

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



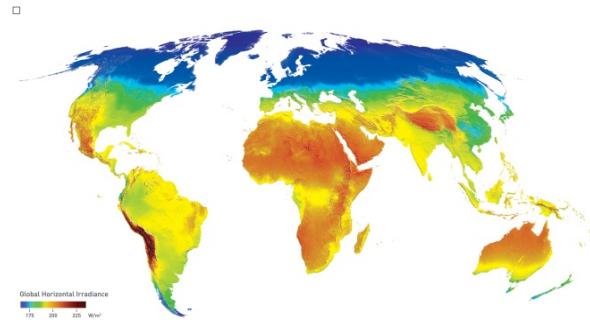
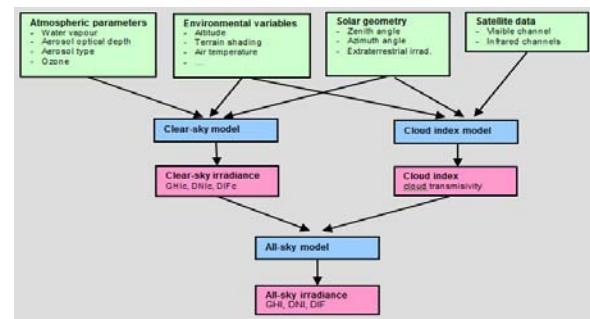
Constat #2

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

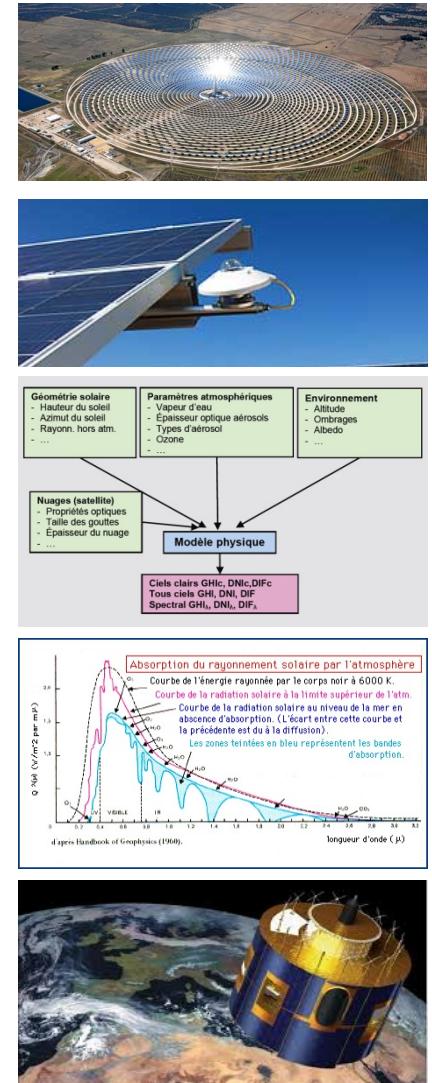
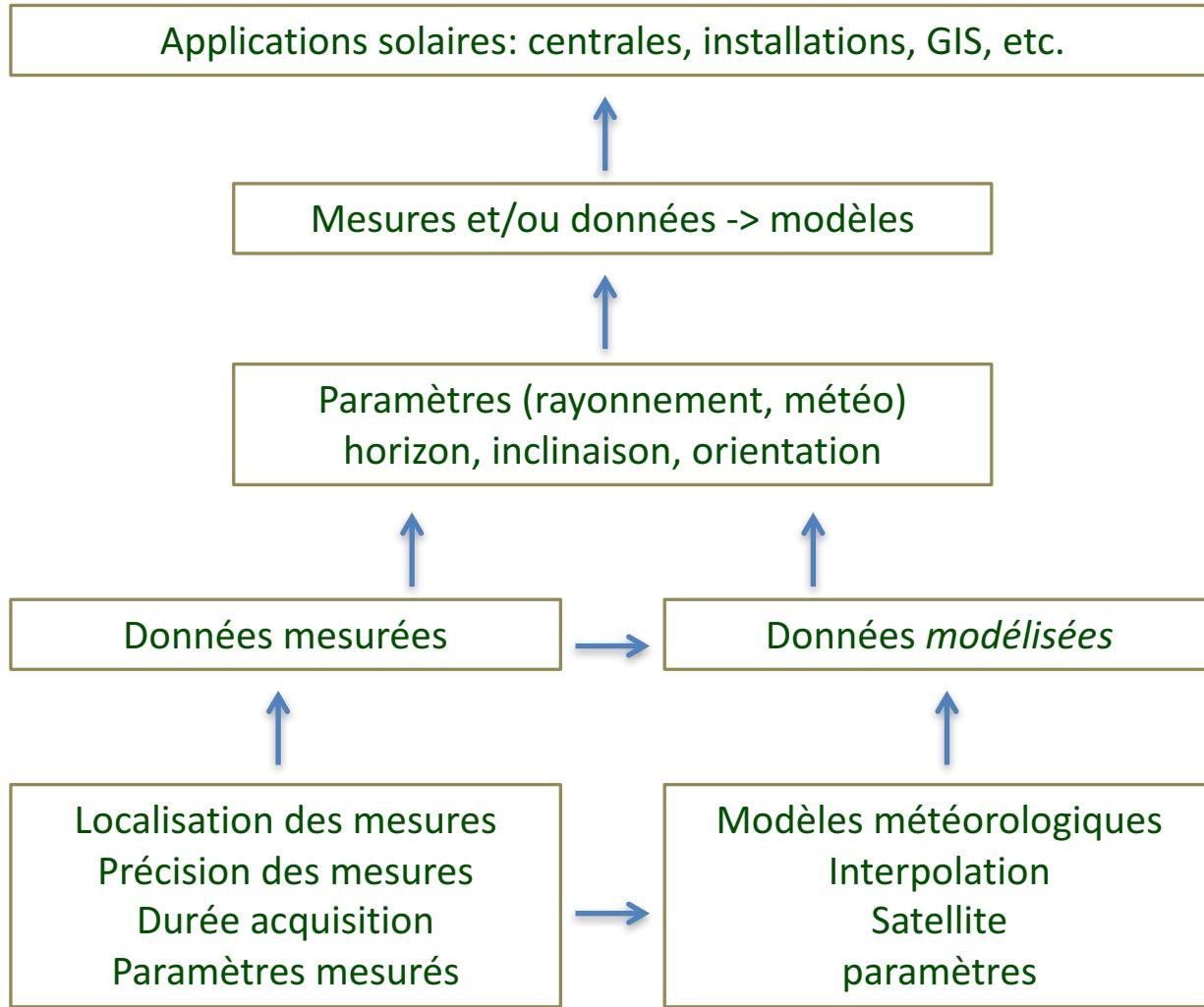


Constat #3

- 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)



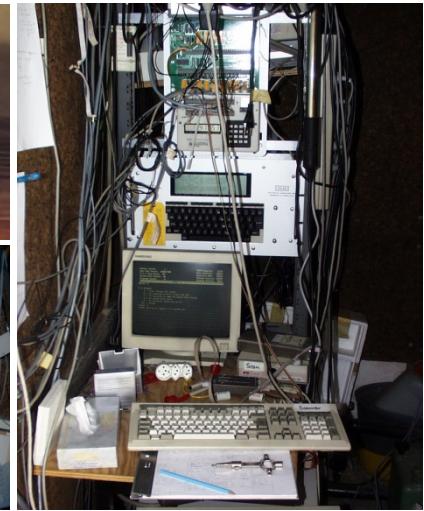
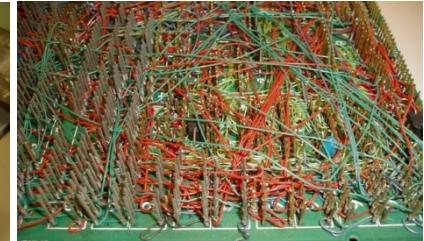
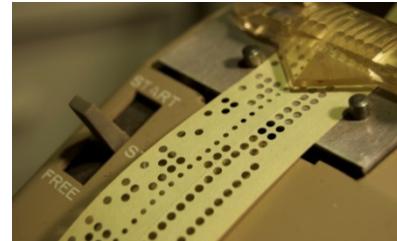
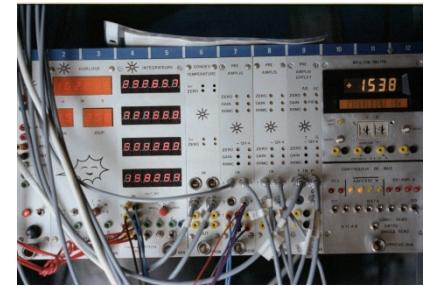
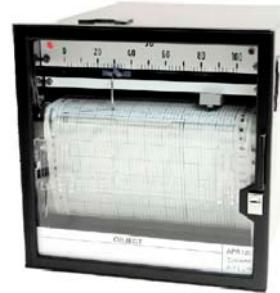
Ressource solaire: de la mesure à l'utilisation



Historique des mesures banquables à Genève

Systèmes d'acquisition

- ✳️ Impression graphique (1978 - 1979)
 - ✳️ Digitalisation -> fichiers informatiques
- ✳️ Télétipe (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 banquables 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

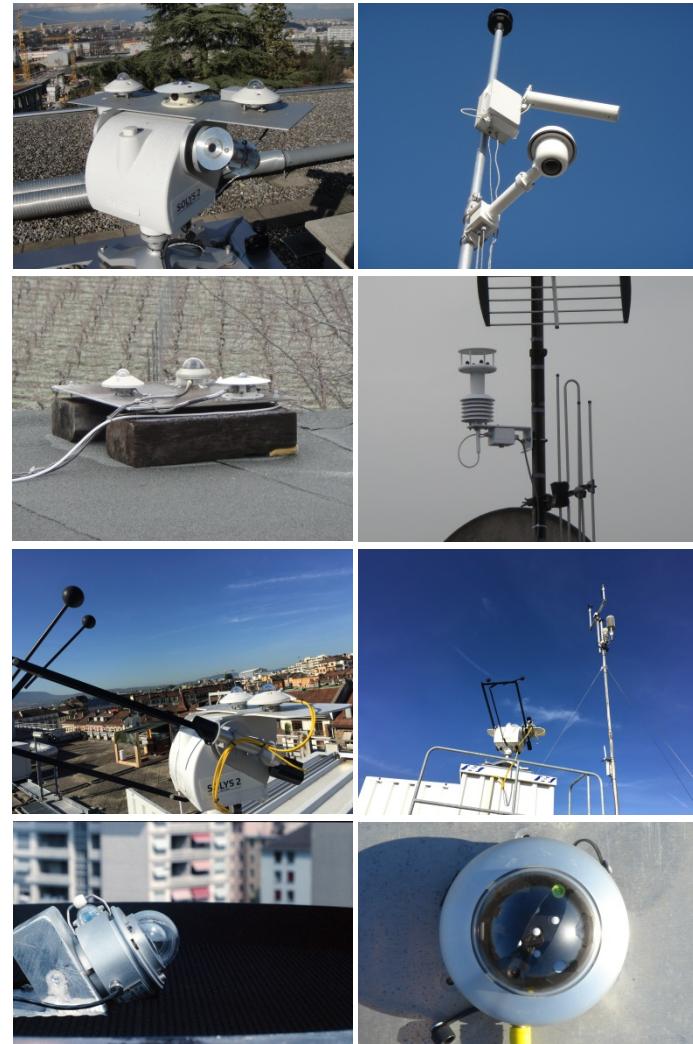


Historique des mesures banquables à Genève

| | ScII | | | | Sny | Jct | Bat | Ber | Pra | Pra |
|-----------------------------------------------|---------------|-----------------|---------------------------|---------------|------|-------|------|-------------|------|------|
| | 1978 | 1979 | 1980 | 1986 | 1980 | 1991 | 2010 | 2010 | 2010 | 2016 |
| | 1979 | 1980 | 1982 | 1987 | 1981 | 2010 | | | | CM10 |
| Horizontal global irradiance | CM5 | CM5 | CM5 | CM10 | CM6 | 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 | Graphique 15' | Télétype 15 min | HP bandes magnétiques, 5' | Disquettes 5' | | | | Internet 1' | | |
| Résolution temporelle | | | | | | | | | | |

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

ScII University building
Sny Sauverny
Jct Jonction
Bat Battelle
Ber Berne
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

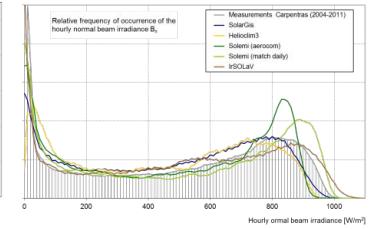
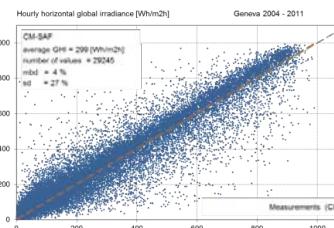
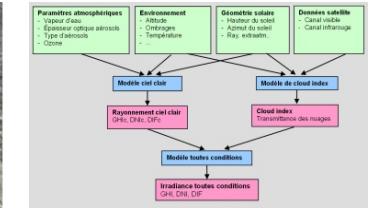
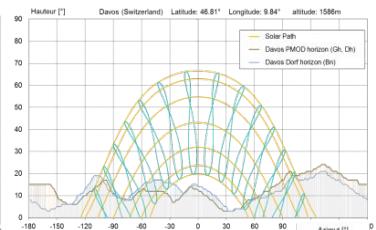
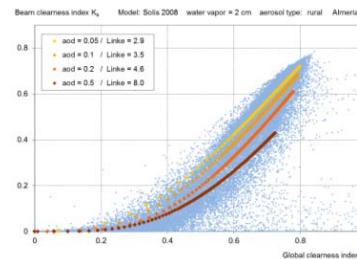
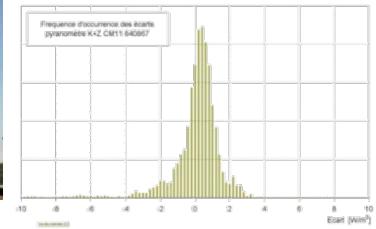
- ✿ Continuité des mesures, remplacement des valeurs manquantes
- ✿ Contrôle de qualité (en ligne et à long terme)
- ✿ format, Meta data, dissémination

Modélisation

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

Validation

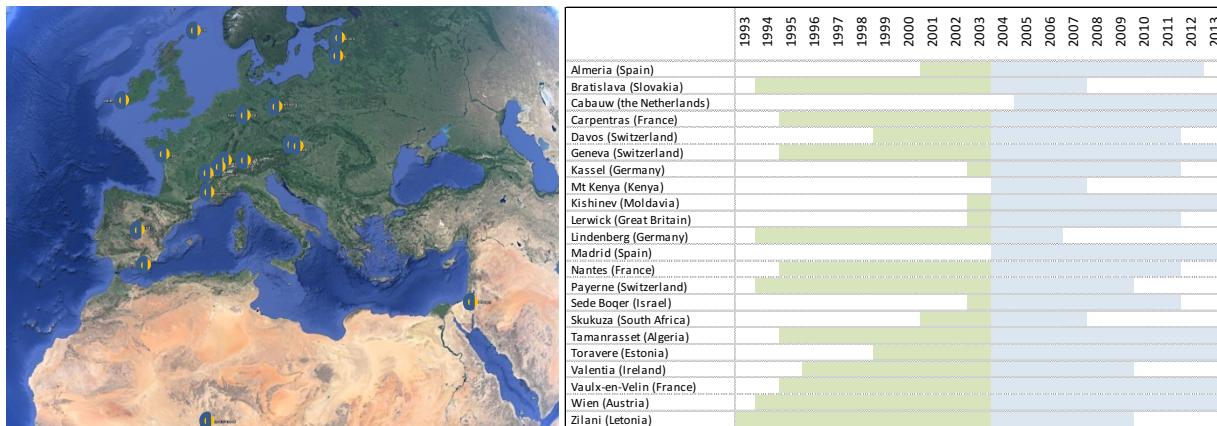
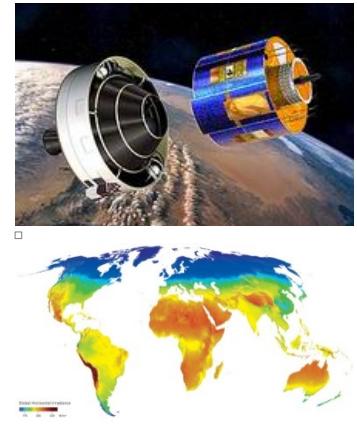
- ✿ Données au sol (climat, latitude, altitude, etc.)
- ✿ Contrôle de qualité des données modélisées
- ✿ Statistiques de comparaison (1^{er} et 2^{ème} ordre)
- ✿ Résultats: précision, présentation, etc.



La ressource solaire par un exemple

Données satellitaires

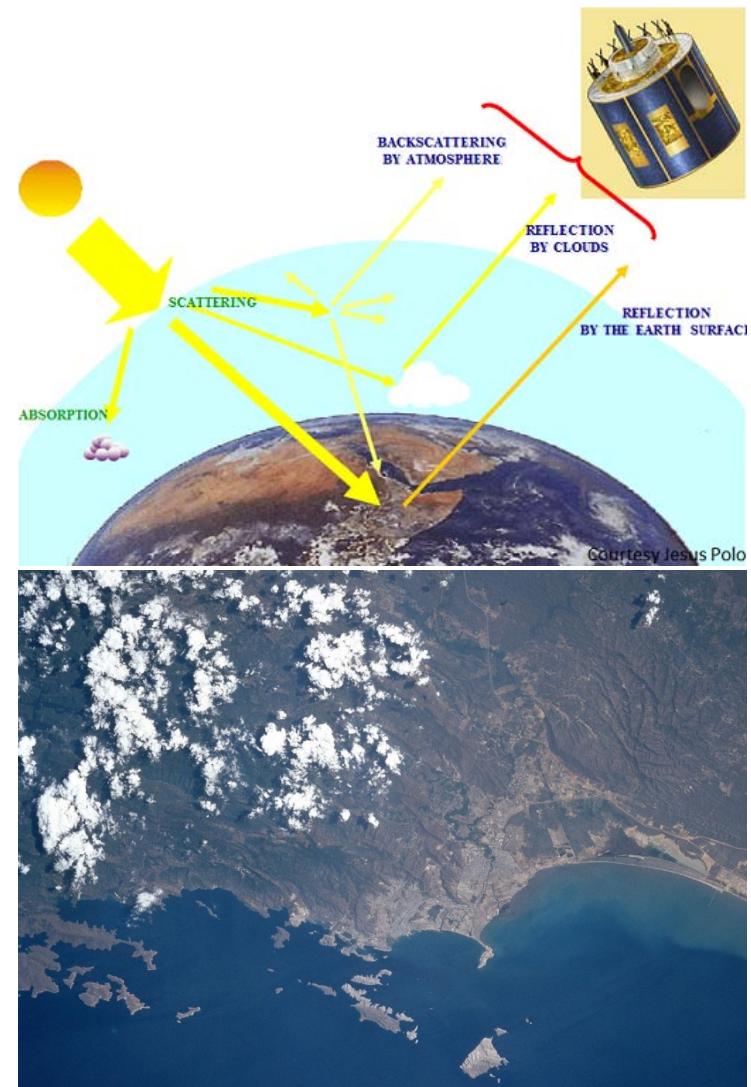
- ✳ images satellite (MeteoSat, Goes, GSM, etc.)
- ✳ bonnes mesures au sol: variété en lat/long/alt, climat, etc.
- ✳ durée d'acquisition: plusieurs années
- ✳ composantes: au minimum les composantes à valider
- ✳ granularité comparable entre les mesures et les modèles
- ✳ disponibilité et précision 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

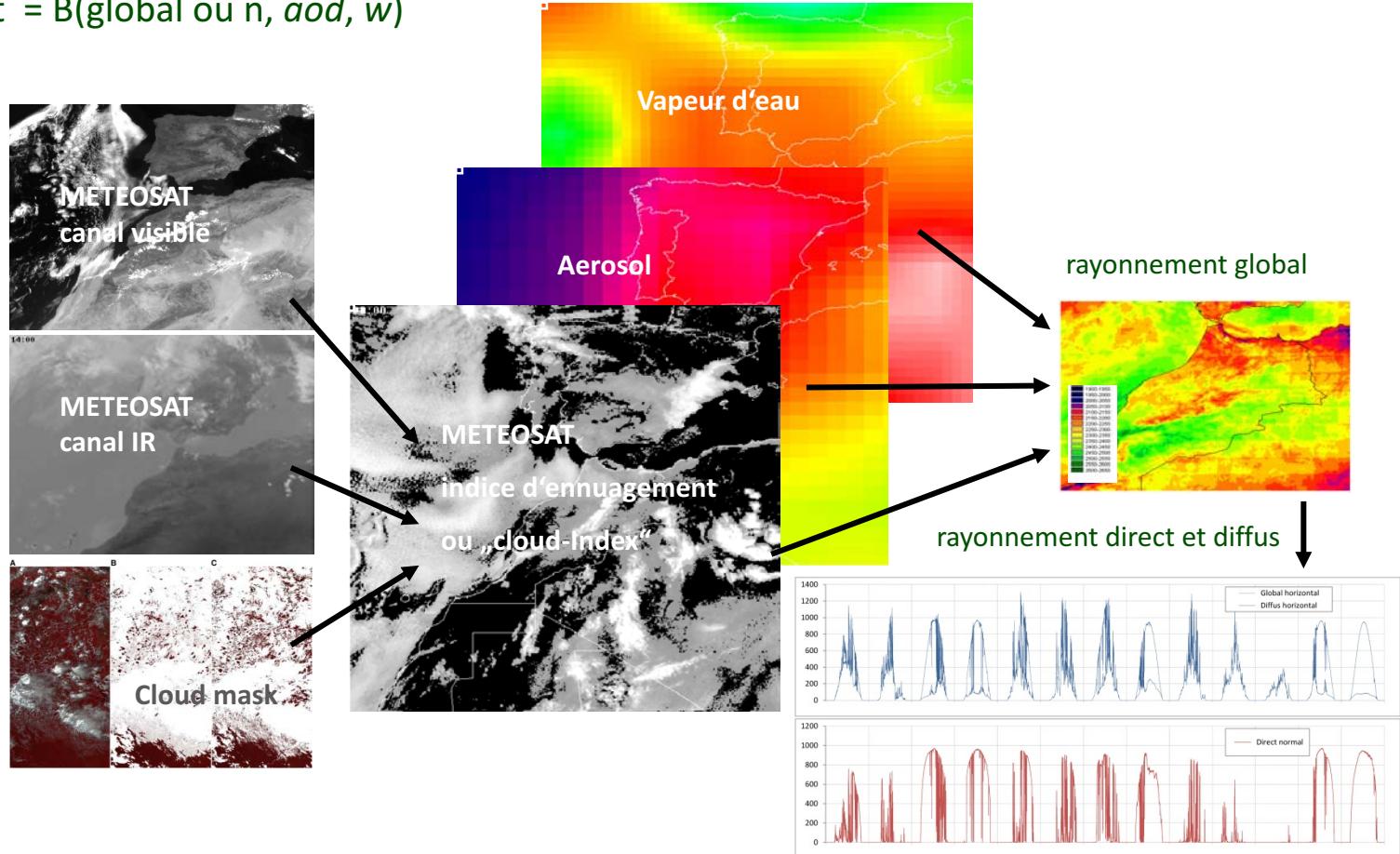
- ✳ résolution spatiale: 2.5×2.5 km
- ✳ résolution temporelle: 15 min
- ✳ réflexion -> transmission
 - ✳ top atmosphère
 - ✳ Atmosphère
 - ✳ sol
- ✳ géométrie: angle satellite/soleil
- ✳ état atmosphérique
 - ✳ ciel clair
 - ✳ toutes conditions (nuages)
- ✳ paramètres d'entrée «fixes»
 - ✳ Rayleigh, ozone, gaz (NO_x , CO_2 , etc.)
- ✳ paramètres variables
 - ✳ turbidité (type et quantité)
 - ✳ vapeur d'eau
 - ✳ nuages (type et quantité)



Principe de base des modèles satellitaires

Données satellitaires

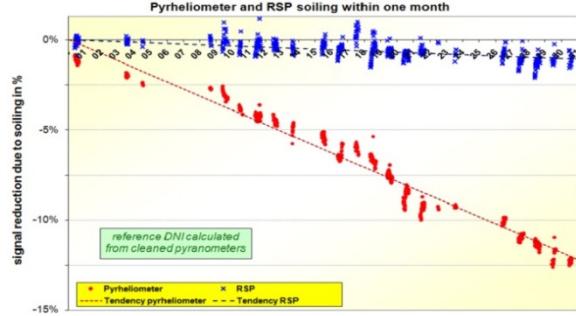
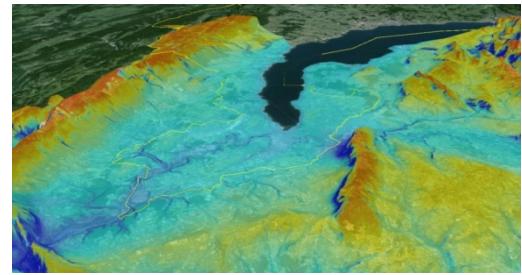
- * images visibles et IR -> masque de nuages et indice d'ennuagement n (*compris entre 0 et 1*)
- * global = $G(n, \text{aérosol } aod, \text{ vapeur d'eau } w)$
- * direct = $B(\text{global ou } n, aod, w)$



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

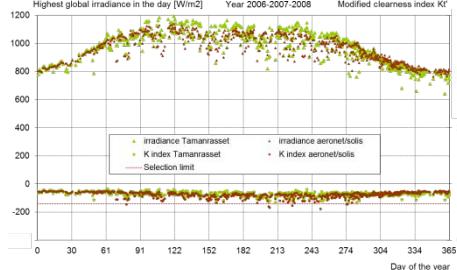
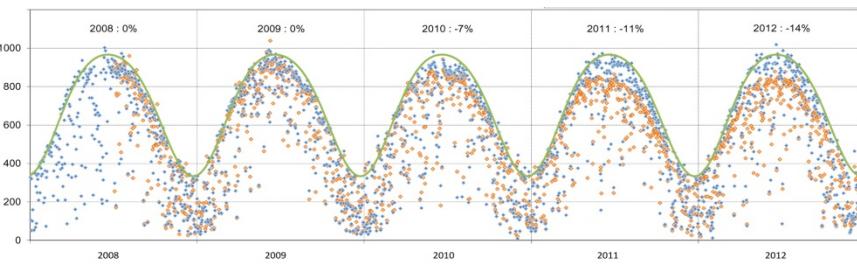
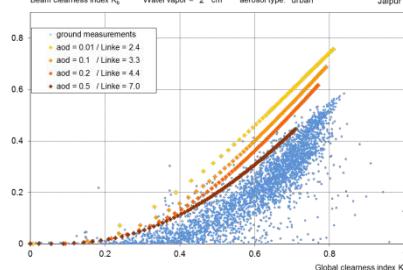
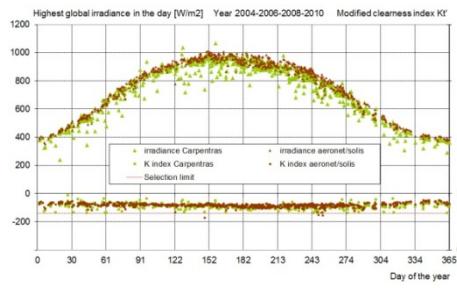
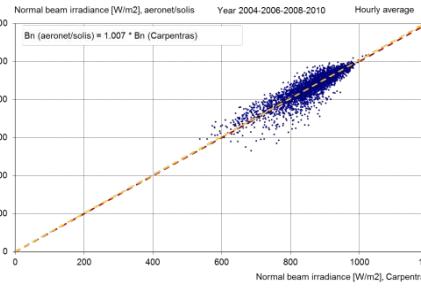
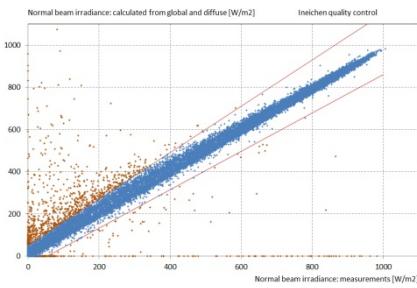
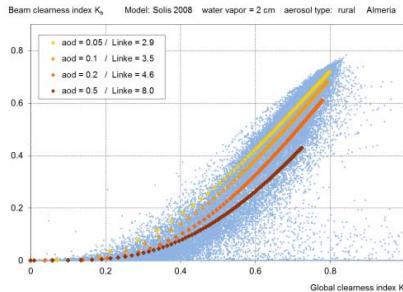
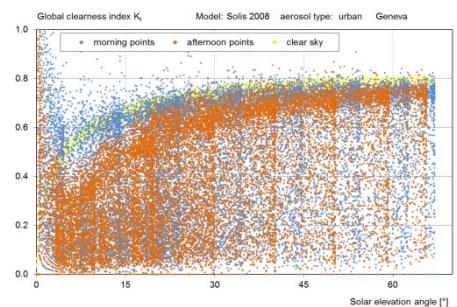
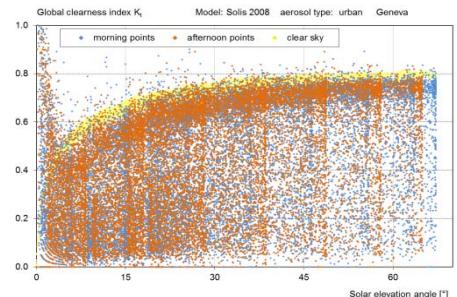
- ★ Symétrie/temps solaire (irradiance ou indice de clarté K_t)

Calibration absolue des senseurs

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

Cohérence des composantes

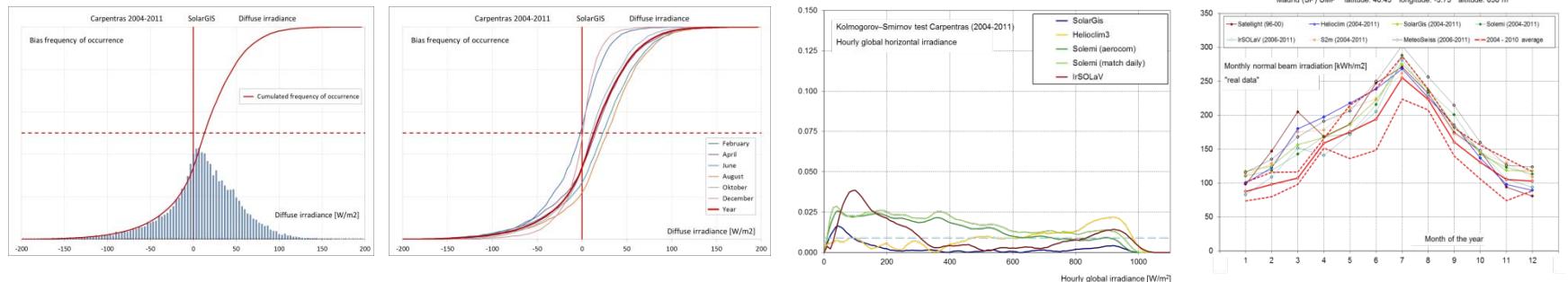
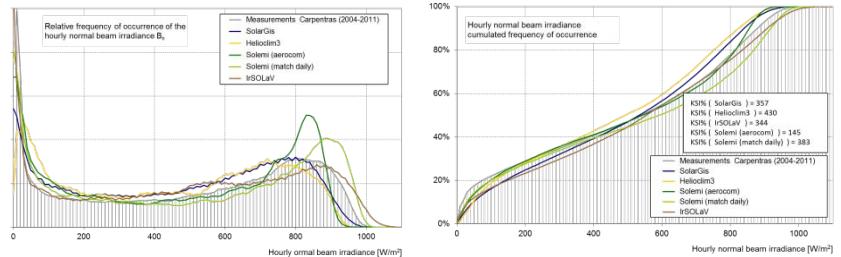
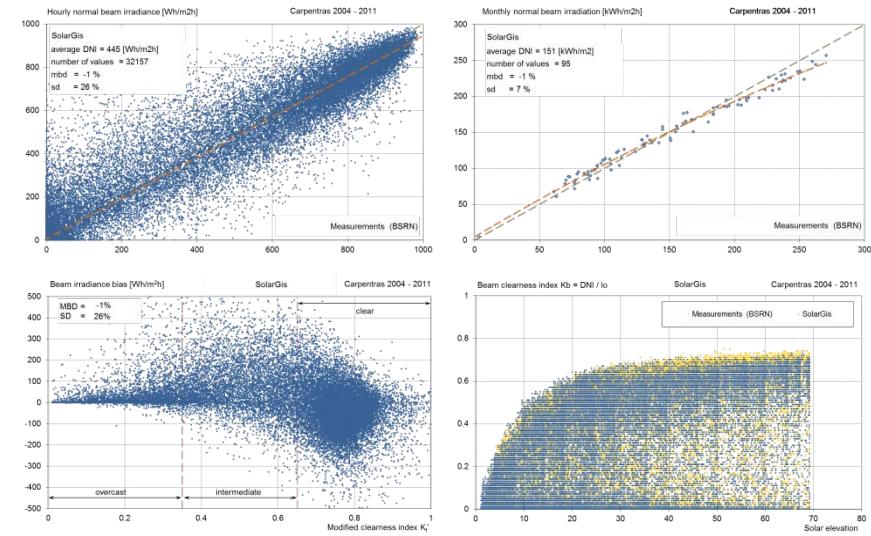
- ★ 3 composantes: *closure equation*: global = direct + diffuse
- ★ 2 composantes: cohérence avec le modèle ciel clair Solis



Présentation et interprétation des résultats

Présentation des résultats de validation

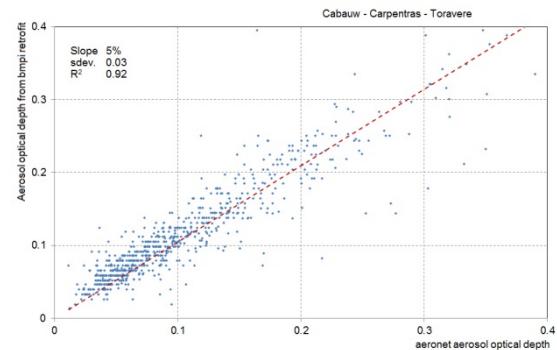
- ✿ scatter plots (G_h , D_h , B_n)
- ✿ dépendance du biais (type de ciel, *aod*)
- ✿ indice de clarté / hauteur du soleil
- ✿ distribution de fréquence
 - ✿ irradiance, K_t , cumulée
 - ✿ biais autour de l'axe 1:1
- ✿ comparaison des valeurs mensuelles: dépendance saisonnière
- ✿ tables, histogrammes,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



Données d'entrée

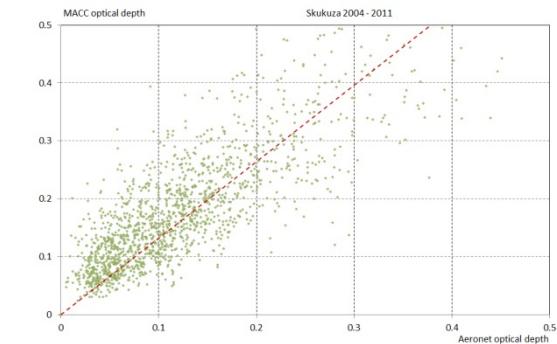
Aérosols

- 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)



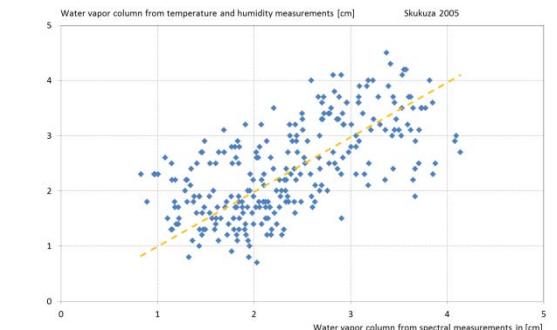
Valeur d'eau

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



Comparaison

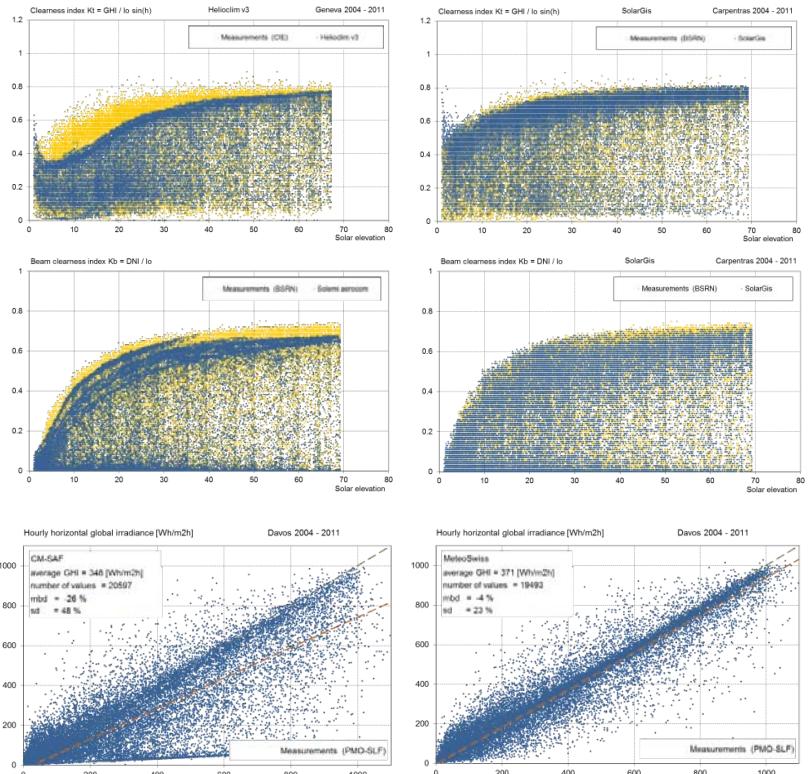
- Solis retrofit/aeronet *aod* : 5% biais, bonne corrélation (les deux sont issues de mesures au sol)
- MACC-II/aeronet: biais et dispersion
- $w(T_a, HR)$ /aeronet: biais négligeable, dispersion importante, peu d'impact sur les résultats des modèles



Résultats de la validation

Comportement général du modèle

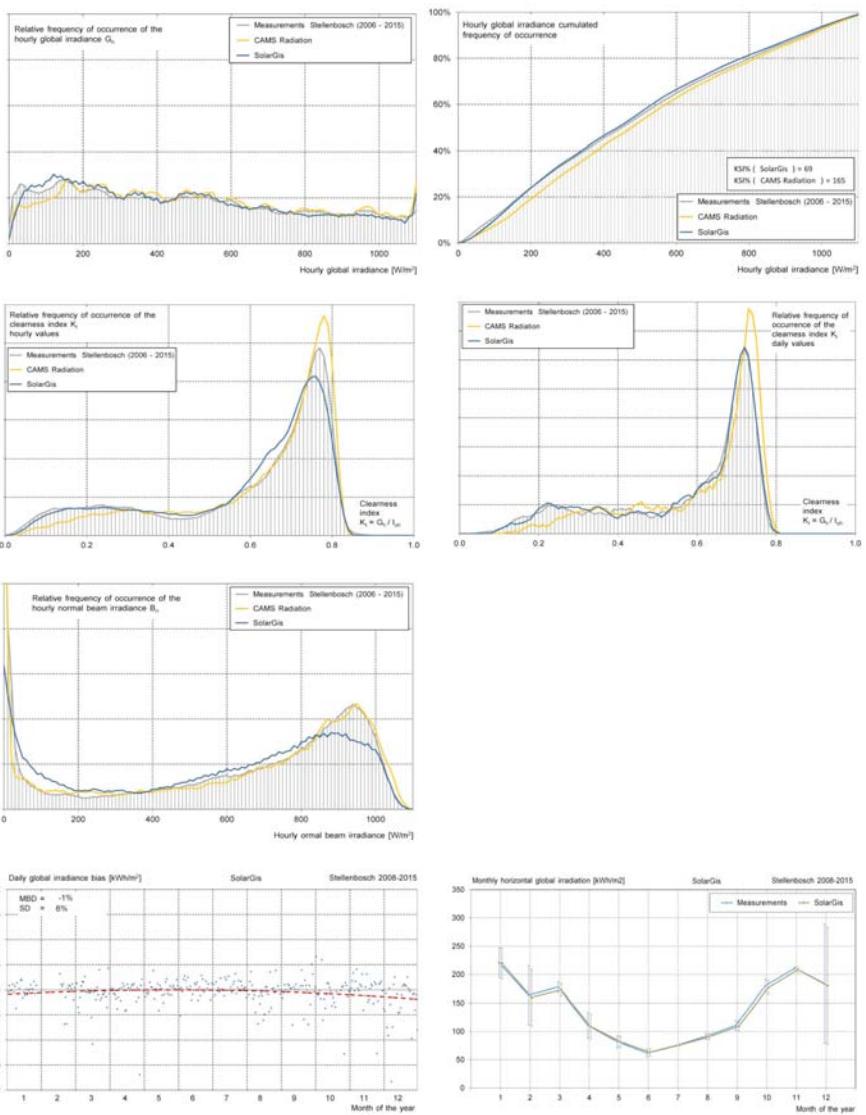
- mauvaise prise en compte du ciel clair, valeurs maximales non atteinte par le modèle
- meilleurs résultats obtenus avec des données d'entrée journalières plutôt que mensuelles
- meilleure prise en compte de la neige par des modèles *alpins*



Résultats de la validation

Résultats de la validation

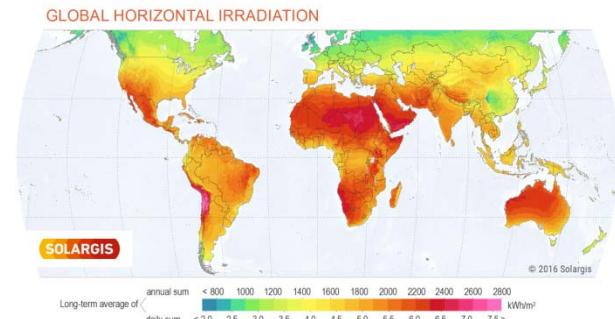
- ★ cohérence des fréquences de distribution du rayonnement global
- ★ différence de comportement suivant la granularité temporelle (G_h)
- ★ différence de comportement suivant la composante/modèle (B_n)
- ★ pas de sensibilité particulière à la saison



Construction d'une base de données banquable

Données satellitaires: rayonnement global

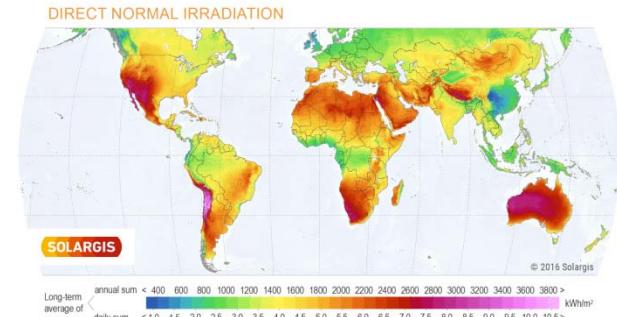
- ✿ Ciel clair, données d'entrée
 - ✿ Aérosols (MACC-II), résolution 75km x 125km, 4x / jour
 - ✿ Vapeur d'eau (@NOAA), résolution 18-27km, 3-4x / jour
 - ✿ Ozone, fixé à 340 Dobson
- ✿ Nuages
 - ✿ Indice d'ennuagement dérivé de la radiance réfléchie mesurée par le satellite (plusieurs zones spectrales, 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

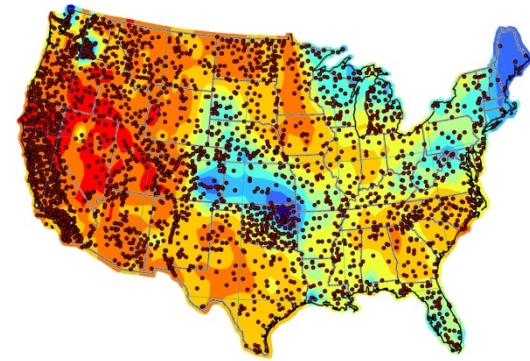
Données satellitaires: rayonnement direct

- ✿ 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
 - ✿ *Déviation 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)
 - * Représenteative 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

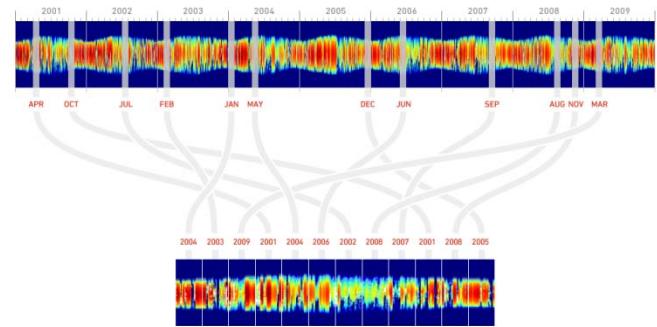
Année météorologique typique (*Typical Meteorological Year*)

✳ 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

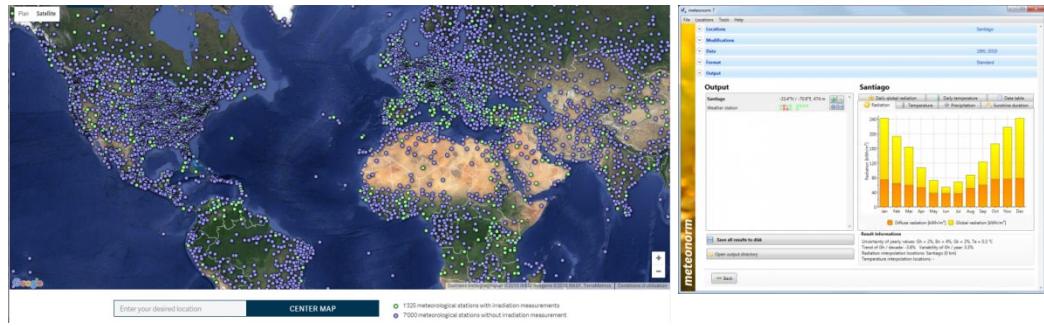
✳ Particularités

- ✳ 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.

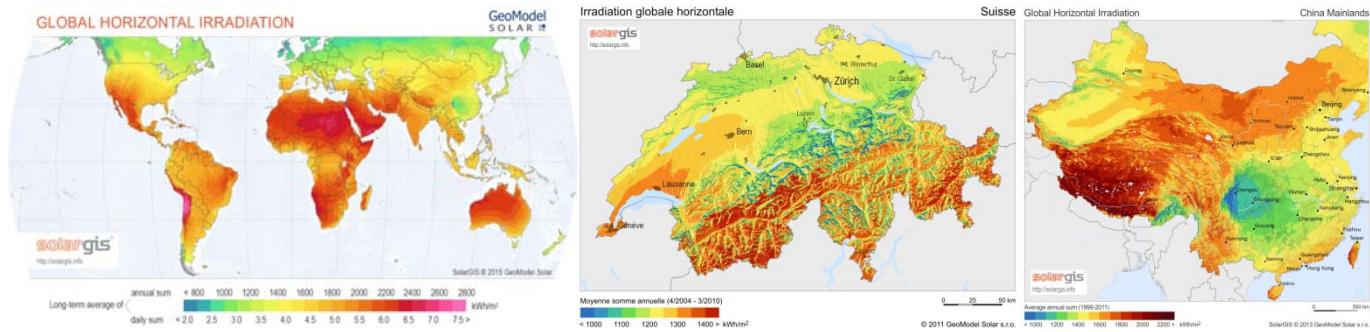


Accès à la ressource

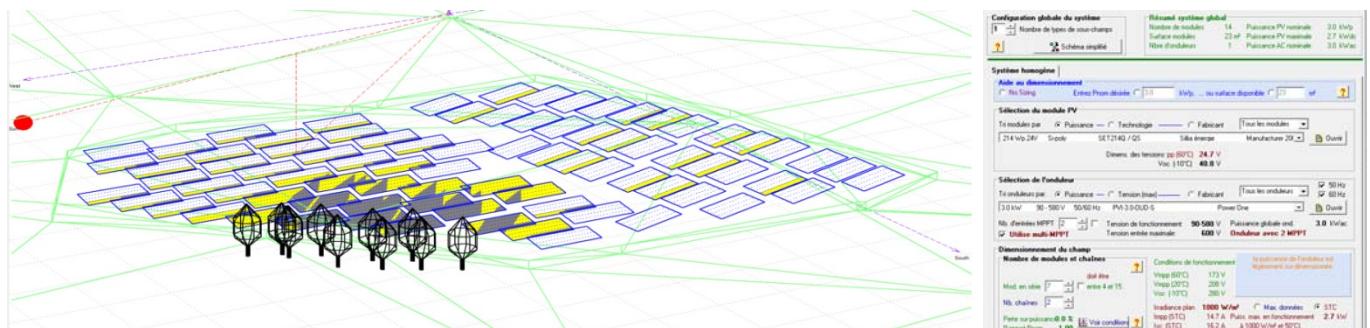
- * Meteonorm:
bases de données
MN1: 1985



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



- * TMY:
données typiques
représentatives



Accès aux données UniGe

Sites UniGe (en ligne et archives)

- ✳ De jour, incomplètes de 1993 à 2000
- ✳ Complètes (*gap-filling*) sur 24h dès 2002
- ✳ Sur 3 sites dès mi-2010
- ✳ Données horaires, journalières et mensuelles
- ✳ Fichiers .csv, métadonnées complètes
- ✳ www.unige.ch/energie/fr/activites/meteo/data-num

The screenshot shows a grid-based interface for solar radiation data. The top row has two sections: 'incomplètes' (incomplete) and 'mesures sur 24 heures, complètes' (complete 24-hour measurements). Below this are five rows for each site, with columns for year, day, and hour. The data spans from 1993 to 2016. The bottom section shows a vertical list of years from 2000 down to 1993.

Sites AgroMétéo (archives)

- ✳ Une dizaine de sites dans la région genevoise
- ✳ Dès 2006 selon les sites
- ✳ Données originales sur agrometeo.ch
- ✳ Données secondaires (direct modélisé, global sur plans inclinés) en horaires, journalières et mensuelles
- ✳ www.unige.ch/energie/fr/activites/meteo/agrometeo

The screenshot displays a grid of small images representing different weather stations. Below this is a detailed table for ten specific sites: Anières, Bernex, Commugny, Dardagny, La Plaine, Lullier, Lully, Peissay, Satigny, and Soral. The table shows data for each year from 2006 to 2016, with columns for day and hour.

Accès aux données

Méta-données

★ Paramètres en accès (mesures et modèles)

```
# Station      : Geneve (Battelle)    annee     : 2016
# Latitude    : 46.176ø N    Longitude: 6.139øE    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 [øC] et humidite relative [%]
# w           : colonne d'eau atmospherique precipitable en [cm]
# vv          : vitesse du vent [m/s]
# dv          : direction du vent - provenance N=0ø W=90ø S=180ø E=270ø
# 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 35ø et oriente - est - sud et ouest [Wh/m2h]
# G45s         : rayonnement global sur un plan incline a 45ø et oriente - est - sud et ouest [Wh/m2h]
# G35_45       : rayonnement global sur un plan incline a 35ø et oriente a 45ø (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
```

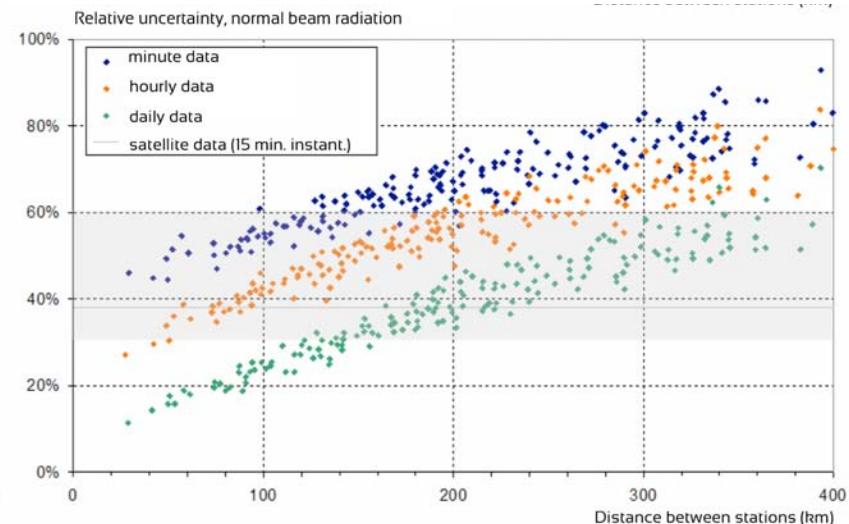
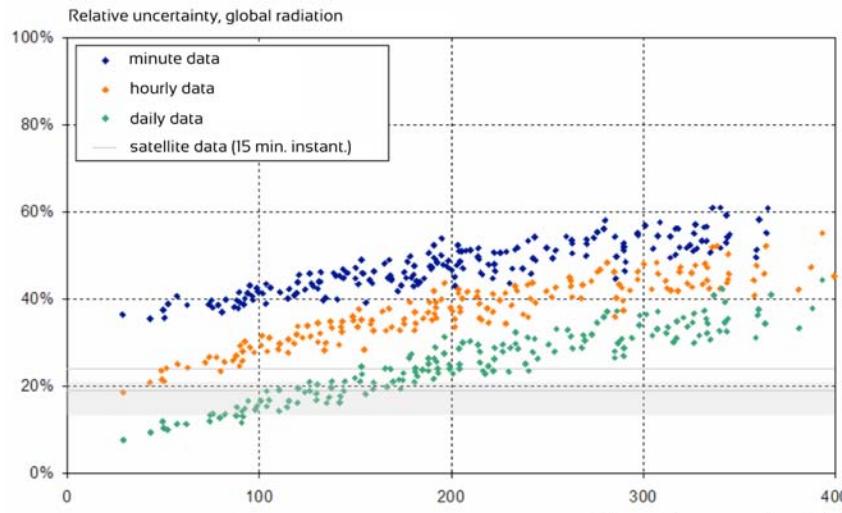
Conclusions

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

