91-95)						LiCor					
Luminance (145 solid angles, 1991-1994)						PRC					
Ambient temperature											
Wet bulb temperature											
Relative humidity											
Wind speed and direction											
Enregistrement Résolution temporelle	Graphique 15'	Télétype 15 min	HP bandes magnétiques, 5'			Disquettes 5'	internet 1'				

Kipp + Zonen CM5 and CM10 pyranometers  
 Kipp + Zonen CHP1 pyréliomètre  
 Eppely Normal Incident Pyrheliometer (NIP)  
 Eppely infrared Pyrgeometer (PIR)

ScII University building  
 Sny Sauverny  
 Jct Jonction

Bat Battelle  
 Ber Bernex  
 Pra Prairie





# Evaluation de la ressource solaire

## Mesures au sol

- ☀ situation caractérisation du site de mesure
- ☀ type de senseurs, calibration et caractérisation

## Archivage des mesures

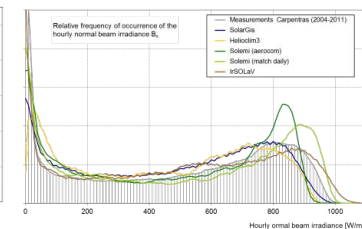
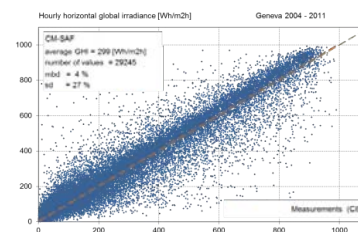
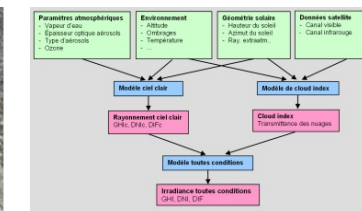
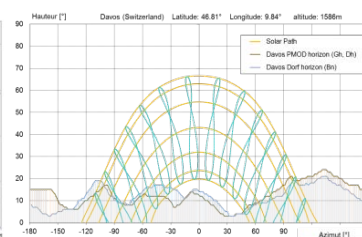
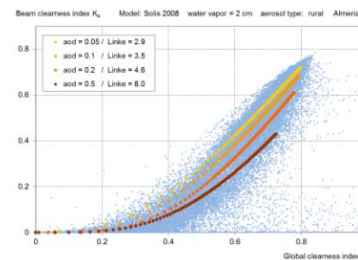
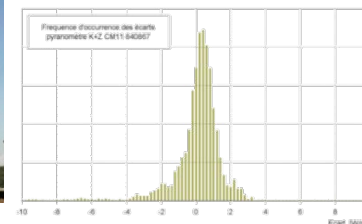
- ☀ Continuité des mesures, remplacement des valeurs manquantes
- ☀ Contrôle de qualité (en ligne et à long terme)
- ☀ format, Meta data, dissémination

## Modélisation

- ☀ données mesurées (global, direct, etc.)
- ☀ données secondaires (aérosol, vapeur d'eau, etc.)
- ☀ granularité (temporelle, spatiale)
- ☀ composantes (ciel clair, direct, incliné, etc.)

## Validation

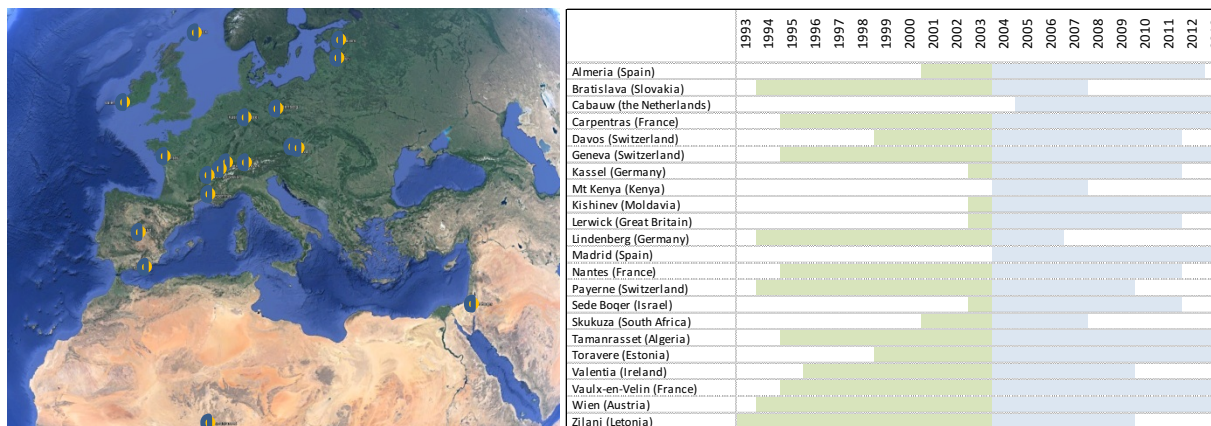
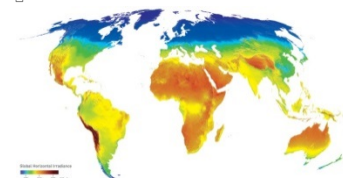
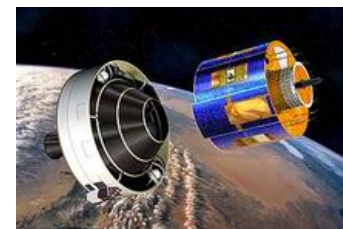
- ☀ Données au sol (climat, latitude, altitude, etc.)
- ☀ Contrôle de qualité des données modélisées
- ☀ Statistiques de comparaison (1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> ordre)
- ☀ Résultats: précision, présentation, etc.



# La ressource solaire par un exemple

## Données satellitaires

- ☀ images satellite (MeteoSat, Goes, GSM, etc.)
- ☀ bonnes mesures au sol: variété en lat/long/alt, climat, etc.
- ☀ durée d'acquisition: plusieurs années
- ☀ composantes: au minimum les composantes à valider
- ☀ granularité comparable entre les mesures et les modèles
- ☀ disponibilité et précision des données d'entrée (*aod*, *w*, etc.)
- ☀ bon modèle de ciel clair pour la normalisation
- ☀ analyse des résultats, dépendance (paramètres, composantes, saison, etc.)
- ☀ précision du modèle versus variabilité interannuelle

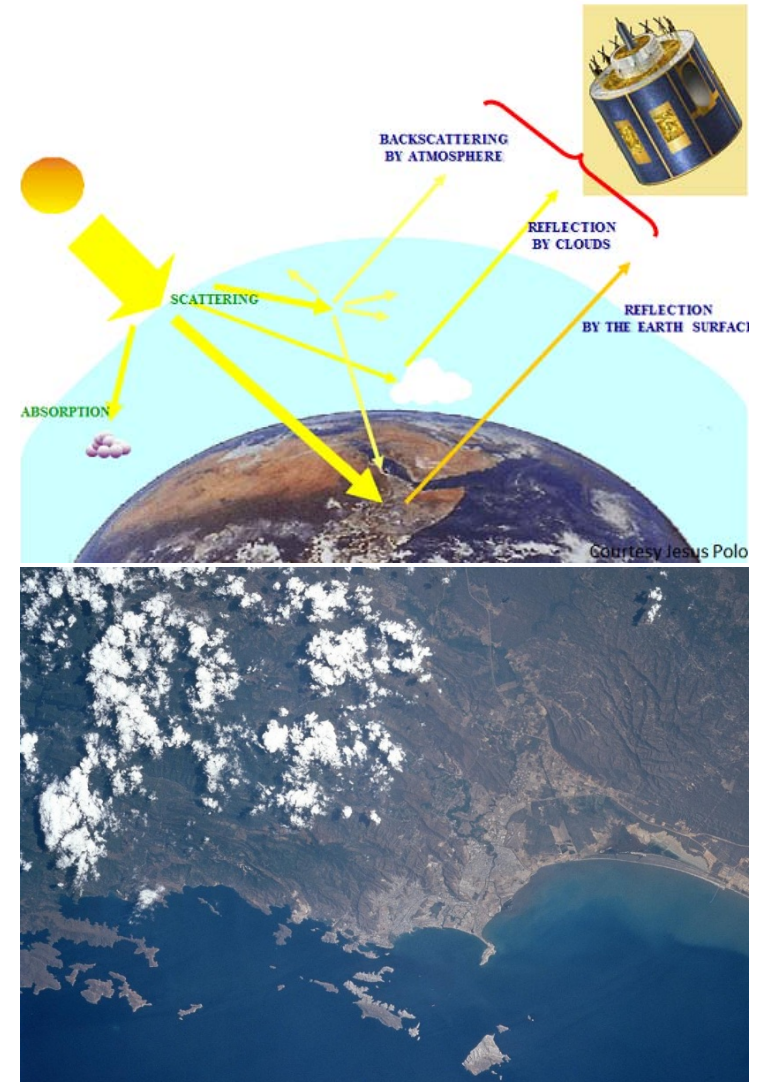




# Données satellitaires: contexte

## Données satellitaires

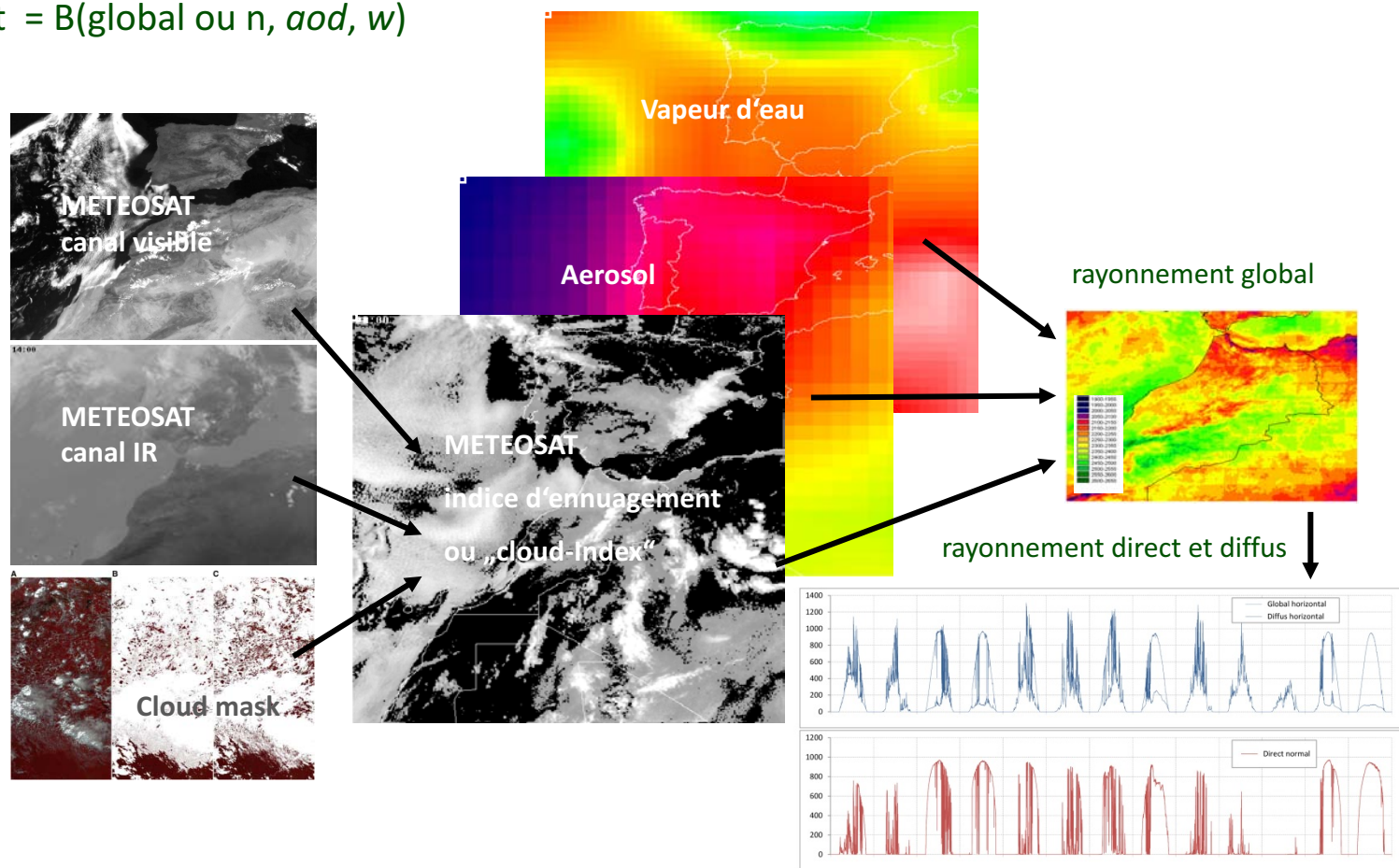
- ✧ résolution spatiale: 2.5 x 2.5 km
- ✧ résolution temporelle: 15 min
- ✧ réflexion -> transmission
  - ✧ top atmosphère
  - ✧ Atmosphère
  - ✧ sol
- ✧ géométrie: angle satellite/soleil
- ✧ état atmosphérique
  - ✧ ciel clair
  - ✧ toutes conditions (nuages)
- ✧ paramètres d'entrée «fixes»
  - ✧ Rayleigh, ozone, gaz ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ , etc.)
- ✧ paramètres variables
  - ✧ turbidité (type et quantité)
  - ✧ vapeur d'eau
  - ✧ nuages (type et quantité)



# Principe de base des modèles satellitaires

## Données satellitaires

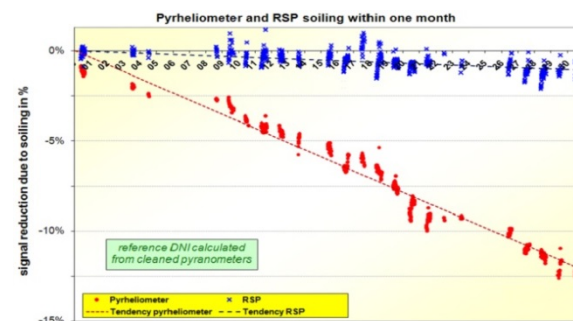
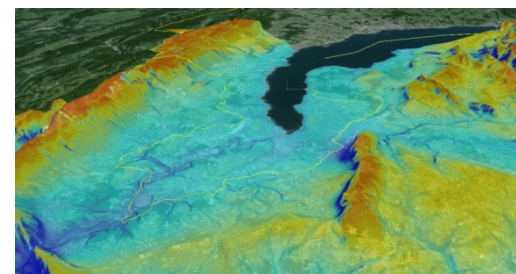
- ☀ images visibles et IR -> masque de nuages et indice d'ennuagement  $n$  (compris entre 0 et 1)
- ☀ global =  $G(n, \text{aérosol } aod, \text{vapeur d'eau } w)$
- ☀ direct =  $B(\text{global ou } n, aod, w)$



# Données de validation: mesures au sol

## Mesures

- ☀ Type de mesures
  - ☀ continues (données bancables)
  - ☀ temporaire (projet spécifique)
- ☀ Zone climatique
  - ☀ urbain, semi urbain ou rural
- ☀ Caractéristiques du site
  - ☀ horizon géographique
  - ☀ horizon proche
- ☀ Paramètres mesurés
  - ☀ types de senseurs (pyranomètres, cellule PV, etc.)
  - ☀ méthodes (arceau, suiveur de soleil, RSR, etc.)
- ☀ Calibration des senseurs
  - ☀ étalon primaire/secondaire
  - ☀ radiomètre absolu
- ☀ Salissure – nettoyage – entretien - suivi





# Contrôle de qualité (mesures et modèle)

## Heure d'acquisition

- ☀ Symétrie/temps solaire (irradiance ou indice de clarté  $K_t$ )

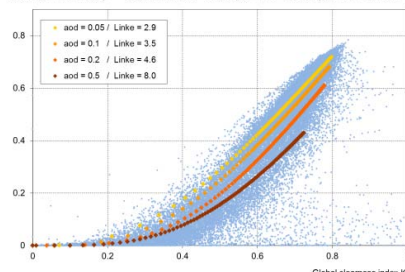
## Calibration absolue des senseurs

- ☀ comparaison avec d'autres données (aeronet, site voisin, etc.)
- ☀ comparaison année/année (stabilité)

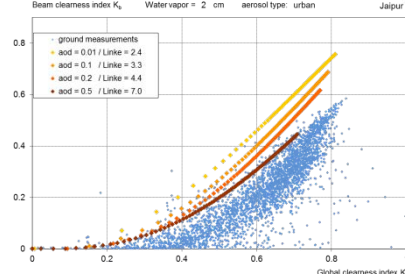
## Cohérence des composantes

- ☀ 3 composantes: *closure equation*: global = direct + diffuse
- ☀ 2 composantes: cohérence avec le modèle ciel clair Solis

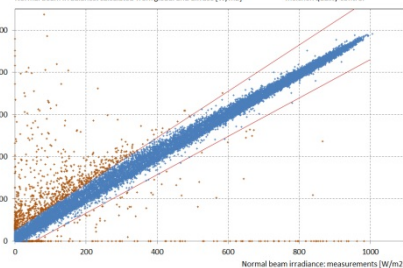
Beam cleanness index  $K_b$  Model: Solis 2008 water vapor = 2 cm aerosol type: rural Almeria



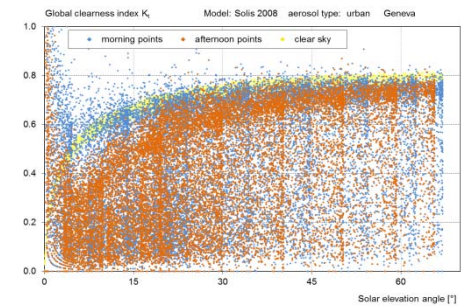
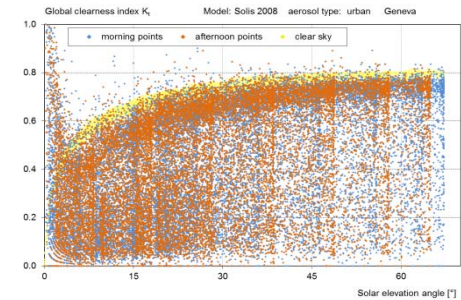
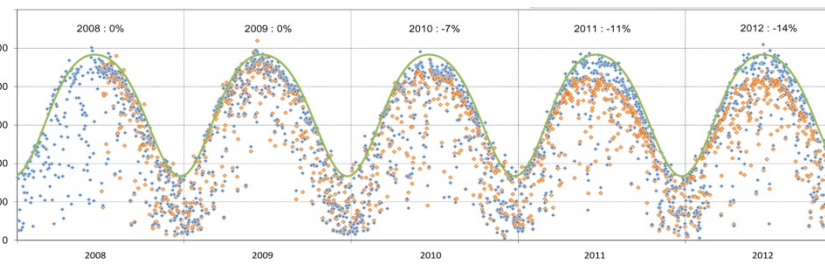
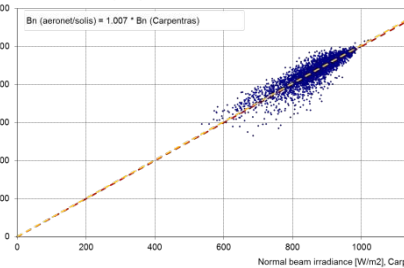
Beam cleanness index  $K_b$  Water vapor = 2 cm aerosol type: urban Jajpur



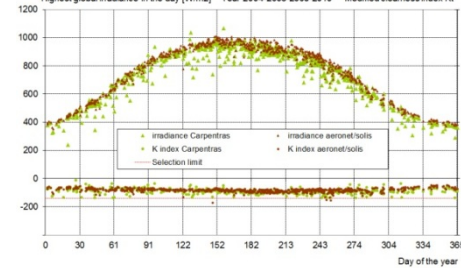
Normal beam irradiance: calculated from global and diffuse [W/m2] Ineichen quality control



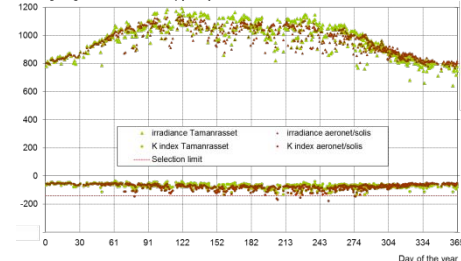
Normal beam irradiance [W/m2] aeronet/solis Year 2004-2006-2008-2010 Hourly average



Highest global irradiance in the day [W/m2] Year: 2004-2006-2008-2010 Modified cleanness index  $K_t'$



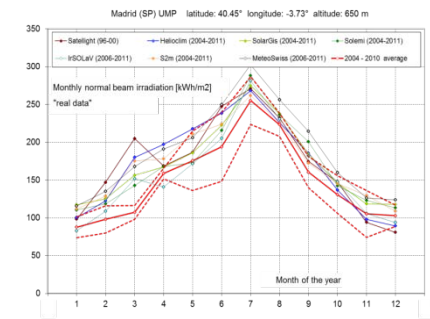
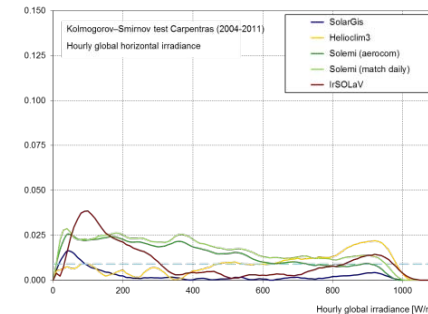
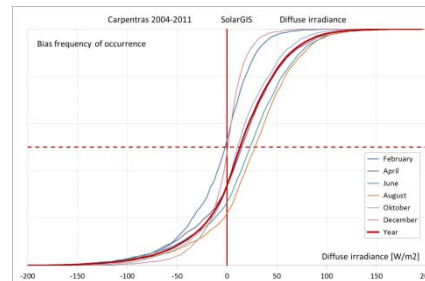
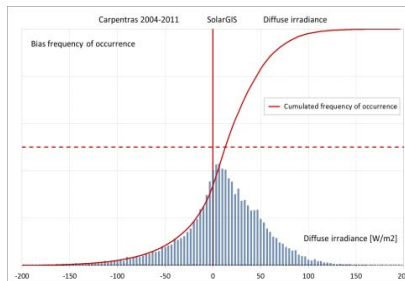
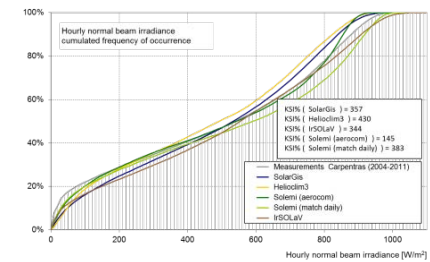
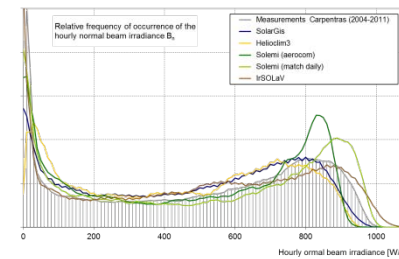
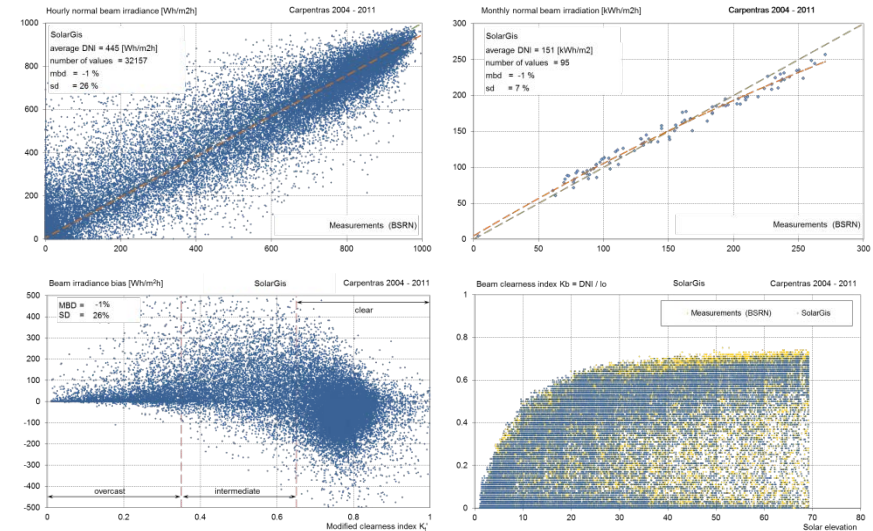
Highest global irradiance in the day [W/m2] Year: 2006-2007-2008 Modified cleanness index  $K_t'$



# Présentation et interprétation des résultats

## Présentation des résultats de validation

- ☀ scatter plots ( $G_h$ ,  $D_h$ ,  $B_n$ )
- ☀ dépendance du biais (type de ciel,  $aod$ )
- ☀ indice de clarté / hauteur du soleil
- ☀ distribution de fréquence
  - ☀ irradiance,  $K_t$ , cumulée
  - ☀ biais autour de l'axe 1:1
- ☀ comparaison des valeurs mensuelles: dépendance saisonnière
- ☀ tables, histogrammes, etc.



# Données d'entrée

## Aérosols

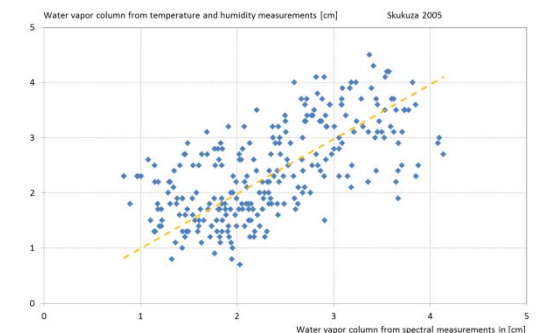
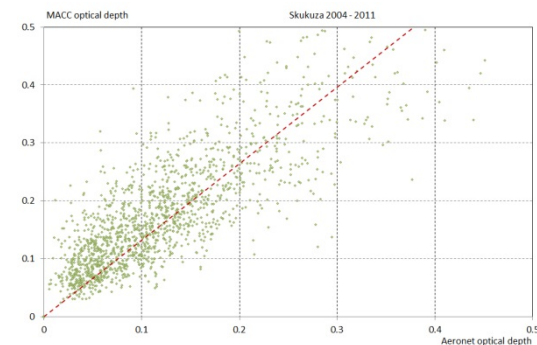
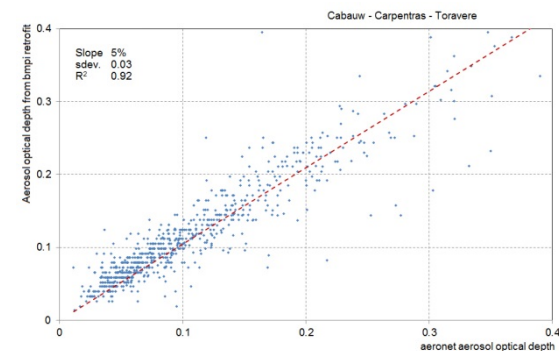
- ✴ Projet MACC-II: traité par MinesParisTech, 4 valeurs/jour
- ✴ par mesures spectrales (valeurs journalières, réseau aeronet)
- ✴ par retrofit des  $G_h$  et  $B_n$  avec Solis
- ✴ par équivalence de l' $aod$  large bande à 700 nm ( $B_n$ )

## Valeur d'eau

- ✴ Par mesures spectrales (réseau aeronet)
- ✴ Par modèles à partir de  $T_a$  et  $HR$

## Comparaison

- ✴ Solis retrofit/aeronet  $aod$  : 5% biais, bonne corrélation (les deux sont issues de mesures au sol)
- ✴ MACC-II/aeronet: biais et dispersion
- ✴  $w(T_a, HR)$ /aeronet: biais négligeable, dispersion importante, peu d'impact sur les résultats des modèles

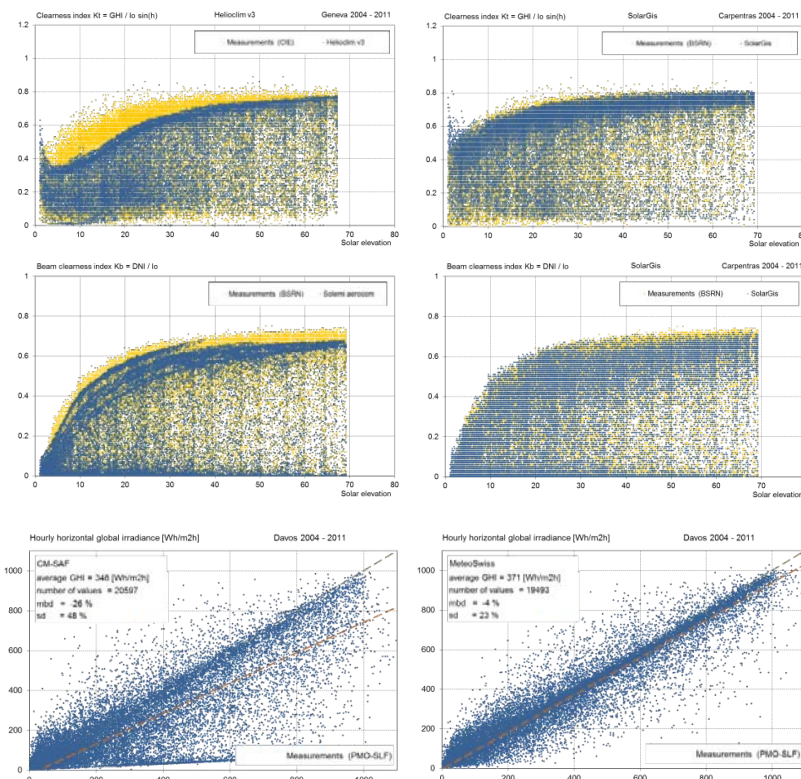




# Résultats de la validation

## Comportement général du modèle

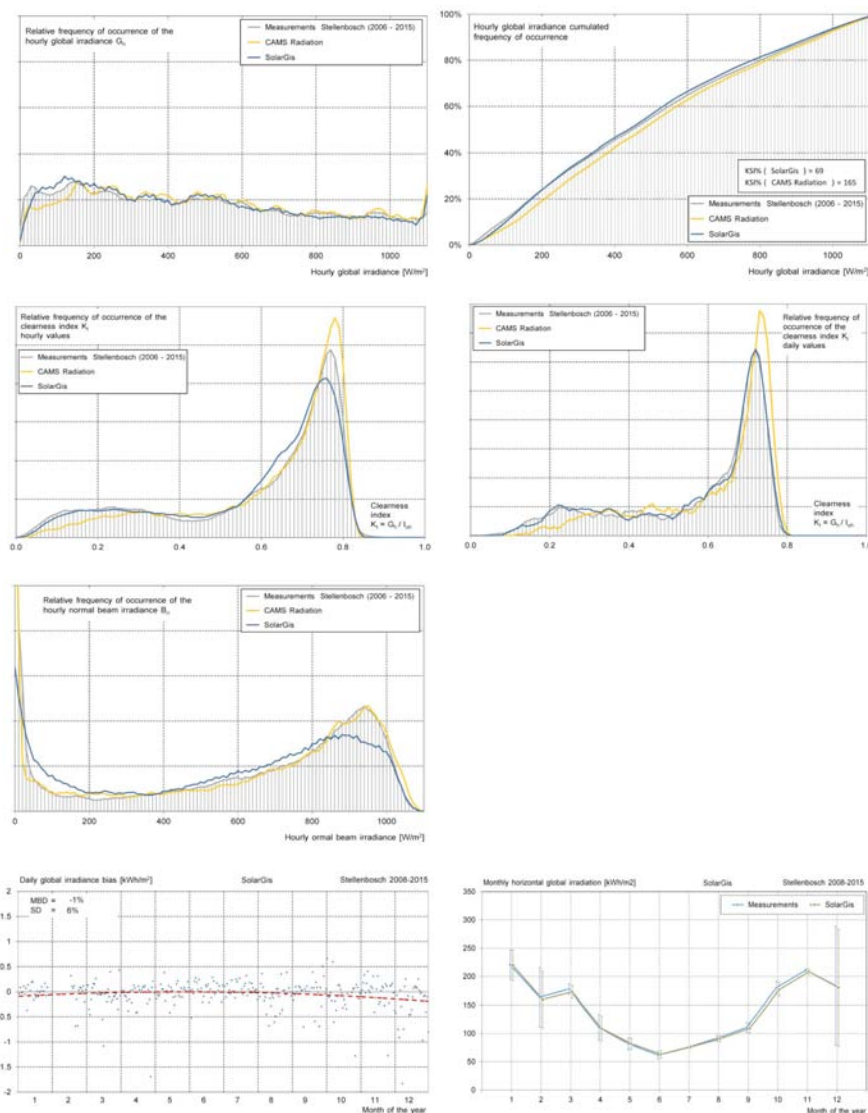
- ☀️ mauvaise prise en compte du ciel clair, valeurs maximales non atteinte par le modèle
- ☀️ meilleurs résultats obtenus avec des données d'entrée journalières plutôt que mensuelles
- ☀️ meilleure prise en compte de la neige par des modèles *alpins*



# Résultats de la validation

## Résultats de la validation

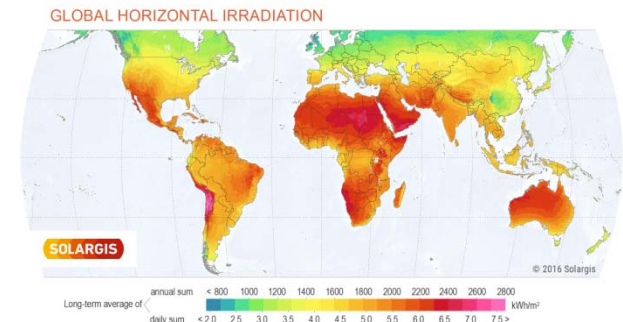
- ☀ cohérence des fréquences de distribution du rayonnement global
- ☀ différence de comportement suivant la granularité temporelle ( $G_h$ )
- ☀ différence de comportement suivant la composante/modèle ( $B_n$ )
- ☀ pas de sensibilité particulière à la saison



# Construction d'une base de données banquable

## Données satellitaires: rayonnement global

- ☀ Ciel clair, données d'entrée
  - ☀ Aérosols (MACC-II), résolution 75km x 125km, 4x / jour
  - ☀ Vapeur d'eau (©NOAA), résolution 18-27km, 3-4x / jour
  - ☀ Ozone, fixé à 340 Dobson
- ☀ Nuages
  - ☀ Indice d'ennuagement dérivé de la radiance réfléchie mesurée par le satellite (plusieurs zones spectrales, IR, etc.)
  - ☀ Résolution environ 3km x 3km, 30' -> 2004, 15' dès 2005
  - ☀ Masque des nuages, type, altitude, composition (glace, vapeur, gouttes), albédo du sol (neige, désert, zones arides), terrain complexe (vallées, etc.)
- ☀ Désagrégation des données, horizon
  - ☀ Normaliser les résolutions spatiale et temporelle
  - ☀ Résolution du terrain SRTM-3 à 250m x 250m (couches GIS altitude)
- ☀ Rayonnement global à 250m x 250m toutes les 15 minutes

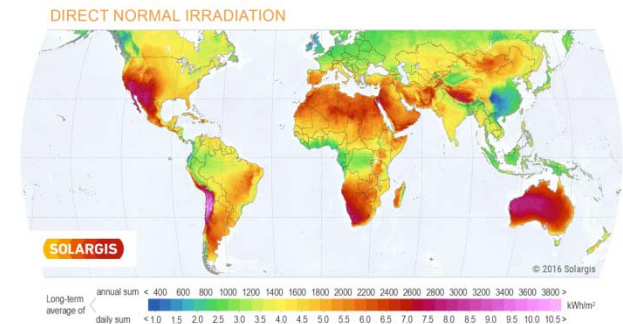




# Construction d'une base de données banquable

## Données satellitaires: rayonnement direct

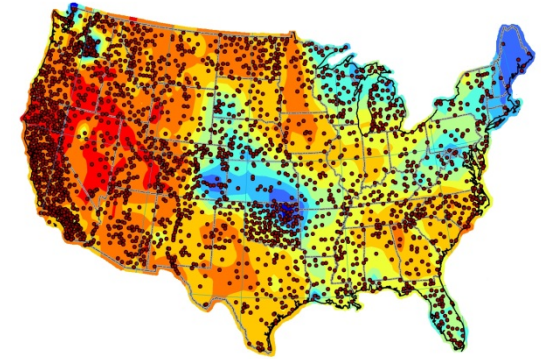
- ✴ Rayonnements direct, diffus et inclinés
  - ✴ Modèle de séparation du rayonnement global
    - ✴ Basés sur l'indice de clarté et la variabilité
    - ✴ Ré-analyse au moyen du ciel clair
  - ✴ Modèle de transposition
    - ✴ Modèles simples non-isotropes
- ✴ Adaptation locale des données satellitaires (non-automatique)
  - ✴ Conditions
    - ✴ Mesures sur site d'au moins 12 mois de qualité contrôlée
    - ✴ Données satellitaires les plus précises possibles
    - ✴ *Dévi*ation systématique entre les mesures et les données satellitaires
  - ✴ 2 méthodes d'adaptation possibles
    - ✴ appliqué sur les rayonnements par recalibration du modèle et/ou adaptation des fonctions de distribution des fréquences d'occurrence (ou un mix)
    - ✴ appliqué sur les données d'entrée par ré-analyse du  $K_t$ , et/ou de  $aod$  et  $w$



# Construction d'une TMY (année moyenne, typique, ...)

---

Année météorologique typique (*Typical Meteorological Year*)



- ✧ Définition
  - ✧ Réduction de la quantité de données (simulation)
  - ✧ Représentative du climat local
  - ✧ Adaptée à l'application pour laquelle elle est développée
- ✧ Critères de sélection
  - ✧ Différences minimales statistiques annuelles et mensuelles TMY/mesures long terme
  - ✧ Maximum de similarité des fréquences de distribution cumulées mensuelles
  - ✧ Persistance de configurations spécifiques (séquences de jours)
- ✧ Données d'entrée
  - ✧ Représentativité géographique: climat local et régional
  - ✧ Représentativité temporelle (période de temps couverte par les données originales)
  - ✧ Origine des données, mesurées ou satellitaires. Importance du QC
  - ✧ Granularité temporelle: généralement horaire (très rarement sub-horaire)
- ✧ Pondération
  - ✧ Suivant la destination: thermique, photovoltaïque, concentration, etc.
  - ✧ 5-10% température, 5-10% vent, 80-90% rayonnement (50-70%  $G_h$ , 30-50%  $B_n$ )

# Construction d'une TMY

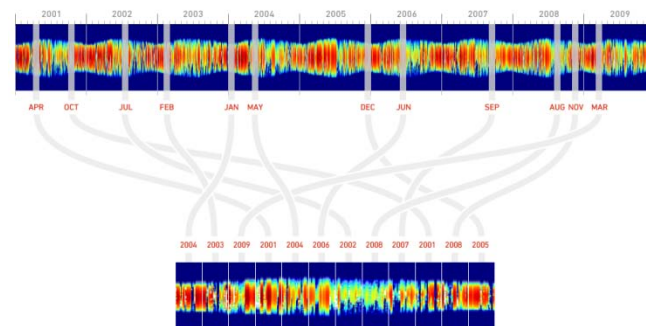
## Année météorologique typique (*Typical Meteorological Year*)

### ☀ Méthodes de construction

- ☀ Mois par mois: sélection de chaque mois le plus proche de la moyenne du long terme
- ☀ Par exclusion pas à pas des mois individuels (moyennes, fonctions cumulées, etc.), puis sélection des mois par persistance des conditions météorologiques
- ☀ Par similitude des moyennes mensuelles et des distributions de fréquences cumulées, puis recalibration si la moyenne s'éloigne de plus de 1.5%
- ☀ Par déplacement d'une fenêtre de 365 jours par intervalle de 1 jour. Peut être appliquée sur le seul  $B_n$ , ou conjointement sur le  $G_h$  et le  $B_n$

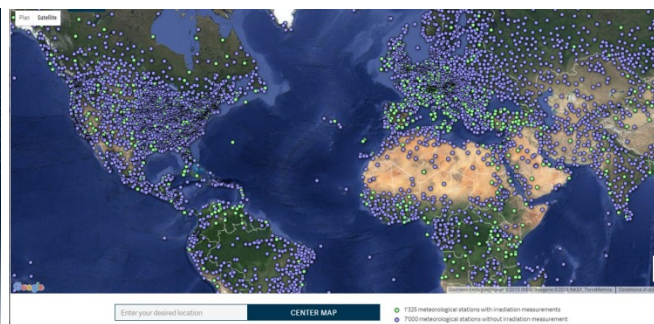
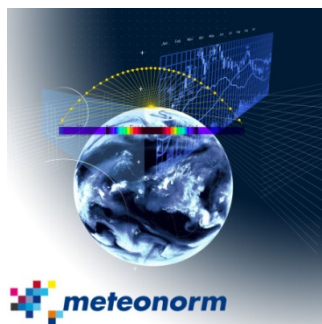
### ☀ Particularités

- ☀ Les TMY sont peu volumineuses, faciles à utiliser en simulation
- ☀ Les TMY peuvent être moyennes ou conservatives
- ☀ Les TMY ne devraient jamais être considérées pour l'estimation de la ressource banquable
- ☀ Seules les séries à long termes contiennent toutes les informations de variabilité à court et long terme, les situations extrême, etc.

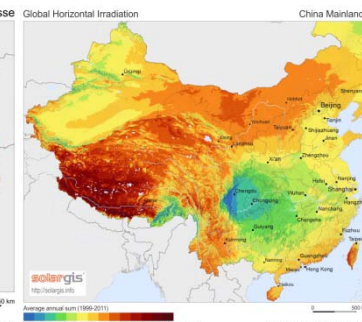
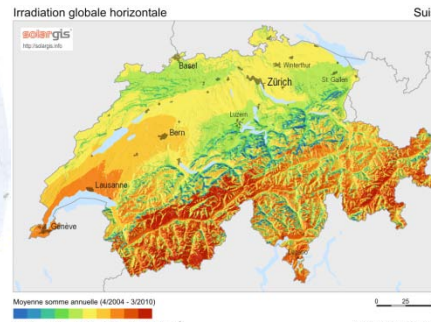
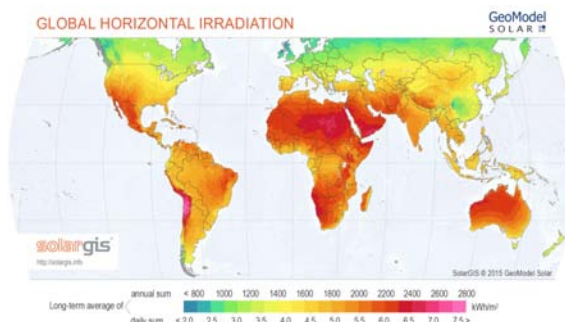


# Accès à la ressource

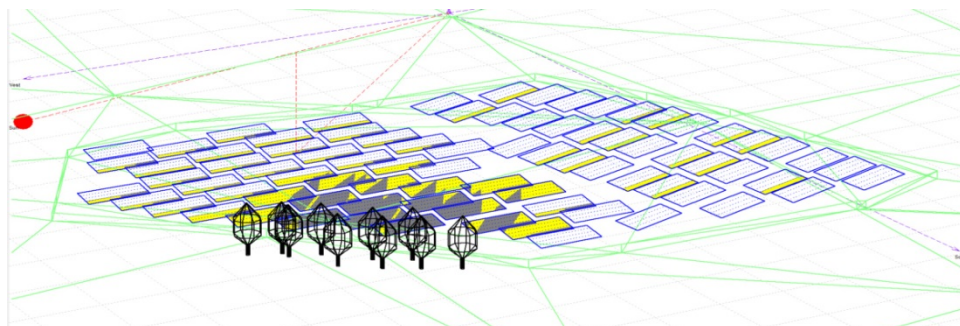
- ☀ Meteonorm:  
bases de données  
MN1: 1985



- ☀ Satellite:  
cartes et base de  
données réelles,  
réelles ou  
moyennes



- ☀ TMY:  
données typiques  
représentatives







# Accès aux données

## Méta-données

### ☀ Paramètres en accès (mesures et modèles)

```
# Station      : Geneve (Battelle)   annee      : 2016
# Latitude     : 46.1760 N          Longitude: 6.1390E          altitude: 432m
#
# doy          : jour de l'annee
# time         : fin de la periode d'integration - UTC+1
# lt           : temps des horloge (legal) utilise pour le calcul de la geometrie solaire - UTC+1
# se az        : hauteur et azimut du soleil au temps legal
# Gh Dh Bn     : rayonnements global et diffus horizontaux et normal plan suiveur en [Wh/m2h]
#              : le rayonnement diffus est calcule a partir du global et du direct
# Ta HR        : temperature ambiante [°C] et humidite relative [%]
# w            : colonne d'eau atmospherique pr,cipitable en [cm]
# vv           : vitesse du vent [m/s]
# dv           : direction du vent - provenance N=00 W=900 S=1800 E=2700
# pr           : pression atmospherique au niveau de la mer [hp]
#
# Rayonnement incline evalue a partir des rayonnements global et direct avec un coefficient d'albedo de 20%
# Modele de Perez: R. Perez et al. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. Solar Energy 39 pp 221-231 (1987)
#
# Gn Ge Gs Gw  : rayonnement global sur plan vertical - nord - est - sud et ouest en [Wh/m2h]
# G35e G35s G35w : rayonnement global sur un plan incline a 350 et oriente - est - sud et ouest [Wh/m2h]
# G45s          : rayonnement global sur un plan incline a 450 et oriente - est - sud et ouest [Wh/m2h]
# G35_45        : rayonnement global sur un plan incline a 350 et oriente a 450 (sud=0 positif a l'ouest) [Wh/m2h]
# Gtrack        : rayonnement global sur un plan suiveur perpendiculaire aux rayons du soleil [Wh/m2h]
# min sun       : duree d'ensoleillement en minutes calculee sur la base d'un rayonnement direct minimum de 120 [W/m2]
# IR            : bilan radiatif dans le domaine infrarouge [Wh/m2h]
# IRd           : rayonnement infrarouge entrant [Wh/m2h]
# IRup          : rayonnement infrarouge sortant [Wh/m2h]
# val. manquantes : -99
```

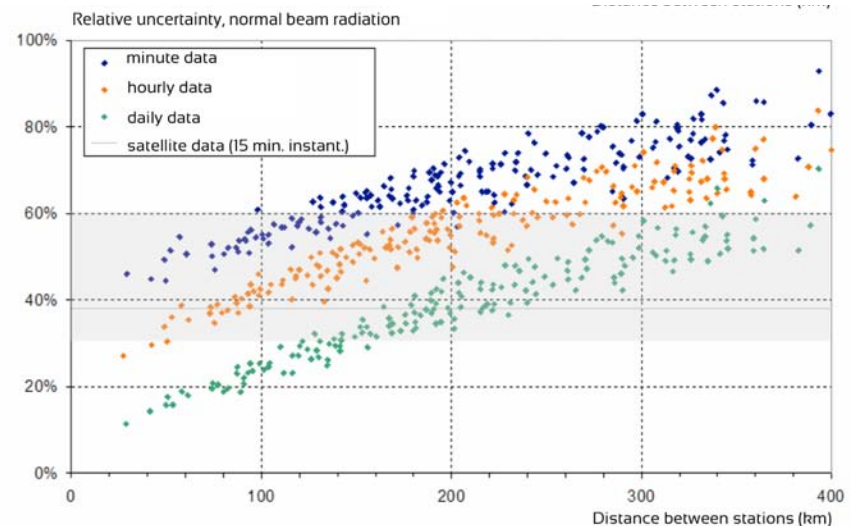
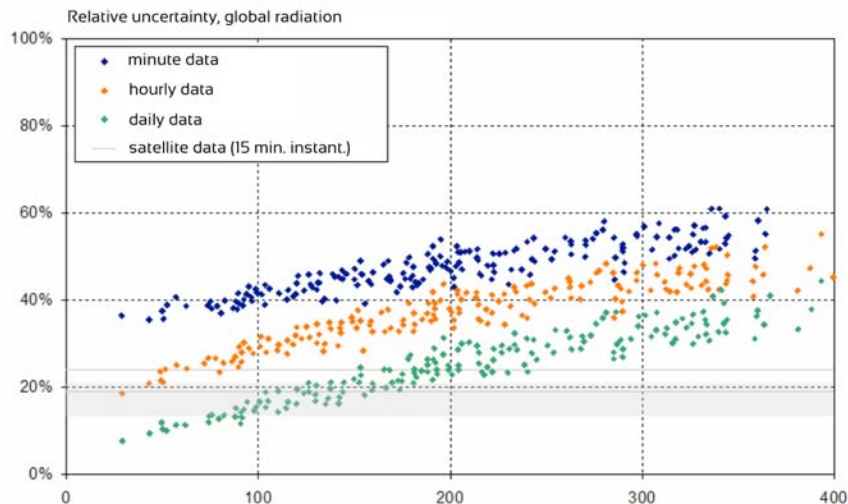
# Conclusions

Pour obtenir des données bancables:

- ✴ mesures au sol à long terme
- ✴ Variété lat/long/alt, climat, etc.
- ✴ contrôle de qualité stricte
- ✴ modèles dûment validés

Précision:

- |          |  |  |
|----------|--|--|
| ✴ heure: | biais $\cong 0$ , $sd(G_h) = 17\text{-}20\%$ , | biais $\cong 2\%$ , $sd(B_n) = 34\text{-}50\%$ |
| ✴ jour:  | biais $\cong 0$ , $sd(G_h) = 8\text{-}12\%$ ,  | biais $\cong 2\%$ , $sd(B_n) = 20\text{-}32\%$ |
| ✴ mois:  | biais $\cong 0$ , $sd(G_h) = 3\text{-}6\%$ ,   | biais $\cong 2\%$ , $sd(B_n) = 9\text{-}17\%$  |



# Merci de votre attention

