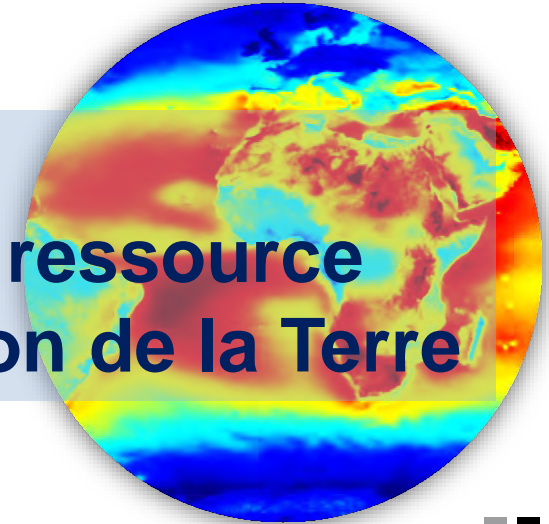


Chaire annuelle Innovation technologique Liliane Bettencourt
2021-2022 : *Énergie solaire photovoltaïque
et transition énergétique*

**Importance, variabilités, moyens de
caractérisation et de prévision de la ressource
solaire par des moyens d'Observation de la Terre**



■ Prof. Philippe BLANC
*Responsable du Département Energie et Procédés (DEP)
Centre Observation, Impacts, Energie (OIE)*

philippe.blanc@minesparis.psl.eu

MINES Paris – PSL en quelques chiffres

1783



1^{re} ECOLE FRANÇAISE POUR LE VOLUME DE RECHERCHE CONTRACTUELLE



1500 ÉTUDIANTS INSCRITS



190 INGENIEURS CIVILS DIPLÔMÉS PAR AN



90 NOUVEAUX DOCTEURS DIPLÔMÉS PAR AN

225 ENSEIGNANTS CHERCHEURS



5 GRANDS DOMAINES DE RECHERCHE

SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'ENVIRONNEMENT
ÉCONOMIE, MANAGEMENT ET SOCIÉTÉ
MATHÉMATIQUES ET SYSTÈMES
ÉNERGÉTIQUE ET PROCÉDÉS
MÉCANIQUE ET MATÉRIAUX



5 IMPLANTATIONS

PARIS
PALAISEAU
EVRY
FONTAINEBLEAU
SOPHIA ANTIPOLIS



200 PARTENAIRES INDUSTRIELS



PSL 

CONSERVATOIRE NATIONAL SUPÉRIEUR D'ART ET D'ARCHITECTURE

PSL 

Dauphine UNIVERSITÉ PARIS

PSL 

ESPCI  PARIS | PSL 



PSL 

Observatoire de Paris | PSL 



PSL 



PSL 



École Pratique des Hautes Études

PSL 



COLLÈGE DE FRANCE 1530

institut Curie



Inserm

Inria

○ Les quatre centres



- CES : Centre Efficacité Énergétique des Systèmes**
 63, Palaiseau (future projet CES-Satory), www.ces.minesparis.psl.eu
 Moyens de transports à faible émission, industrie efficace et décarbonée, bâtiments et villes durables
- CTP : Centre Thermodynamique des Procédés**
 22, Fontainebleau, www.ctp.minesparis.psl.eu
 Diagrammes de phases de mélanges moléculaires complexes (métrologie et modélisation), conception de moyens de mesures, dimensionnement et optimisation énergétique et de consommation de matières premières de nouveaux procédés thermodynamiques
- PERSEE : Procédés, Énergies Renouvelables et Systèmes Énergétiques**
 44, Sophia Antipolis, www.persee.minesparis.psl.eu
 Matériaux pour l'énergie, procédés de stockage et de conversion d'énergie (thermochimie et plasmas, filière hydrogène), intégration des renouvelables et *smart grids*
- OIE : Observation, Impacts, Énergie**
 19, Sophia Antipolis, www.oie.minesparis.psl.eu
 Estimation des ressources énergétiques renouvelables par observation de la Terre, analyse des impacts environnementaux et de la durabilité des systèmes énergétiques renouvelables, dissémination des données scientifiques au travers de services web interopérables et standards,

Quelques chiffres clés sur le potentiel solaire

- **175x10⁶ GW** : puissance du rayonnement solaire interceptée par la Terre (constante solaire : 1362 W m⁻²)
- En moins de **60 min**, la Terre reçoit du soleil une quantité d'énergie correspondant à la consommation annuelle mondiale d'énergie finale 2020 (170 PWh)
- ... pour encore **4 à 5 milliards d'années**

<http://www.ddmagazine.com/314-combien-panneaux-solaires-energie-monde.html>

Surface photovoltaïque nécessaire aux besoins énergétiques du monde et de la France (ordre de grandeur)

107 TWp @ Capacity factor of 18 %
800 km x 800 km = 640,000 km²

< 1.25 % des surfaces agricoles
~ surface urbaine en 2015

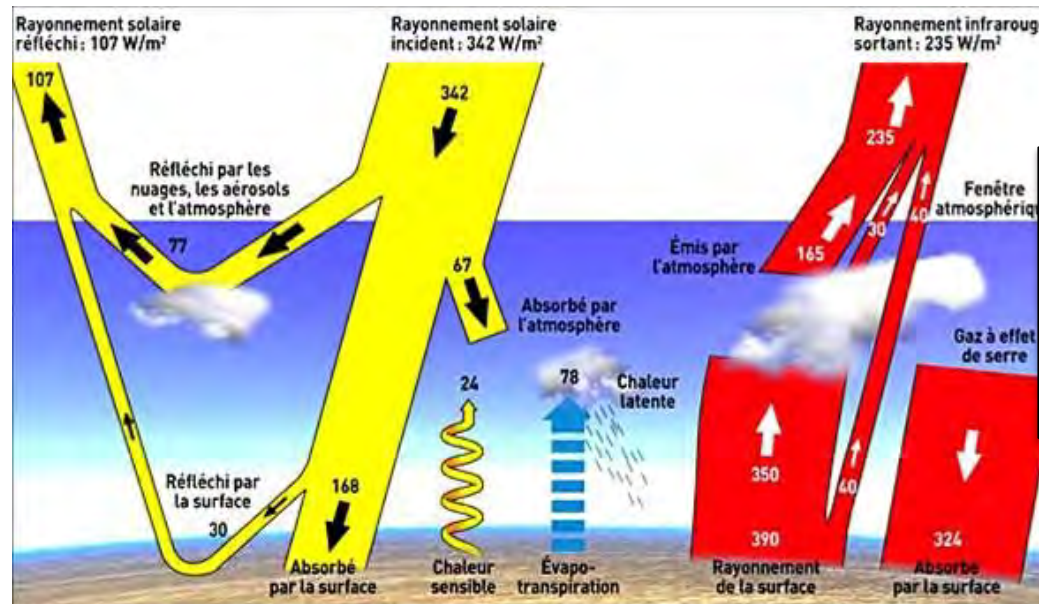


Schéma : Le rayonnement solaire atteignant la Terre (© Yuvanoë/ CEA)

Les voies principales de conversion

Conversion directe en énergie thermique

- Capteur thermique (par ex. pour la production d'eau chaude sanitaire, cuisine solaire)



Crédits : madeinmarseille.net



Crédits :
DOE/NREL

Conversion directe en énergie électrique

- Capteur photovoltaïque



Crédits : OhWeh,
Wikimedia



Crédits :
DOE/NREL

Les voies principales de conversion

Conversion thermodynamique en énergie électrique

- Capteur solaire thermique (généralement à concentration)
- Turbine ou moteur thermique et générateur électrique

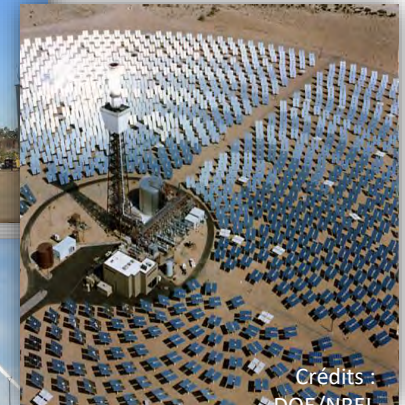
Conversion en énergie chimique par voie photochimique comme la photolyse de l'eau pour la production d'hydrogène.



Crédits :
DOE/NREL



Crédits : Swsolartech,
Wikimedia



Crédits :
DOE/NREL



Éclairement solaire

Flux énergétique par unité de surface issu du rayonnement solaire incident, exprimé en W m^{-2}

Irradiation solaire

Intégration sur une période de temps de l'éclairement solaire, exprimée en J m^{-2} (ou en $\text{Wh m}^{-2} = 3600 \text{ J m}^{-2}$)

Luminance solaire

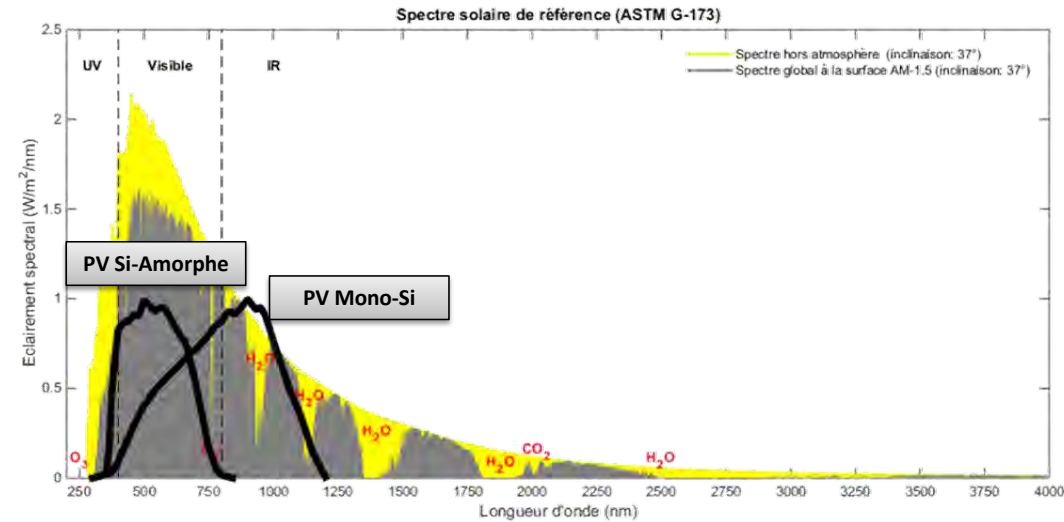
Flux énergétique par *unité d'angle solide* (sr) et par unité de surface issu du rayonnement solaire incident, exprimé en $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

Pour une adéquation avec les moyens de conversion

Une caractérisation spectrale

Une caractérisation angulaire

- Éclairement **global** : intégration hémisphérique de la luminance solaire par rapport à un plan incliné
- Éclairement **direct** : intégration de la luminance solaire limitée à une zone angulaire restreinte autour de la direction d'éclairement solaire (région *circumsolaire*) par rapport à un plan incliné

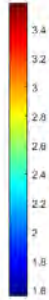
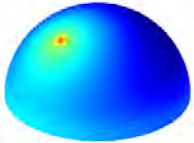


Capteur photovoltaïque classique

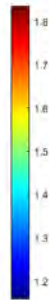
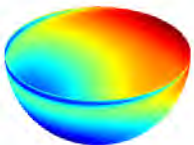
Système de conversion solaire à concentration

- photovoltaïque concentré (CPV)
- système thermodynamique à concentration (CSP)

Sky - Downwelling radiance (log-scale)

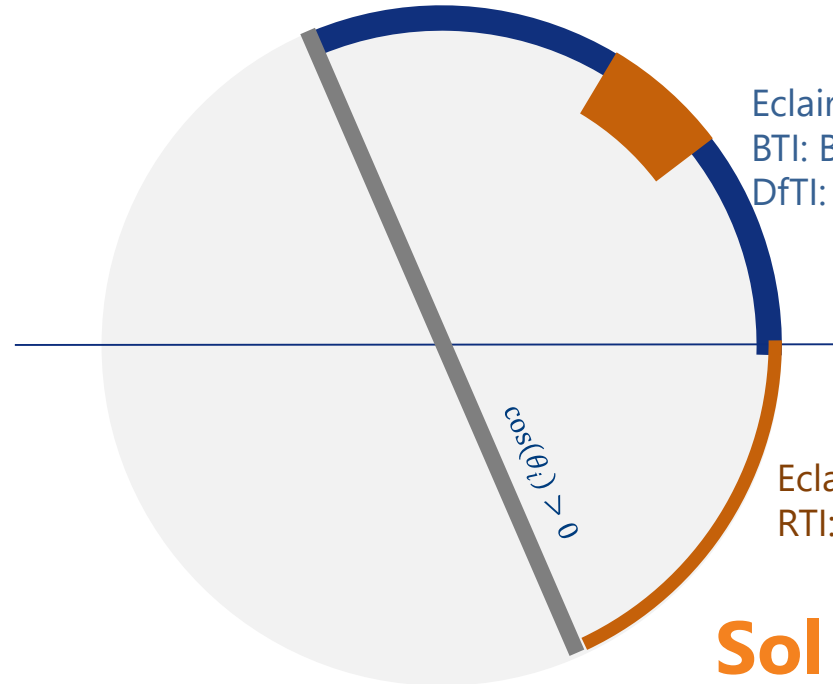


Ground - Upwelling radiance (log-scale)



Ciel

Eclairement descendant sur plan incliné
 BTI: Beam Tilted Irradiance
 DfTI: Diffuse Tilted Irradiance



Eclairement montant sur plan incliné
 RTI: Reflected Tilted Irradiance

Sol

Eclairement global sur plan incliné
 Global irradiance on tilted plan
 GTI : BTI + DfTI + RTI

- Module photovoltaïque bifaciaux : complément de caractérisation et émergence de termes nouveaux à définir



Eclairement descendant sur plan incliné en face arrière

BTI_{rear} : Beam Rear Tilted Irradiance

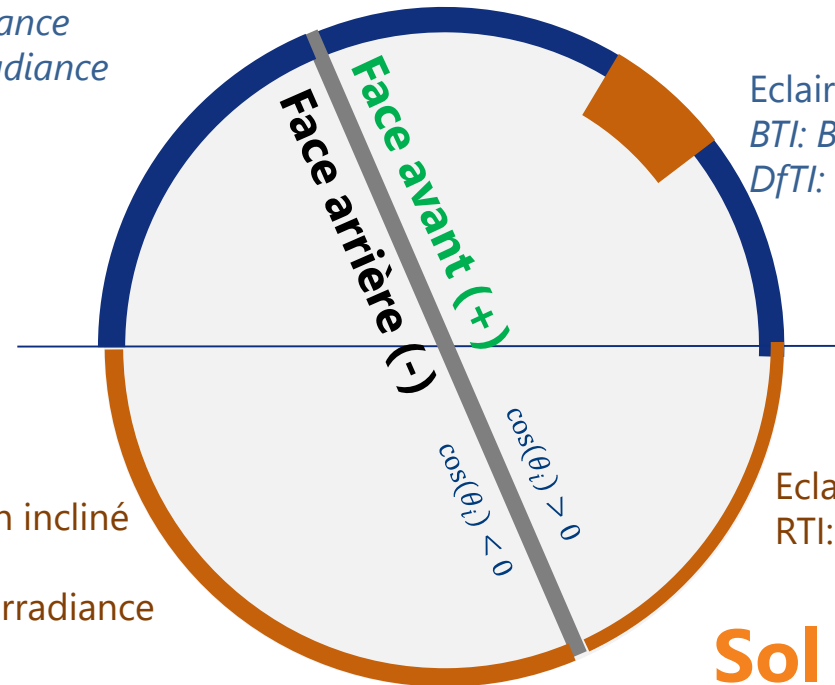
$DfTI_{rear}$: Diffuse Rear Tilted Irradiance

Ciel

Eclairement descendant sur plan incliné

BTI : Beam Tilted Irradiance

$DfTI$: Diffuse Tilted Irradiance



Eclairement montant sur plan incliné en face arrière

RTI_{rear} : Reflected Rear Tilted Irradiance

Eclairement montant sur plan incliné

RTI : Reflected Tilted Irradiance

Sol

Eclairement global sur plan incliné en face arrière

Global irradiance on rear tilted plan

$$GTI_{rear} = BTI_{rear} + DfTI_{rear} + RTI_{rear}$$

Eclairement global sur plan incliné

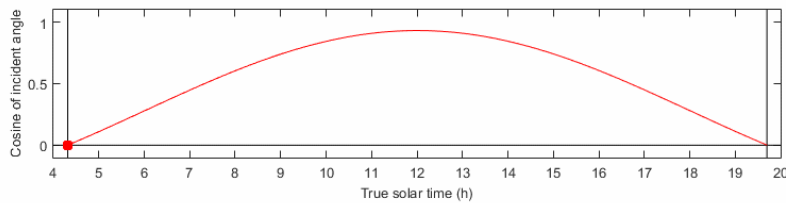
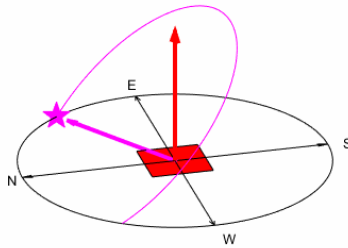
Global irradiance on tilted plan

$$GTI = BTI + DfTI + RTI$$

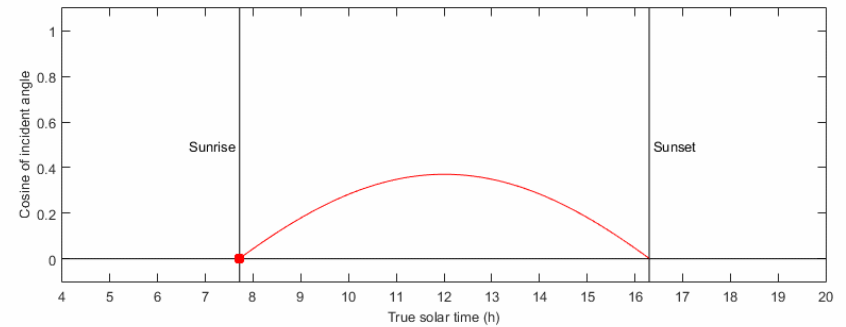
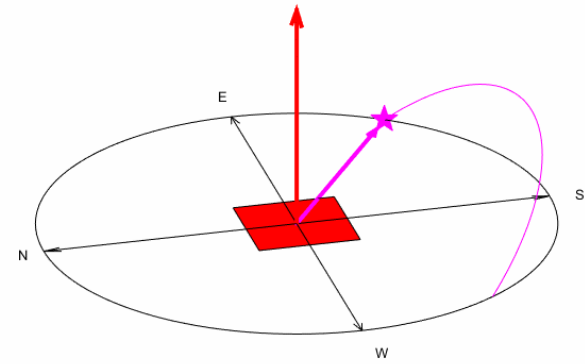
○ Plan horizontal fixe : exemple pour la latitude 45°

21 juin – Pente 0°

Latitude: 45°, month: 06, type tracking: notrck_az0_slope0



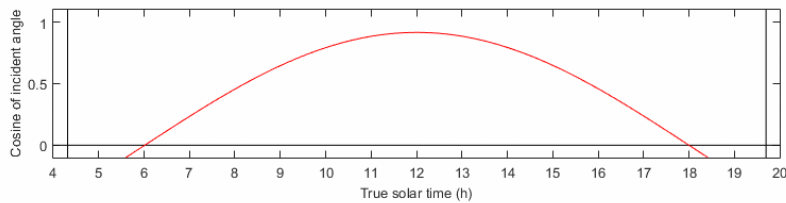
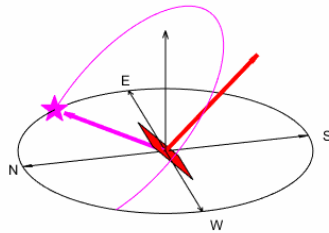
21 décembre – Pente 0°



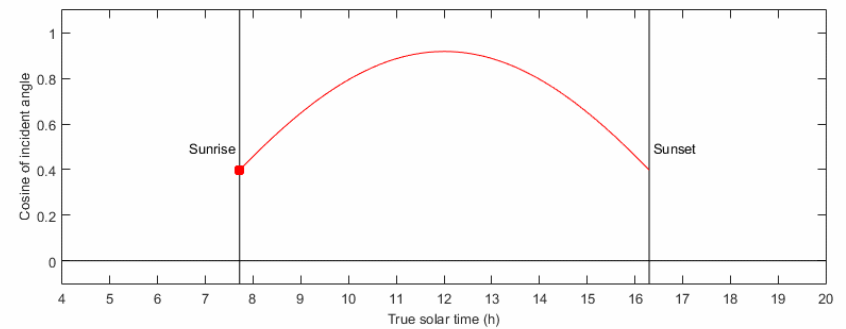
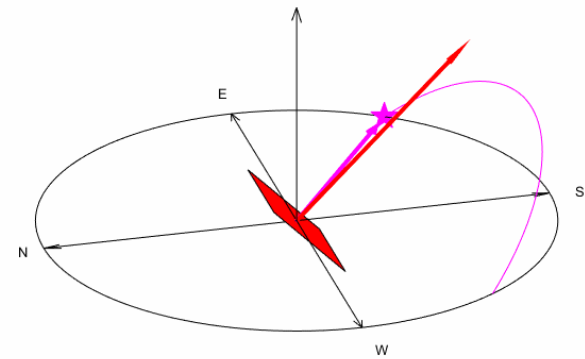
○ Plan incliné fixe : exemple pour la latitude 45°

21 juin – Pente 45°

Latitude: 45°, month: 06, type tracking: notrck_az0_slope_lat



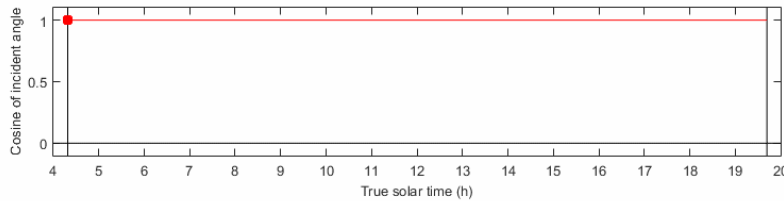
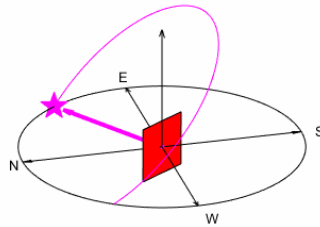
21 décembre – Pente 45°



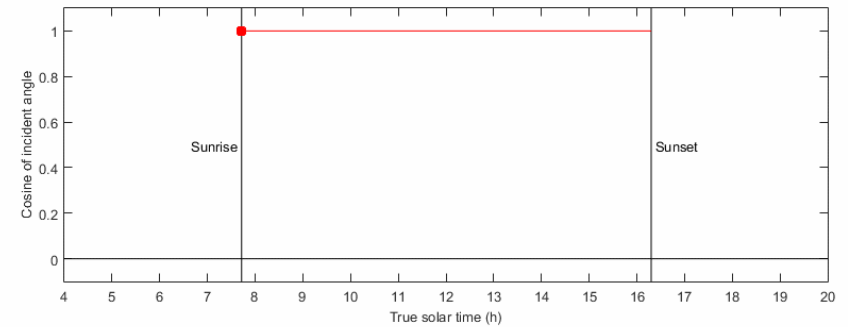
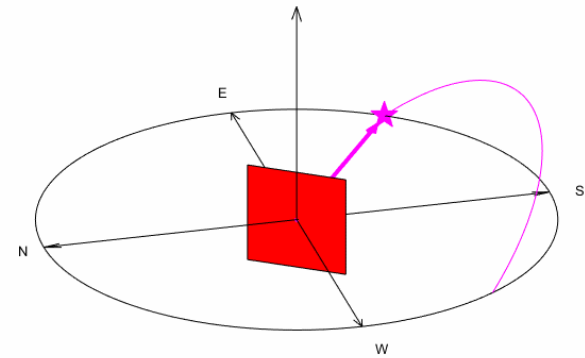
○ Suivi du Soleil sur 2 axes : exemple pour la latitude 45°

21 juin – NI

Latitude: 45°, month: 06, type tracking: trck_2d



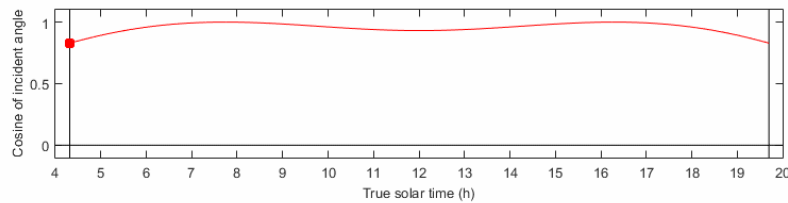
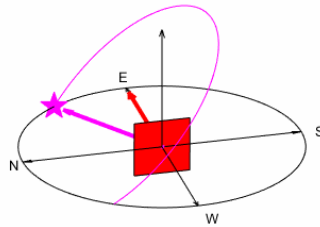
21 décembre – NI



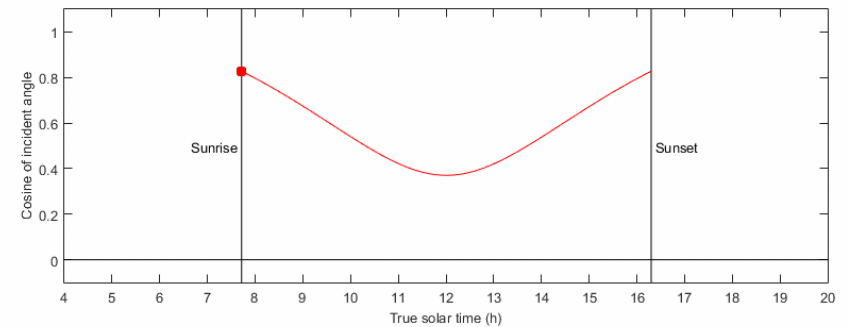
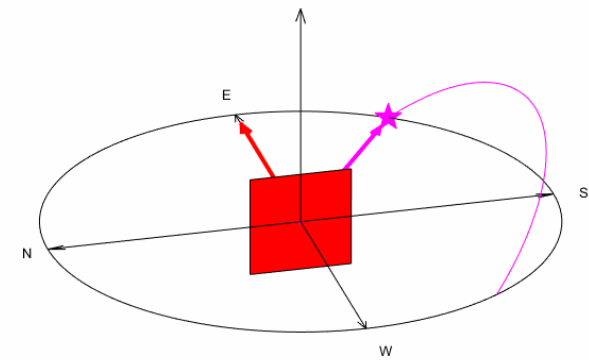
○ Suivi du Soleil sur 1 axe : exemple pour la latitude 45°

21 juin – Suivi-pente N-S

Latitude: 45°, month: 06, type tracking: trck_1d_az90

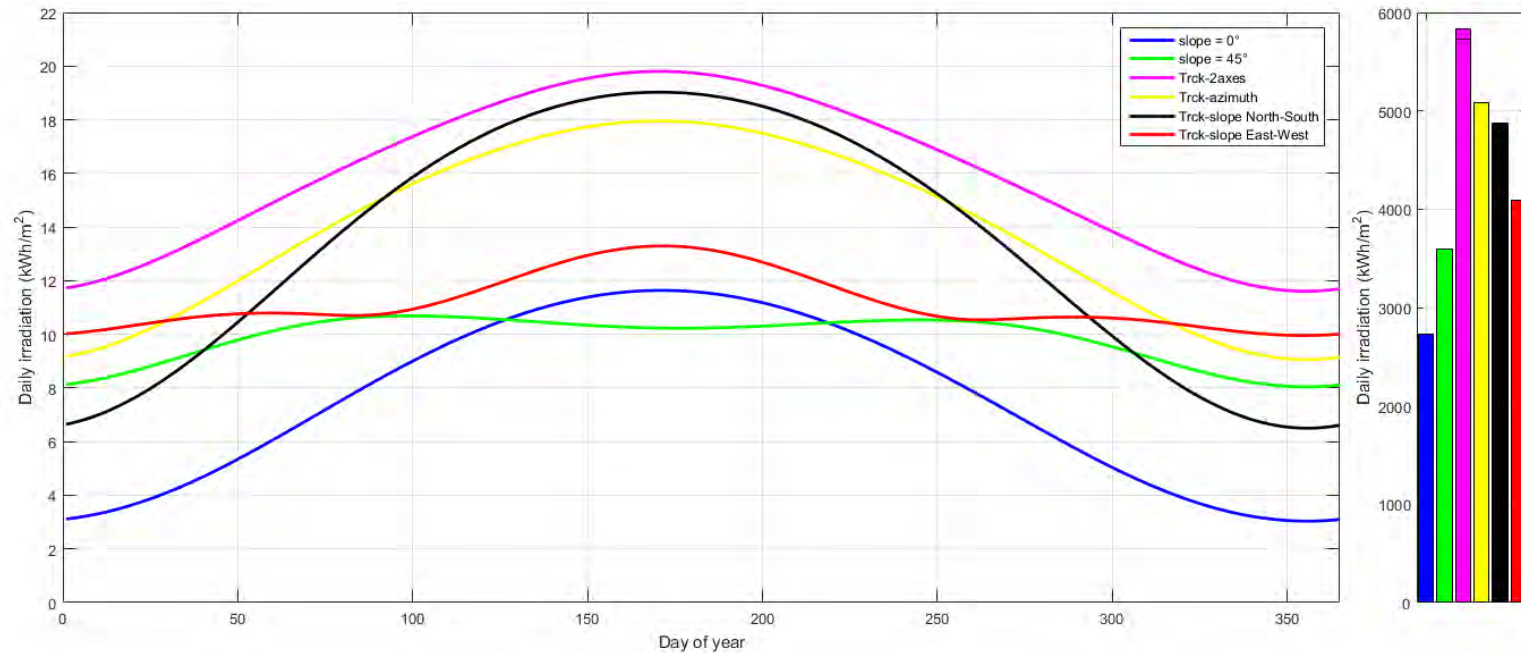


21 décembre – Suivi-pente N-S



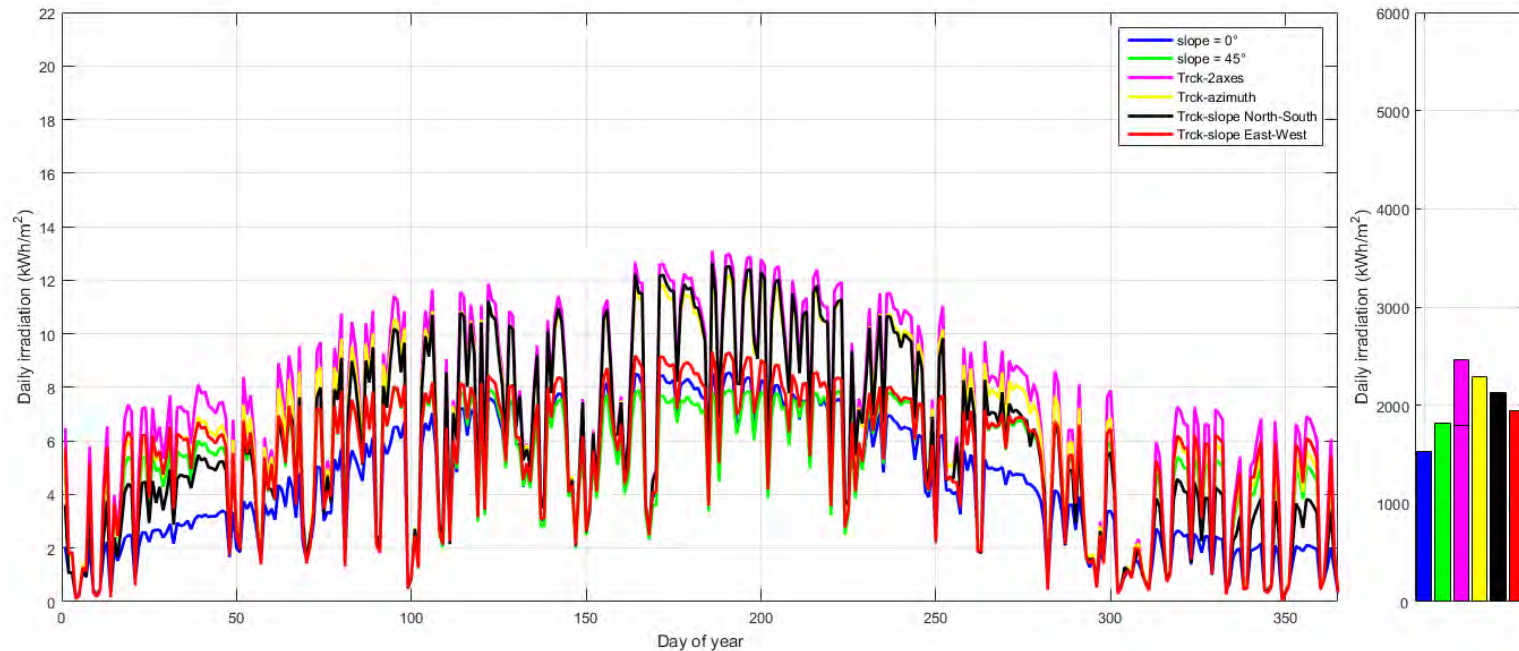
○ Exemple à latitude 45°

- Irradiations solaires journalières et annuelles en haut de l'atmosphère (kWh/m²)



○ Exemple à latitude 45° (Carpentras)

- Irradiations solaires journalières et annuelles à la surface (kWh/m²)



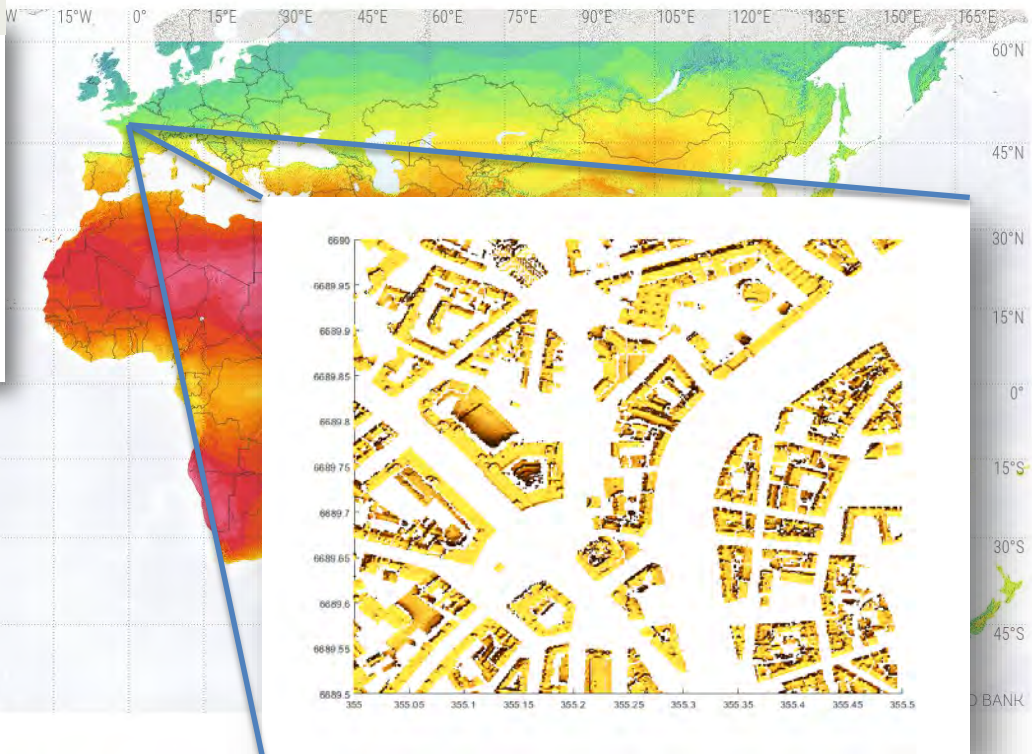
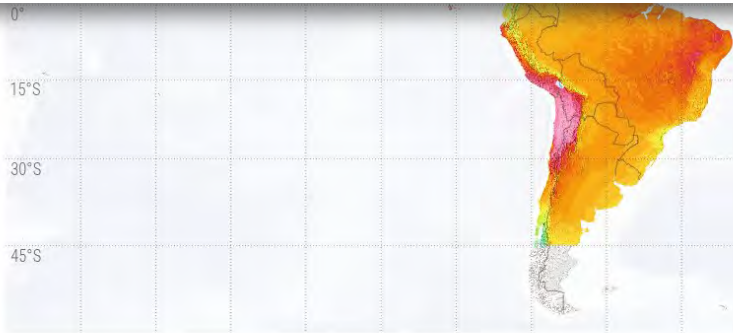
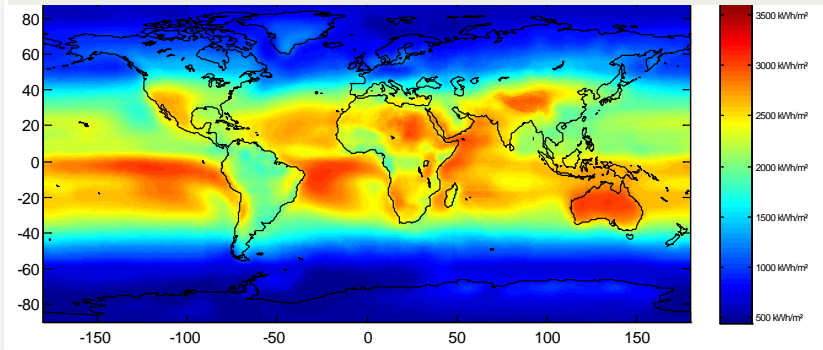
Une ressource solaire globale mais variable spatialement

○ A différentes échelles

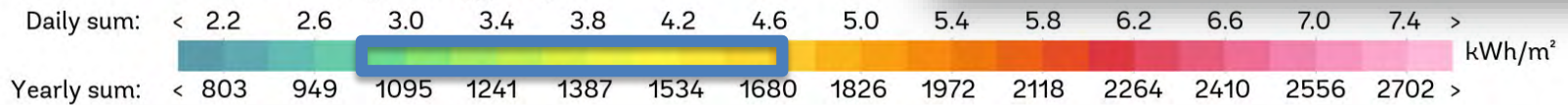
SOLAR RESOURCE MAP GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION



Estimation de la somme annuelle d'irradiation globale (kWh/m²)



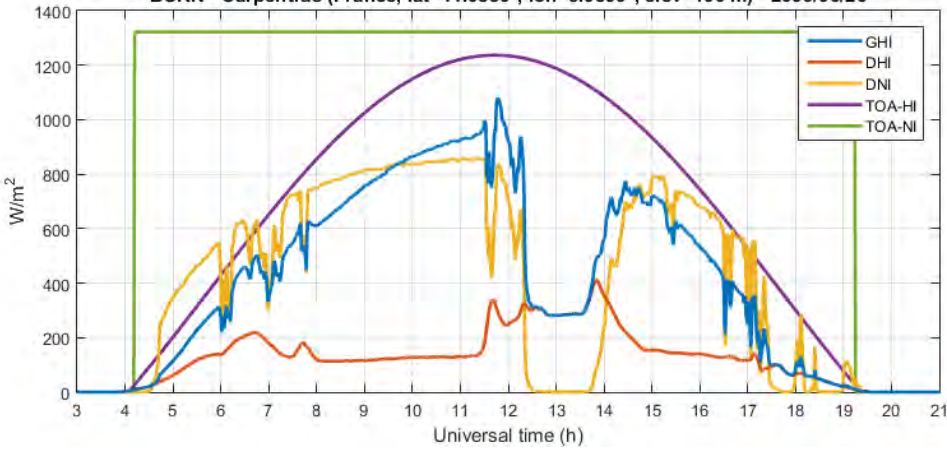
Long-term average of daily/yearly sum



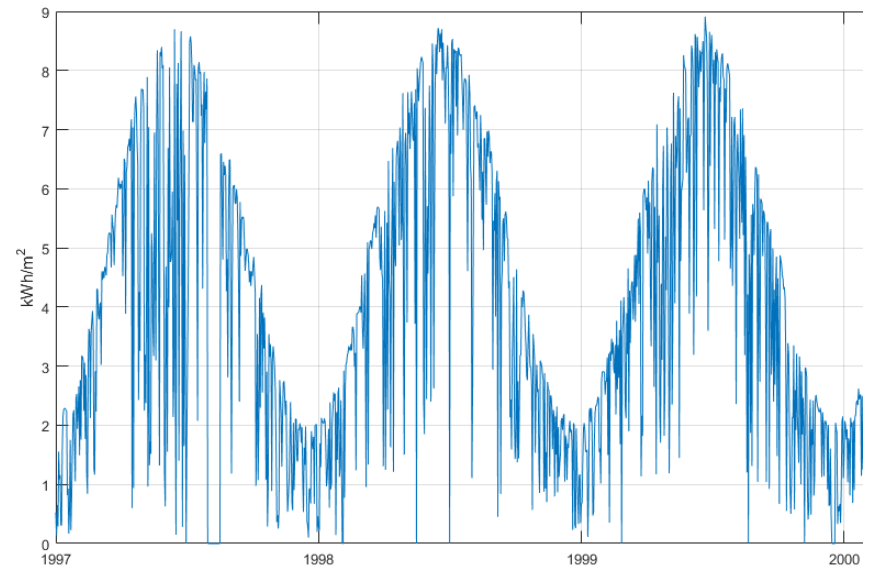
This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.

... et temporellement à différentes échelles

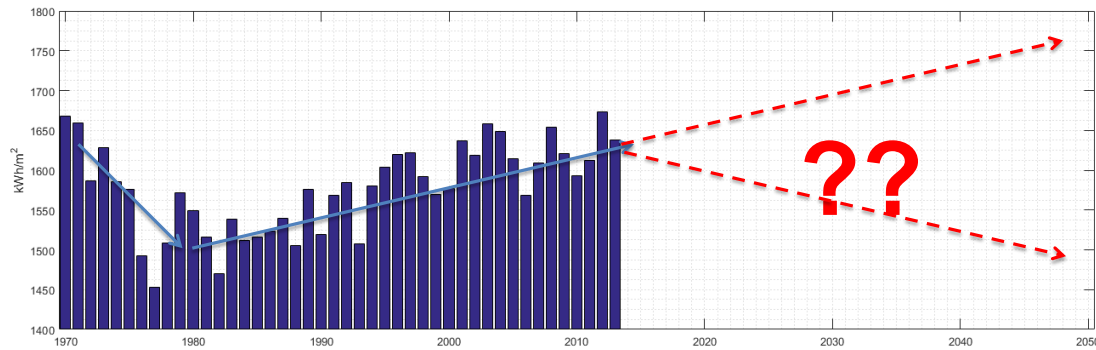
BSRN - Carpentras (France, lat=44.0830°, lon=5.0590°, elev=100 m) - 2009/06/26



Eclairements à la minute à Carpentras (W/m^2)



Irradiation globale journalière sur plan horizontal à Carpentras (kWh/m^2)



Irradiation globale annuelle sur plan horizontal à Carpentras (kWh/m^2)

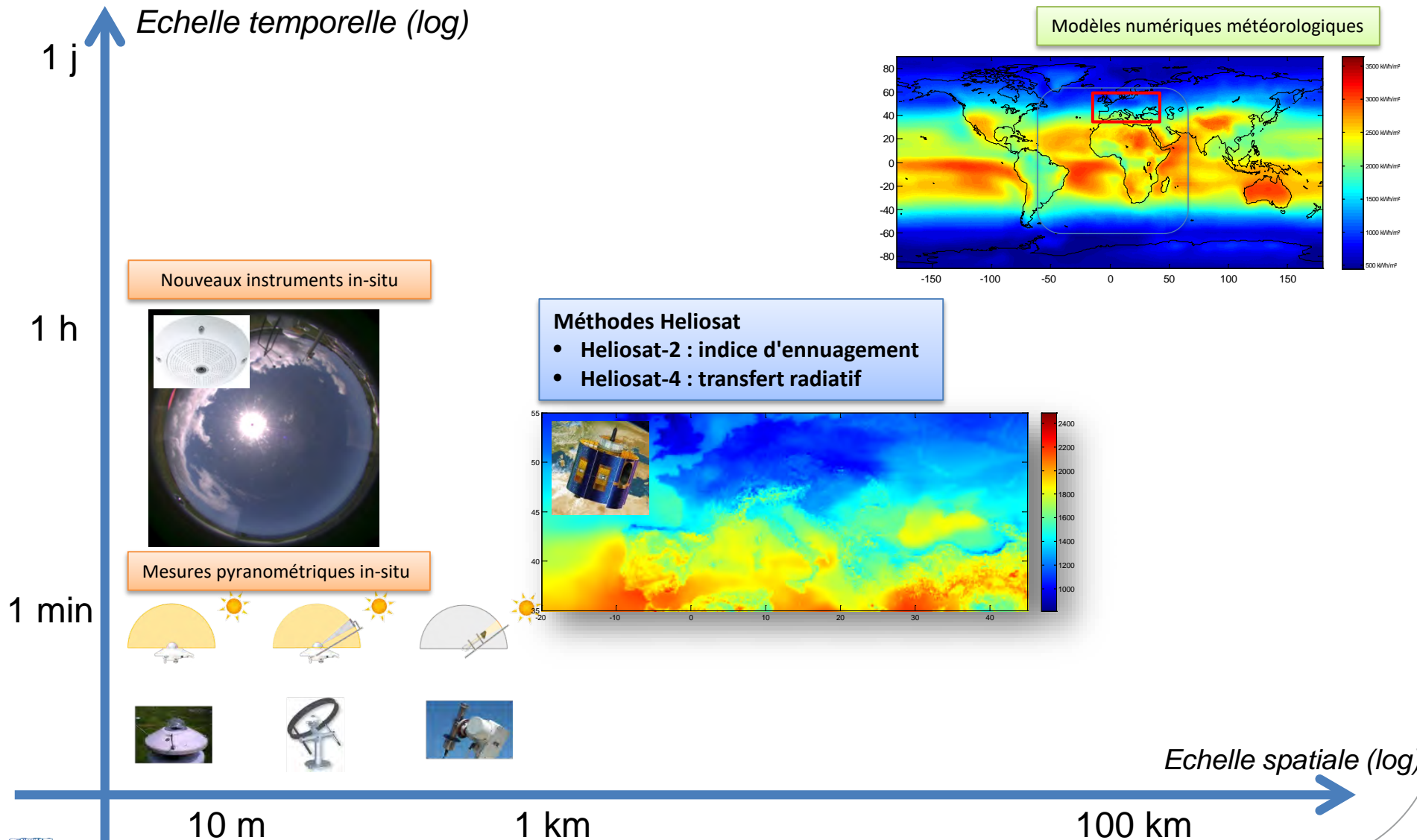
Observed tendencies in surface solar radiation

	1950s-1980s	1980s-2000	after 2000
USA	-6	5	8
Europe	-3	2	3
China/Mongolia	-7	3	-4
Japan	-5	8	0
India	-3	-8	-10

Wild, M. 2012. "Enlightening Global Dimming and Brightening the American Meteorological Society 93 (1) (January): 27-37. doi:10.1175/BAMS-D-11-00074.1.

La caractérisation de la ressource solaire

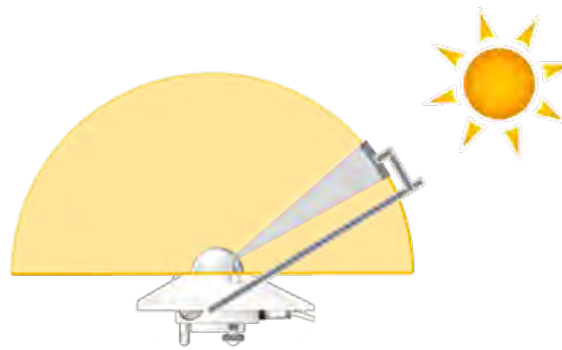
Plusieurs moyens d'Observation de la Terre à différentes échelles



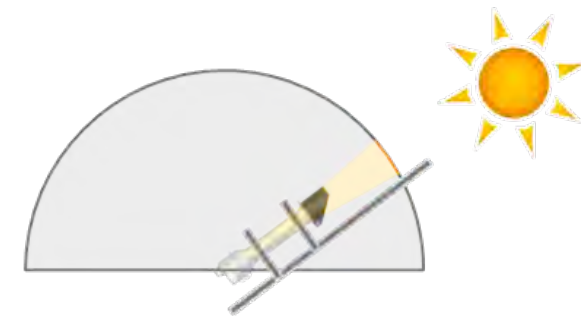
Quelques mots sur la mesure pyranométrique



Pyranomètre
Eclairement global



Pyranomètre ombré
Eclairement diffus

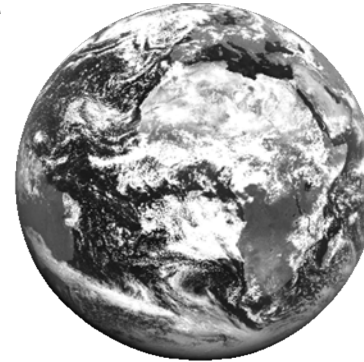
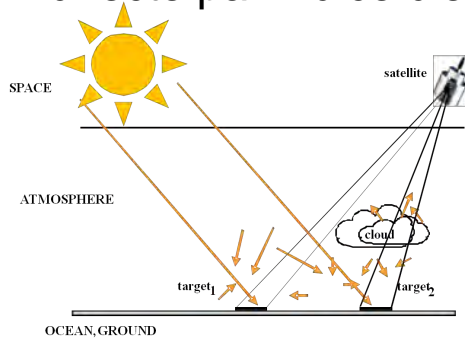


Pyrhéliomètre
Eclairement direct en incidence normale

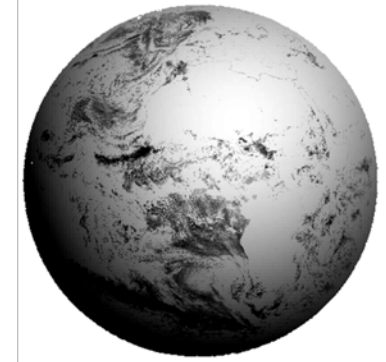


○ La méthode Heliosat-2 (2004)

- Méthode indirecte par indice d'ennuage

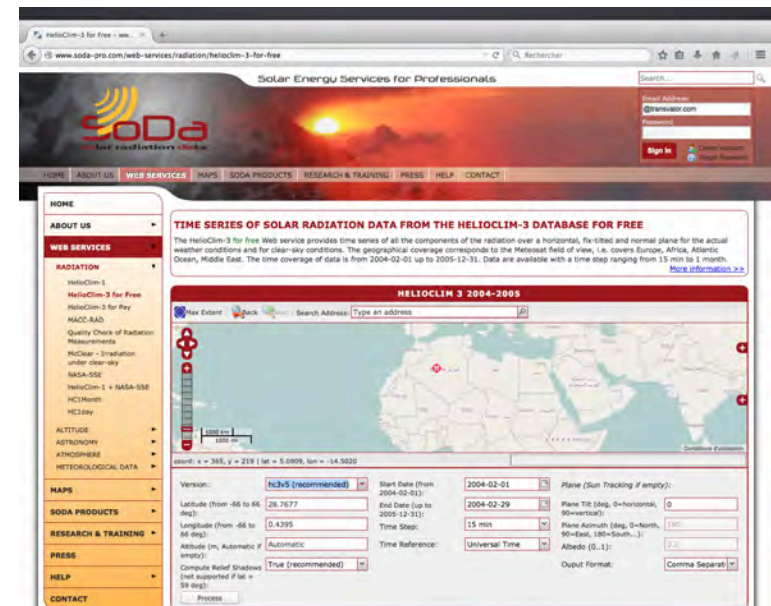


Luminance mesurée par le satellite



Irradiation (énergie)

- De nombreuses implémentations dans le monde (scientifiques et commerciales)
- 1000+ citations scientifiques
- Implémentation opérationnelle sur **Météosat Seconde Génération**
 ⇒ Base de données HelioClim-3 (3 km, 15 min)
 Commercialisation par Transvalor Innovation depuis 2009 sur le site www.soda-pro.com (14+ millions de requêtes en 2019)



○ Les méthodes Heliosat 4 et 5

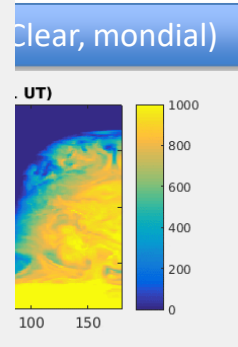
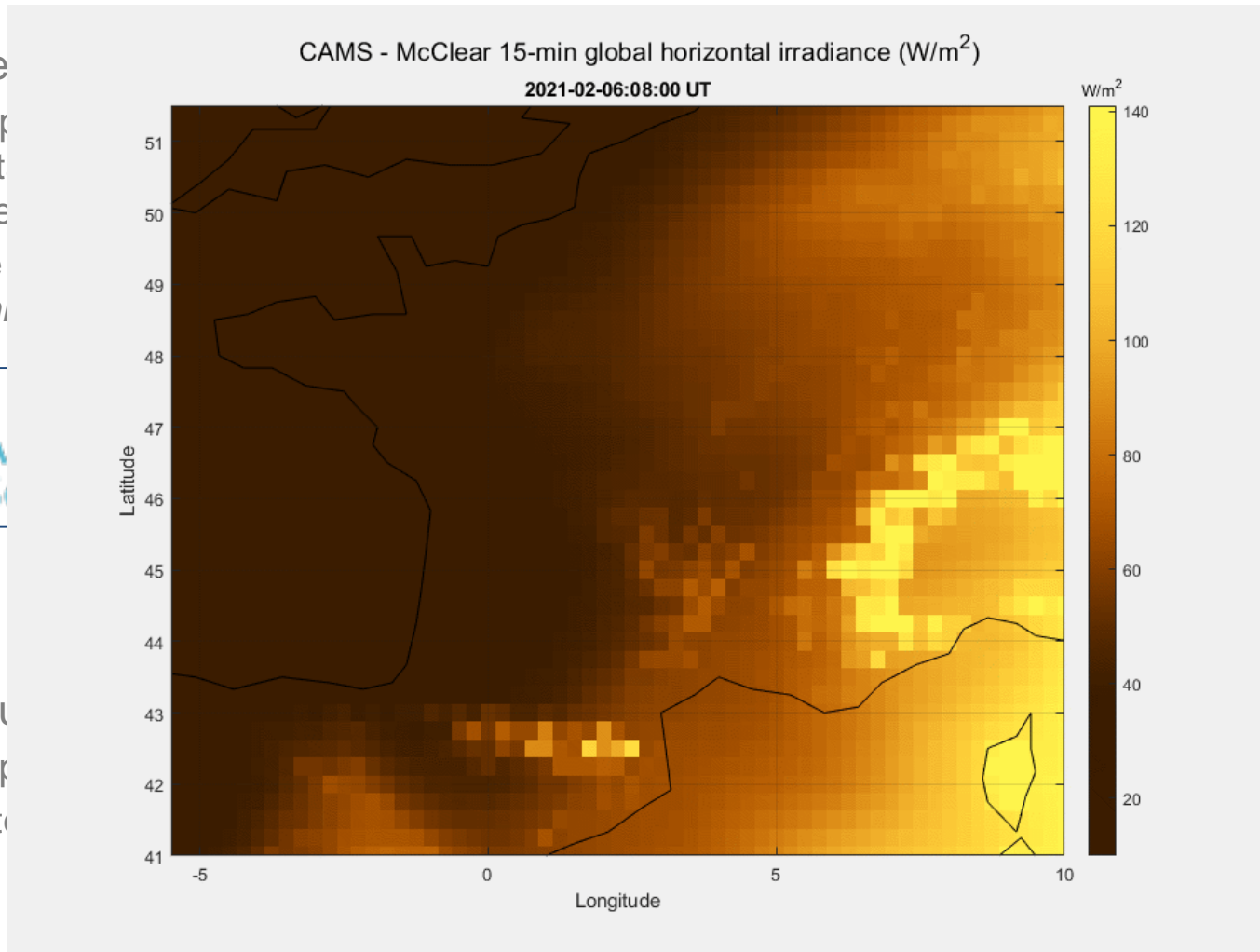
- La méthode

- Une app...
permett...
rayonne...
- Service...
Coperni...



- La toute nou...

- Une app...
- A le pot...

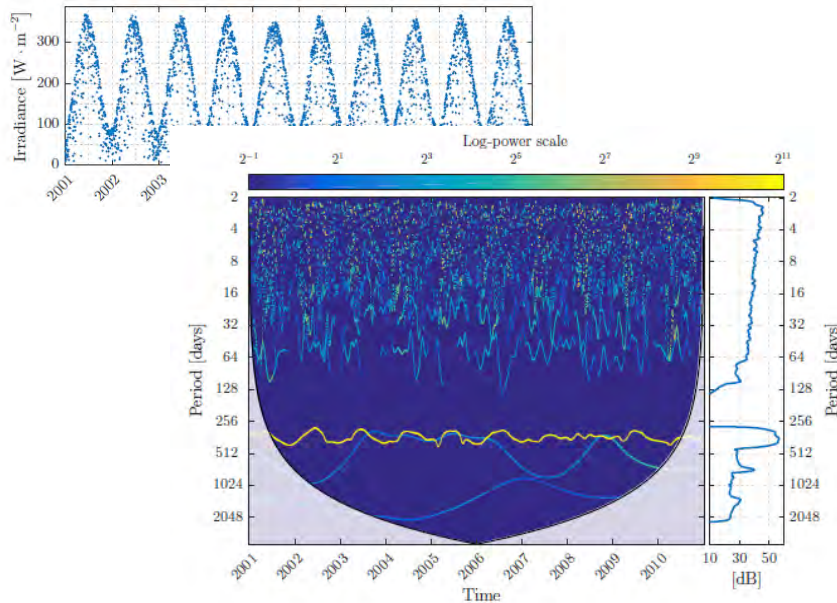


1980)

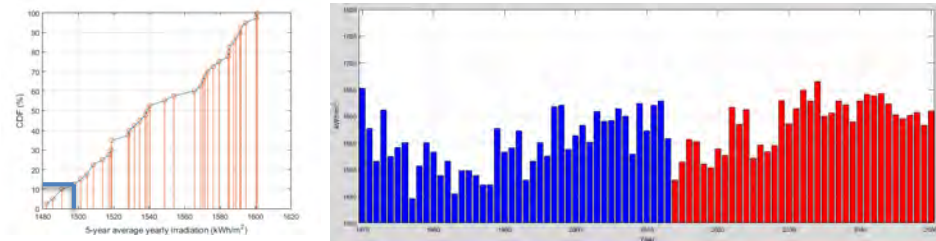
○ Analyse de variabilité à différentes échelles temporelles

- Des analyses de la variabilité temporelles de la ressource solaire

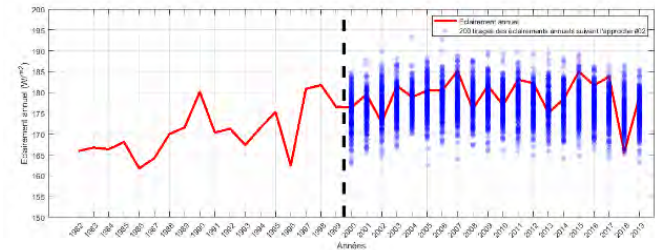
Outils d'analyse de la variabilité :
 Décomposition modale empirique (EMD) et
 Transformée de Hilbert (amplitude et freq. instantanées)
 Bengulescu, 2017



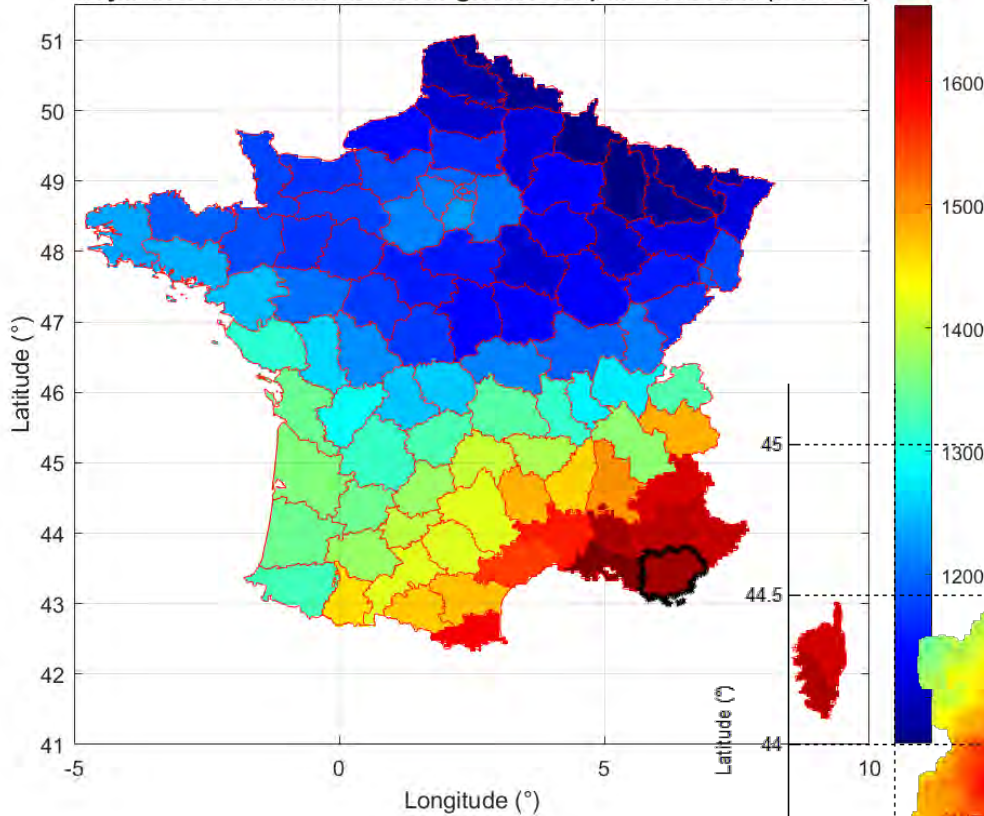
Incidence des variabilités **interannuelles et de plus long-terme** de la ressource solaire sur l'analyse de risque financier d'un projet de centrale solaire photovoltaïque
 Trolliet (2020)



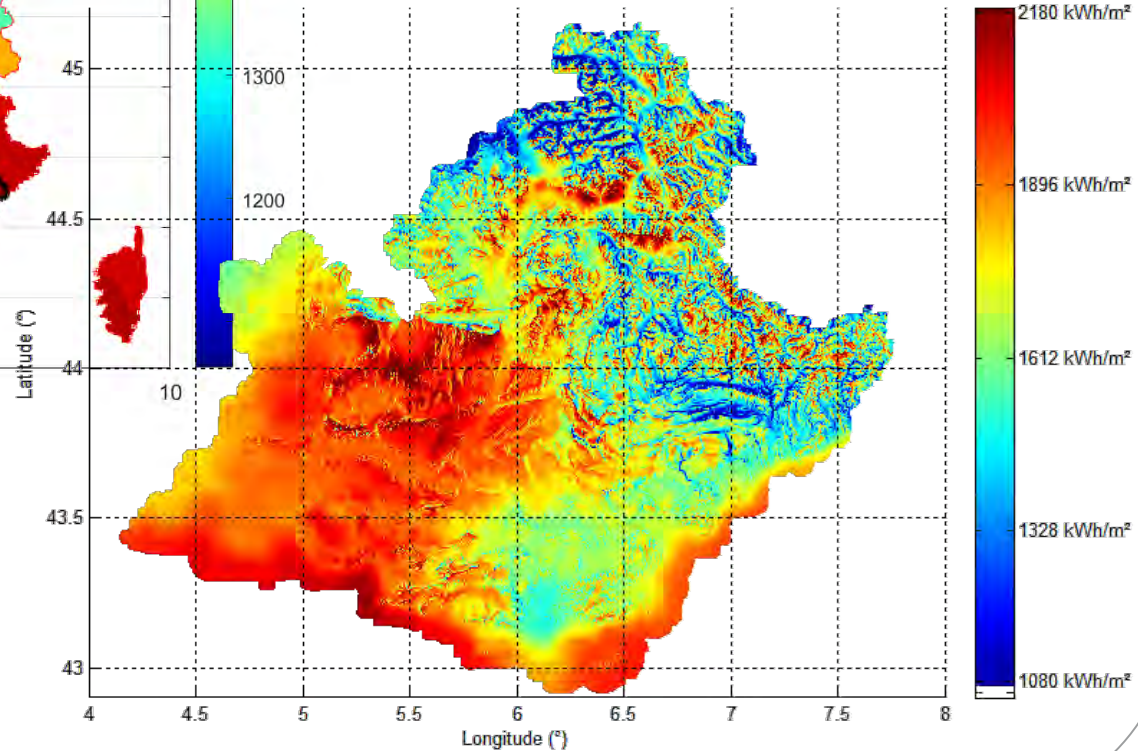
P90: 1490 kWh/m²



Moyenne de l'irradiation annuelle globale sur plan horizontal (kWh/m^2)



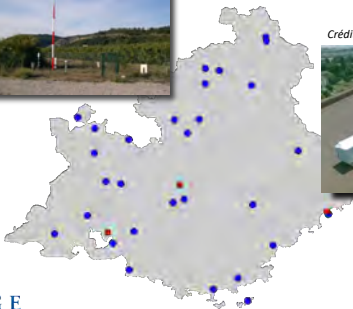
www.atlas-solaire.fr




Crédits : Météo France / MétéoSudEst



Crédits : MINES ParisTech / ARMINES



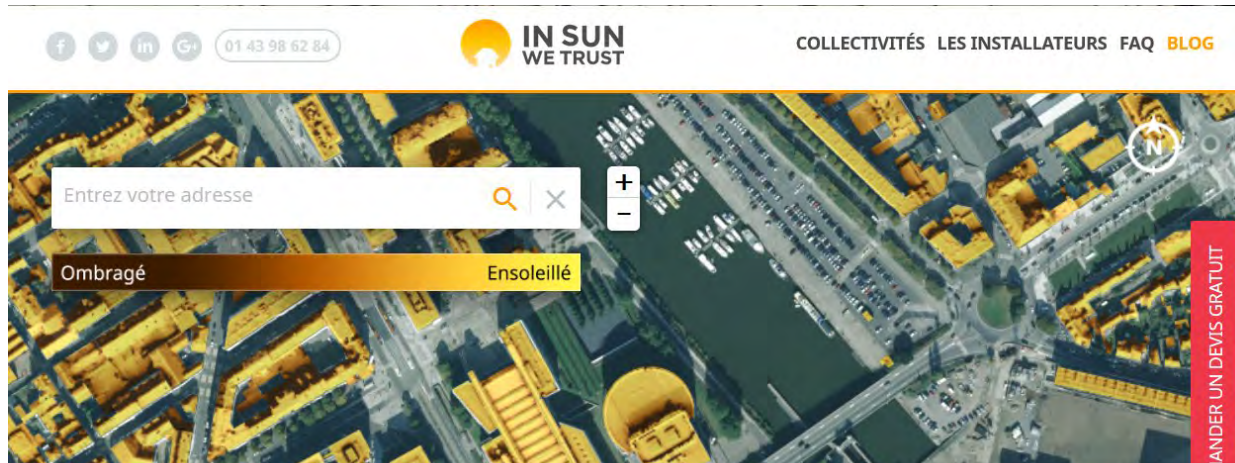
○ Potentielle solaire à l'échelle urbaine

- *Une démographie urbaine importante et croissante : intérêt d'une production électrique locale, renouvelable et non-émettrice de pollution au plus près de la demande énergétique*
- 
- Un gisement photovoltaïque en toiture estimée (grossièrement) à 350+ GWc
Source : Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations, [ADEME \(2016\)](#)
 - *Le photovoltaïque distribué sur les toits, les ombrières en milieu urbain est intéressant :*
 - *Pas d'artificialisation supplémentaire*
 - *Pas d'émission directe de polluants et de GES pendant la durée de vie d'exploitation*
 - *Production proche de la consommation*
 - *Valeur ajoutée aux toits urbains et parking souvent dégradés visuellement*
 - *Contribution positive aux effets d'îlots de chaleur urbains*

Cadastre solaires urbains à la résolution métrique

O Outil proposé par la startup In Sun We Trust 2.0 avec Transvalor Innovation et l'IGN

<https://nantes-metropole.insunwetrust.solar>



Résultat détaillé

Surface de pose

Déplacez le curseur
vers la gauche pour enlever des panneaux solaires
et vers la droite pour en ajouter

0 m² 800 m² 2960 m²

Minimal Optimal

Résultat économique sur 20 ans

REVENUS	INVESTISSEMENT	GAINS
214 500 €	208 000 €	6 500 €

Notre estimation du prix d'installation comporte un surcoût car votre toiture semble plate, et nécessite donc des frais supplémentaires pour la pose.

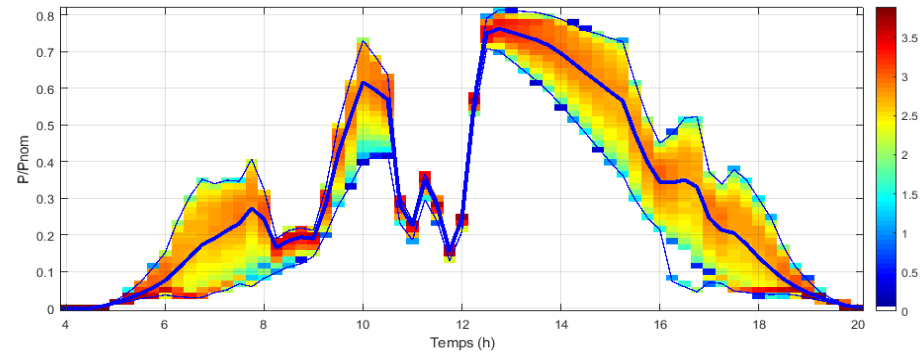
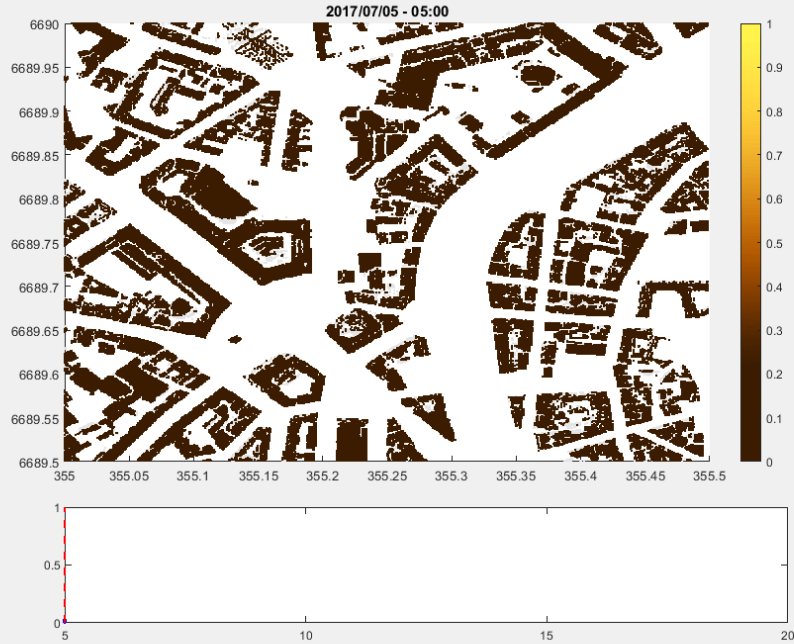
Résultat énergétique sur 20 ans

PRODUCTION	PUISSANCE	CO ₂ ÉCONOMISÉ
1 977 500 kWh	100 kWc	176.0 tonnes

Soit l'équivalent de : 220 ARBRES PLANTÉS.

La métropole de Nantes s'est donnée pour objectif de doubler d'ici 2020 la production d'énergie renouvelable sur son territoire, et de la tripler d'ici 2030. Vous pouvez, vous aussi, y contribuer en passant à l'énergie solaire !

○ Pour accompagner le développement du photovoltaïque en urbain



Projet européen H2020 e-shape



agriculture

health

renewable energy

ecosystem

water

disaster

climate

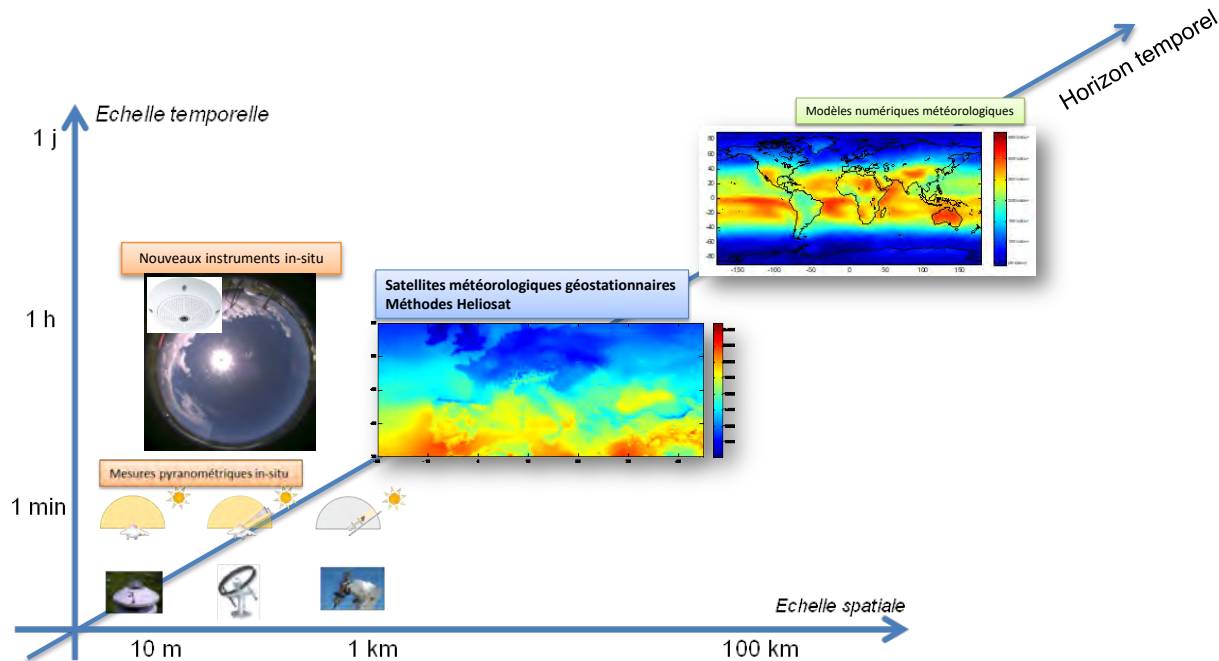


Crédits : Loic Vallance (2018)

- Différentes sources de variabilité
 - (1) Position du Soleil et masse d'air traversée
 - (2) Transparence de l'atmosphère sans nuage (vapeur d'eau, aérosol, ...)
 - (3) Les nuages
- Cette variabilité induit des variabilités de la production d'électricité d'origine solaire (PV) et a des conséquences négatives sur
 - La stabilité et la qualité du réseau électrique (court terme)
 - L'équilibre énergétique production / demande (différentes échelles de temps de prévision)
- La prévision solaire est importante pour :
 - Le pilotage du stockage
 - La planification des différentes sources d'énergie
 - La vente sur le marché de l'électricité
 - L'optimisation de la conversion (MPP, Smart Tracking)

○ Cartographie des différents types de prévision et des besoins

- Une activité de recherche très active, correspondant à un besoin clairement établi

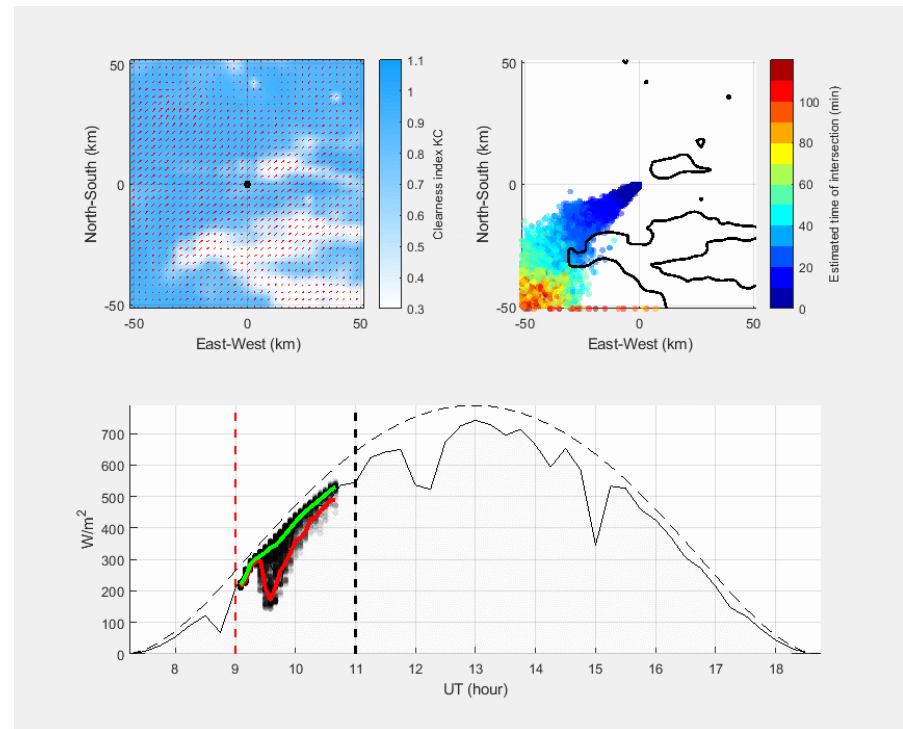


- Verrou scientifique

Le déficit, aux fines échelles, de l'information sur les corrélations spatio-temporelles relatives à l'état de l'atmosphère nécessaire à la prévision à haute résolution du rayonnement solaire à court terme.

○ Rôle central des images satellites pour la prévision intra-journalière

- Les prévisions intra-journalières sont très importantes pour optimiser la gestion de la production de l'énergie solaire
- Les images satellites sont cruciales pour de la prévision à court / très court terme:
 - Il s'agit d'une observation (et non d'une modélisation)
 - L'extension spatiale permet d'anticiper l'arrivée de nuages
- Résolution spatial 3 km et temporelle de 15 min.



○ Un challenge sur la prévision par satellite sur <https://challengedata.ens.fr/>



HOME CHALLENGES FAQ CONTACT LC

We are glad to announce that the 2022 Edition of the Challenge Data is now live! Let the competition begin and good luck to everyone getting involved in one of the amazing challenges offered by our providers. The challenges will be presented during Stéphane Mallat's lessons at the Collège de France on January 19th and 26th.



Welcome to the Challenge Data website!

Each year, we organize machine learning challenges from data provided by public services, companies and laboratories. **general documentation** and **FAQ**. Seasons begin in January; the challenges are introduced in the context of Stéphane Mallat's lesson at the Collège de France. A prize ceremony for the best participants of the preceding season will be held in February at the Collège de France (03/02/2022).

For participants

Guide to create an account, choose your challenges and submit solutions.

For professors

Guide to create a course project from selected challenges and to follow student progress.

For Challenge providers

If you are interested in organizing a challenge with us, do not hesitate to **contact us!**

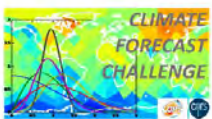
Each year, we organize a call for projects during the summer. Projects are selected and beta-tested between september and december, and launched in january. Relevant information can be found in the **providers guide** to submit a challenge for the next season.

About us

Challenge Data is managed by the **Data team (ENS Paris)**, in partnership with the Collège de France, and the **DataLab** at Institut Louis Bachelier. It is supported by the CFM chair and the PRAIRIE Institute.

29662

Submissions



Regional Climate Forecast 2022.
How accurately can we predict regional temperature anomalies based on past and neighbouring climate observations?

56

Challenges currently running



Semantic segmentation of industrial facility point cloud.
The goal of this challenge is to perform a semantic segmentation of a 3D point cloud.

9149

Participants



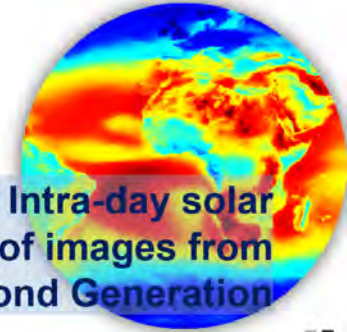
Solar forecasting using Copernicus radiation images.
The aim of this challenge is to propose machine learning and deep learning approaches on sequences of images to



Colloque Copernicus Horizon 2035 16-17 février à Toulouse



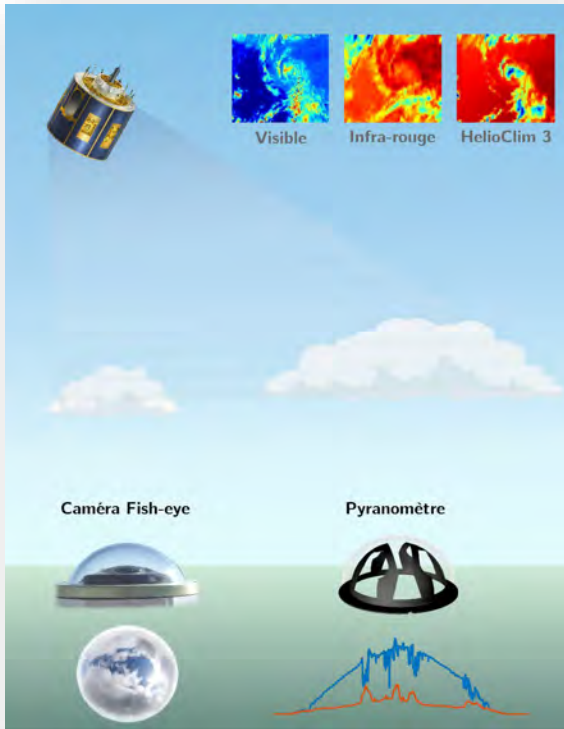
Copernicus Data Challenge: Intra-day solar forecasting with sequence of images from CAMS Radiation / Meteosat Second Generation



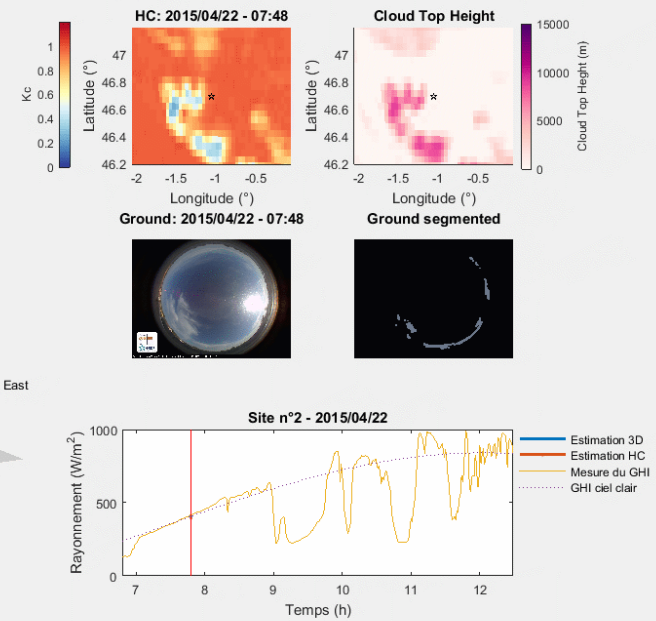
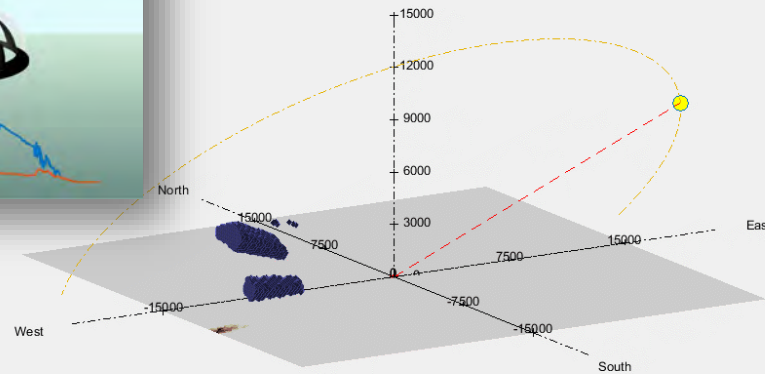
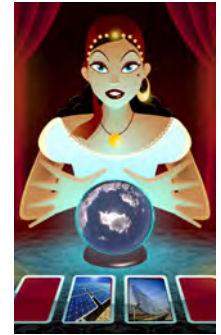
Philippe Blanc
Yves-Marie Saint-Drenan
prenom.nom@minesparis.psl.eu
Centre Observation, Impacts, Energy
MINES Paris - PSL



○ Gain de précision par synergies satellite / camera fish-eye



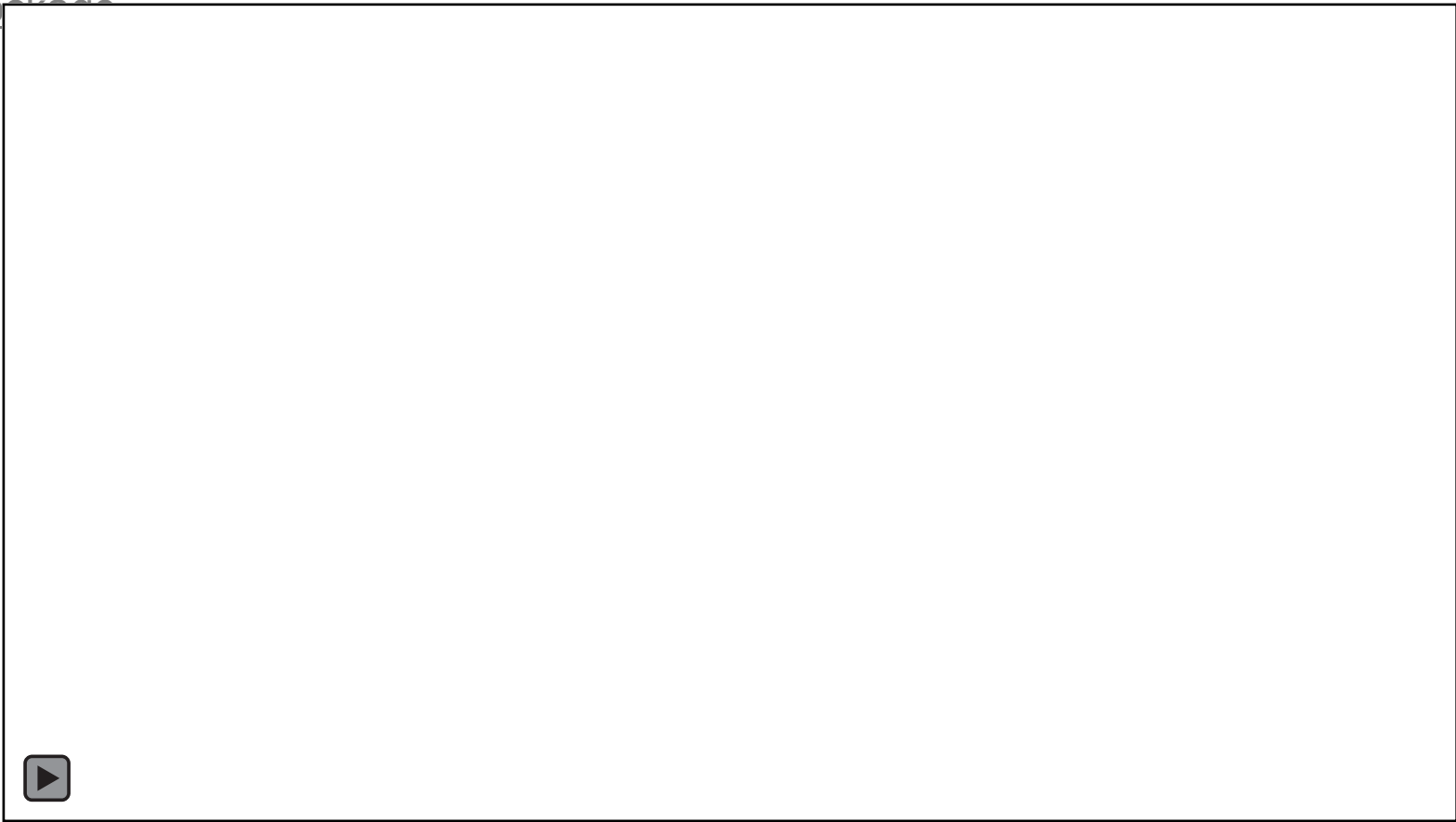
Vallance, 2018



○ Modèles de prévision avancés pour la gestion de la production PV

- En opération : gestion d'un système énergétique isolé hybride (PV / diesel) sans stockage

Adapté de www.th-energy.net

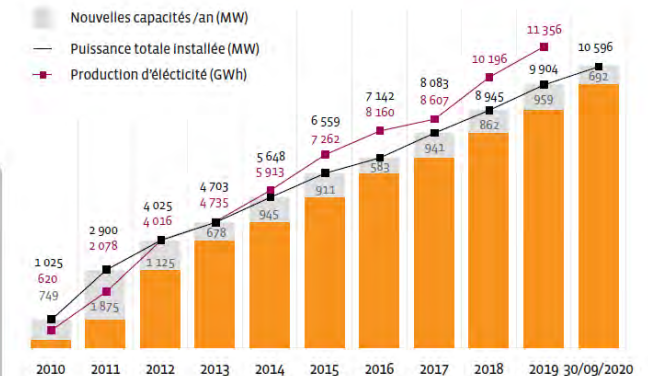


- Une croissance mondiale du photovoltaïque de plus de 40 % par an depuis 2000
 - 2019 : 630 GWc
 - 2050 : 8 TWc (1/4 énergie électrique totale), selon l'IRENA
- En France
 - 2020 : 10.5 GWc (2,2% du mix énergie électrique)
 - 2028 : entre 35 et 45 GWc dont 15 à 20 GWc en toiture (~ 9 – 10 du % mix énergie électrique)
 - 2050 : selon les 6 scénarios RTE entre 70 GWc et 206 GWc

Graphique n° 1

Parc total photovoltaïque et production d'électricité annuelle en France

Source : Observ'ER d'après les chiffres du Sdes



Observ'ER
Le Baromètre 2020
des énergies renouvelables
électriques en France

- **Note** : 1 GWc correspond à la surface PV qui produirait cette puissance instantanée s'il était éclairé en incidence normale par un éclairement de 1000 W/m², à 25°C
Typiquement : avec un rendement de 20%, et un taux de couverture de 50 %

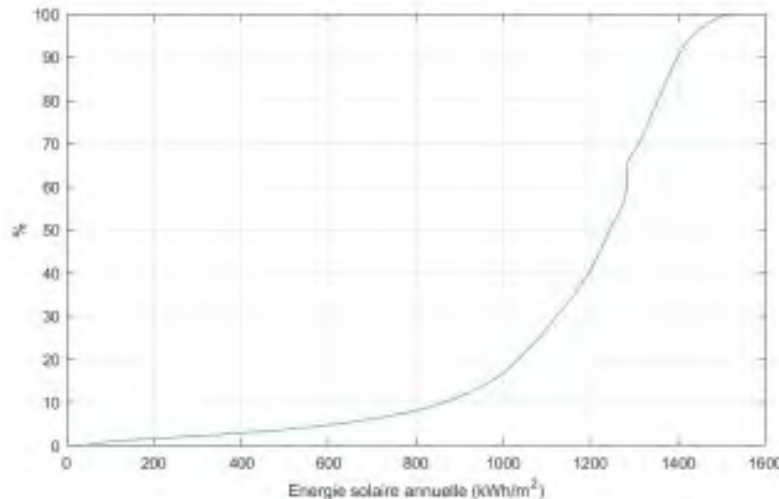
1 GWc ~ 1000 ha

Surface agricole en France : 29 millions d'hectares

- Le déploiement sur des zones délaissées et artificialisées
Le rapport [ADEME \(2019\)](#) recense 49 GWc
- Le déploiement sur le toit de bâtiments ou sur des ombrières de parking.
Le rapport [ADEME \(2016\)](#) estime (grossièrement) le potentiel des toits pour le photovoltaïque à plus de 360 GWc (ombrières : 4 GWc)
- L'hybridation de l'agriculture et du photovoltaïque : l'agrivoltaïsme
- Le déploiement du photovoltaïque flottant : le flottovoltaïsme ?
- Et pourquoi pas le stratovoltaïsme ?

○ Exemple de la communauté de communes de Nantes

- 215 000 toits identifiés et modélisés (33,8 km²)
- Potentiel de production PV annuelle
 - 4.7 TWh (rendement PV 15 %, PR = 0.83)
- Production annuelle PV pour les 10 % meilleurs toits
 - 608 GWh
 - Equivalent à la consommation annuelle électrique de 120 000 habitants (20 % de la population totale)



Fraction de toits détectés dont l'irradiation solaire est supérieure à un seuil exprimé en kWh/m²

Accueil • Évènements • Précédents évènements • 13 mars : Agriculture et photovoltaïque

2018

13 MARS : AGRICULTURE ET PHOTOVOLTAÏQUE

Conférence Agriculture et photovoltaïque le 13 mars à Montpellier



INRAE

ACCÈS À LA CONFÉRENCE

Opportunisme ou opportunité ?

13 mars

Caisse régionale Crédit Agricole Languedoc - Lattes

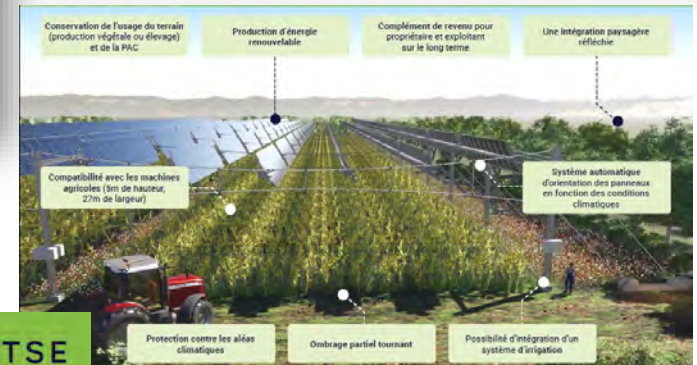
[Accès](#) | [Contact](#)

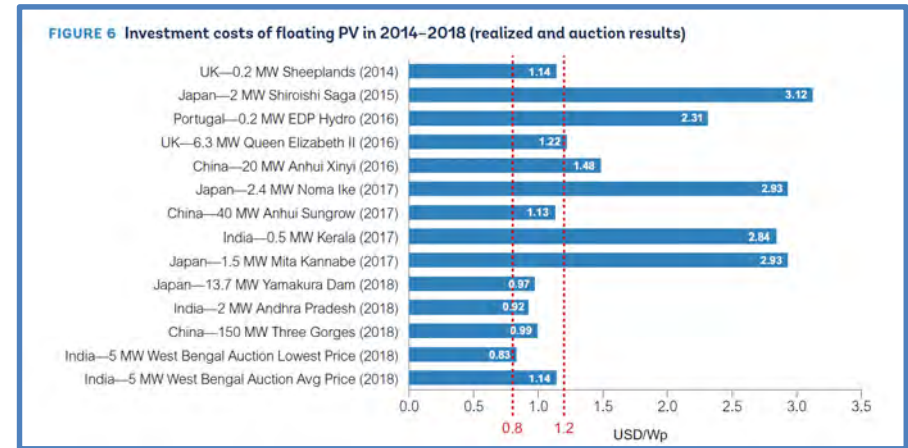
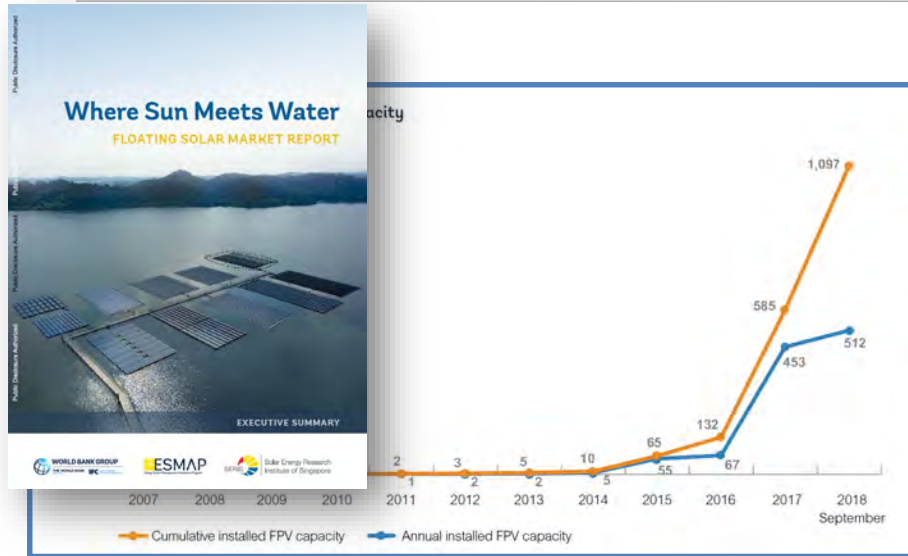


Serre photovoltaïque



Next2Sun





Les 17 hectares de panneaux solaires ont été installés sur le lac artificiel de Lazer de 50 hectares (AFP, www.leparisien.fr)



Unité d'enseignement "Terre et Société" Evaluation du potentiel des plans d'eau en France pour le photovoltaïque flottant (2021)

- Entre 1550 et 2450 km² de plans d'eau potentiels (selon ZNIEFFS exclues ou pas)
- Entre 155 GWc et 245 GWc

Thèse de Doctorat - École Doctorale ABIES - Spécialité : Sciences du paysage

Faire émerger des potentiels de transition par le prisme du paysage et de l'énergie
Mise en regard d'expériences en contexte méditerranéen français

Joris MASAFONT



à l'échelle d'action d'un poste source

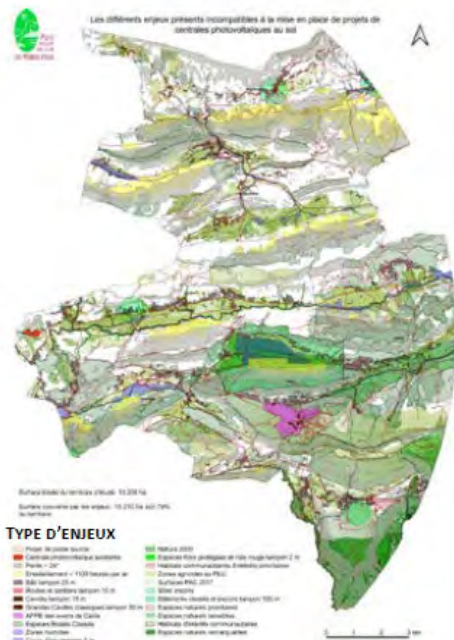


à l'échelle d'un site industriel et d'un site patrimonial



à l'échelle d'un jardin

Méthodologie pour une maîtrise du développement de centrales photovoltaïques au sol PNRPA



Cartographie M. Linck et P. Blanc (2018)



Atelier n°1 de février 2019
« Outil d'aide à la décision PV/Poste source » :
Organisation P. Blanc et J. Masafont. (2018)



Expérimentation d'une méthodologie de terrain :
J. Masafont, en collaboration avec le CEREMA (2019)
Observations in-situ du sol et à vue vol d'oiseau (terrière, drone)



Cartographie CEREMA (2019)

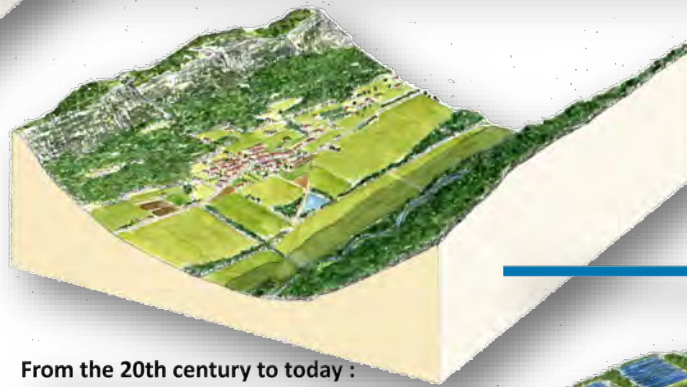


Développement de projet micro-STEP solaire
avec le soutien de Stepsol et l'antenne du CEA
de Cadarach (D. Blanquet)



Before the industrial era:

An optimized production territory in order to exploit the whole available resources



From the 20th century to today :

A territory sneaking and depopulating in the face of attractiveness from the French Riviera



The twenty-first century :

Recover energy independence and food of the territory.
Which space organizations for tomorrow?



Fondation Mines ParisTech

Chaire SciDoSol

Les Sciences de la Donnée appliquées à l'énergie Solaire pour la transition énergétique

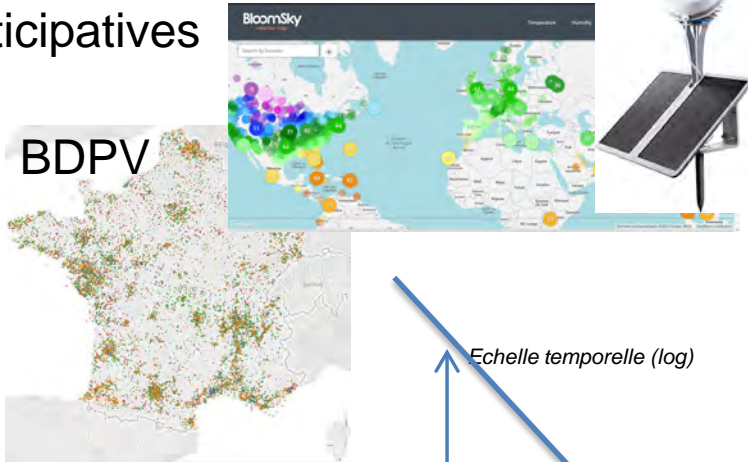
Contacts

Philippe BLANC (philippe.blanc@minesparis.psl.eu)

Yves-Marie SAINT-DRENAN (yves-marie.saint-drenan@minesparis.psl.eu)

- Conjonction entre des avancées algorithmiques et l'accroissement des données disponibles, multi-dimensionnelles et hétérogène

Sciences participatives

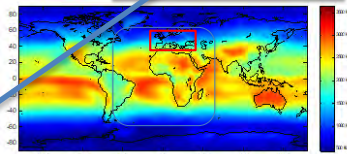


Nouveaux sat. géostationnaires

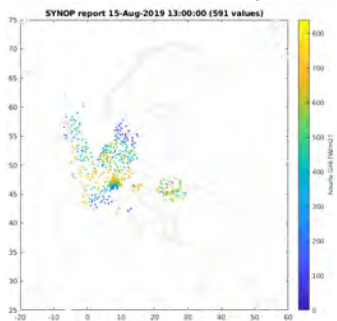


Echelle temporelle (log)

Modèles numériques météorologiques



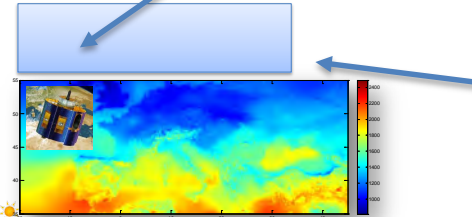
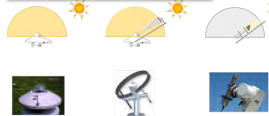
Données Synop



Nouveaux instruments in-situ



Mesures pyrométriques in-situ



Modèles méso-échelles



Echelle spatiale (log)

1 km

100 km

- Conjonction entre des avancées algorithmiques et l'accroissement des données disponibles, multi-dimensionnelles et hétérogène
- **Vers une meilleure connaissance de la ressource solaire** avec de meilleures résolutions angulaires, spectrales, temporelles et spatiales
 - dans le passé (chroniques temporelles historiques)
 - dans le temps présent (*nowcasting*)
 - en prévision de quelques minutes à quelques jours, quelques mois
 - dans sa projection climatique
- **Objectifs pour le développement de l'énergie solaire**
 - améliorer l'efficacité de son exploitation
 - réduire ses coûts
 - maîtriser son intégration à grande échelle dans les territoires naturels, les délaissés, les zones urbaines et les bâtiments
 - limiter les impacts de sa variabilité dans l'espace et le temps dans la planification des systèmes énergétiques, dans les réseaux de transport d'énergie et l'autoconsommation
 - limiter sa vulnérabilité aux risques naturels, météorologiques et climatiques

Prof. Philippe BLANC
MINES Paris - PSL
Centre Observation, Impacts, Energie

Responsable du Département Energétique et Procédés

philippe.blanc@minesparis.psl.eu

T. (+33) 4 93 95 74 04

F. (+33) 4 93 67 89 08

www.minesparis.psl.eu

www.oie.minesparis.psl.eu

