

## **Journée thématique de la SFT**

**Groupe « Thermique atmosphérique et adaptation au changement climatique »**

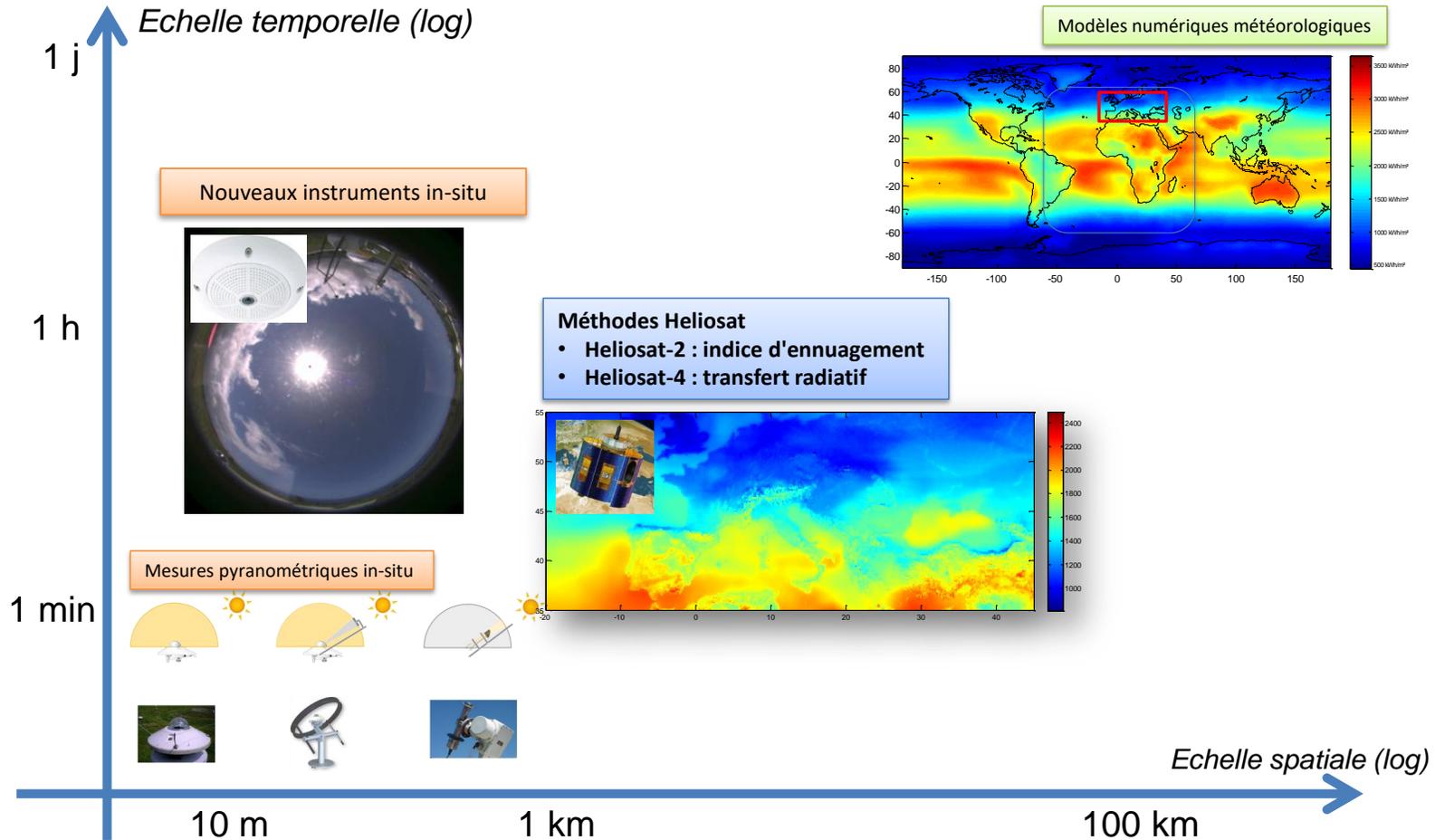
**Thème 2: Ressource solaire, modélisation, mesure**



■ Yves-Marie Saint-Drenan (O.I.E - MINES ParisTech – PSL)  
Sylvain Cros (LMD – Ecole Polytechnique)

# La caractérisation et la prévision de la ressource solaire

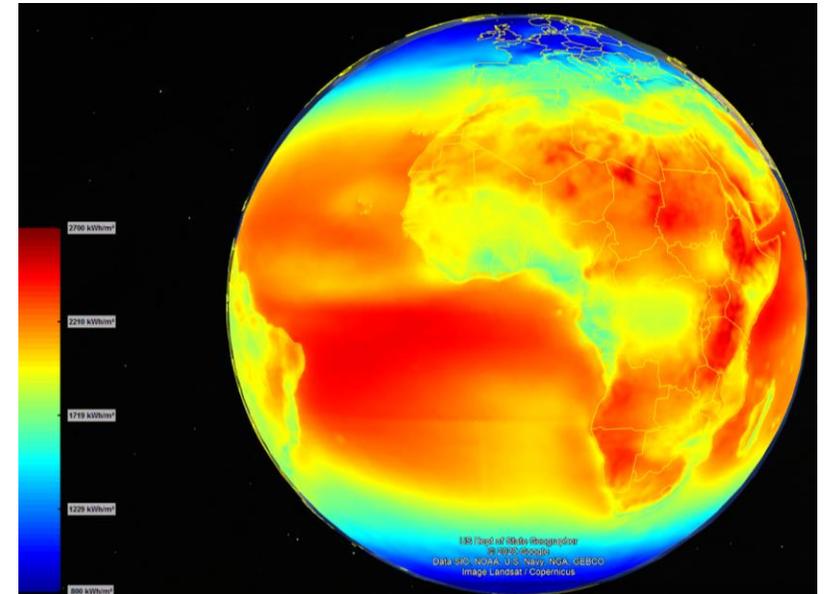
## Les différentes sources d'observation de la Terre



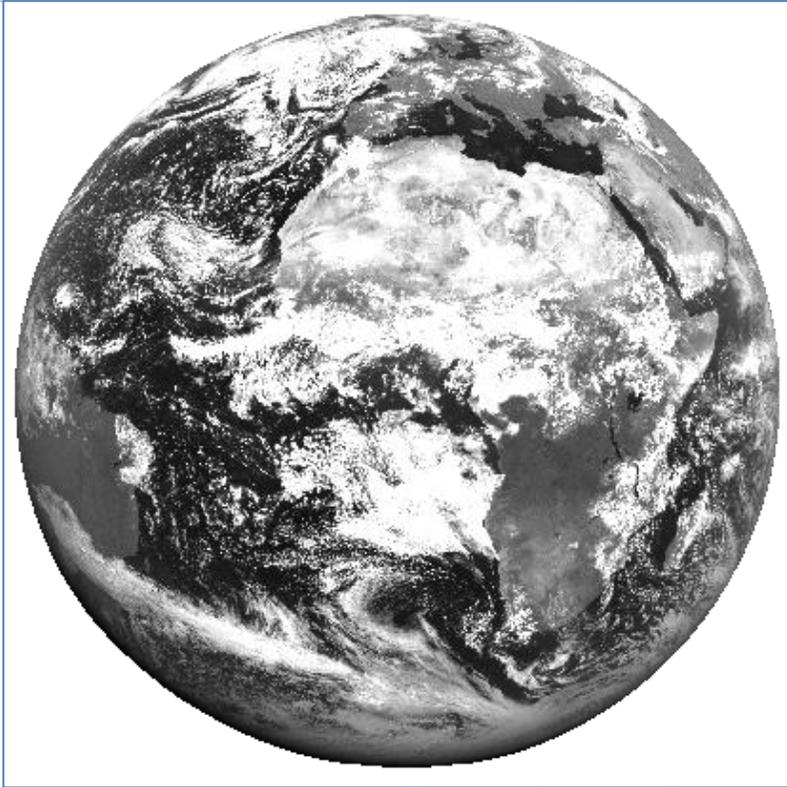
# Les satellites géostationnaires comme source d'information pour la caractérisation et la prévision solaire

- La méthode Heliosat-2 (2004)

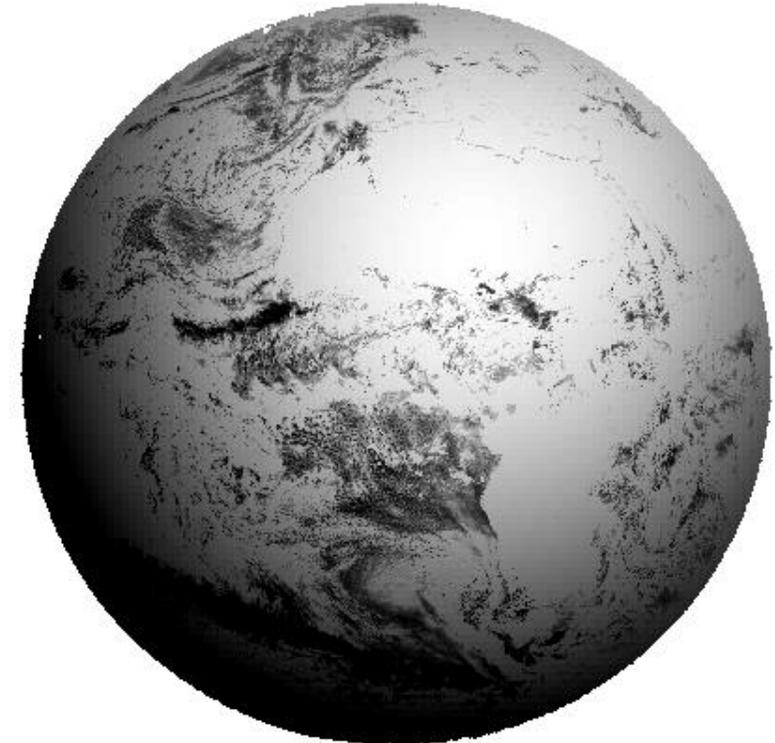
- Méthode empirique, utilisée dans de nombreuses applications à travers le monde (scientifiques et commerciales)
- 1000+ citations scientifiques
- Implémentation opérationnelle pour **Météosat Seconde Génération**
  - ⇒ Base de données HelioClim-3 (3 km, 15 min)
  - Commercialisation par Transvalor Innovation depuis 2009 sur le site [www.soda-pro.com](http://www.soda-pro.com) (5+ millions de requêtes par an)



# Les satellites géostationnaires comme source d'information pour la caractérisation et la prévision solaire



Luminance mesurée par le satellite



Irradiation (énergie)

Indice d'ennuagement

$$n_c = \frac{\rho_{\text{sat}} - \rho_{\text{sat-clair}}}{\rho_{\text{sat-nuage}} - \rho_{\text{sat-clair}}}$$

Rapport de ciel clair

$$K_c = f(n_c)$$

Modèle de ciel clair

$$E = K_c E_{\text{clair}}$$

# Les satellites géostationnaires comme source d'information pour la caractérisation et la prévision solaire

- Bases de données de rayonnement solaire HelioClim
  - [www.helioclim.net](http://www.helioclim.net), [www.soda-is.com](http://www.soda-is.com)
  - Estimation du rayonnement solaire à partir d'images satellites METEOSAT

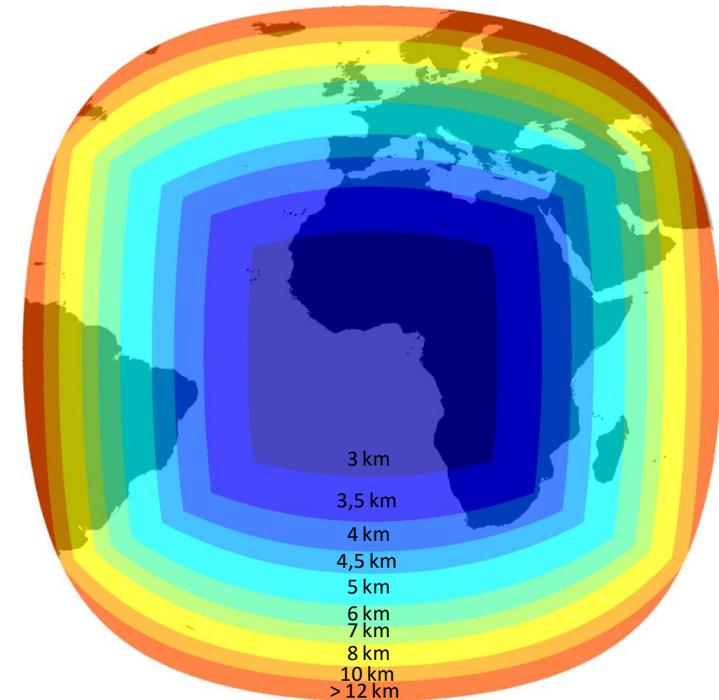
- HelioClim-1 (HC-1)

- Résolution spatiale : 20 à 30 km
- Résolution temporelle : journalière
- Etendue temporelle : 1985 -2005

- HelioClim-3 (HC-3)

- Résolution spatiale : 4 km
- Résolution temporelle : ¼ horaire
- Etendue temporelle : depuis 2004

*Couverture et résolution de HelioClim-3*



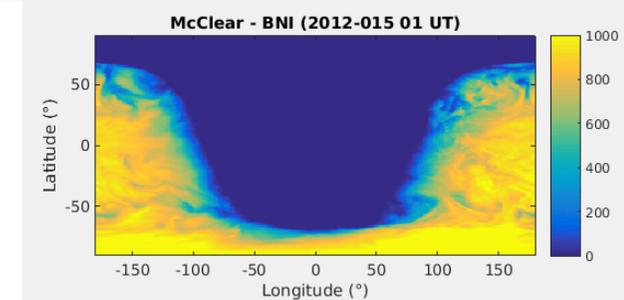
# Les satellites géostationnaires comme source d'information pour la caractérisation et la prévision solaire

- **La méthode Heliosat-4 (Qu, 2013)**

- Une approche physique "sans empirisme" permettant une caractérisation plus fine du rayonnement solaire (directe, diffus, spectral)
- Service opérationnel :  
*Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS)*



Irradiation par "ciels clairs" (McClear, mondial)



- **La toute nouvelle méthode Heliosat-5 (Tournadre, 2020)**

- Une approche simple, multi-satellite (géostationnaires, défilants ou autres)
- A le potentiel de couverture mondiale sur des périodes temporelles longues (depuis 1980)

# Collecte, formatage et analyse de mesures in-situ



*Stations des réseaux BSRN, ABOM et enerMENA*

Utilisation de mesures de référence pour la validation de nos modèles

Travail de collecte des mesures de différents réseaux mondiaux

Promotion de format de données respectant les principes FAIR (netCDF)

Exploitation des fonctionnalités offertes par les serveurs de données Thredds (openDAP, subset...)

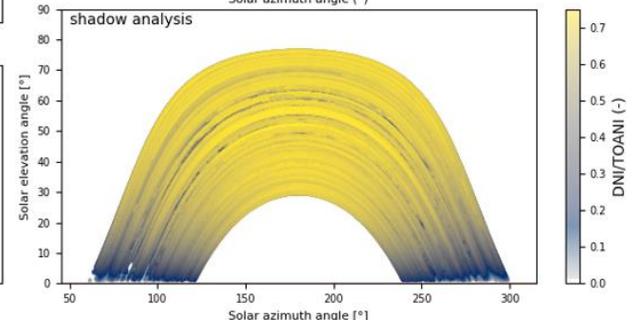
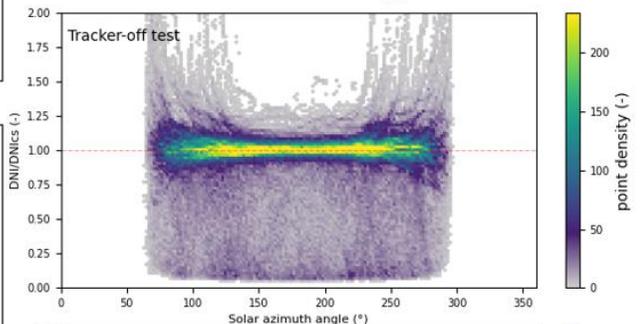
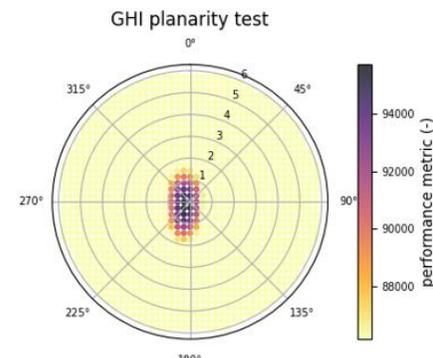
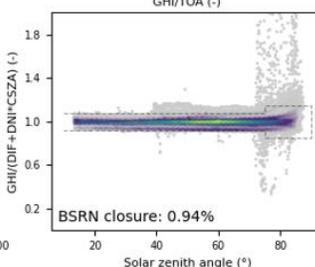
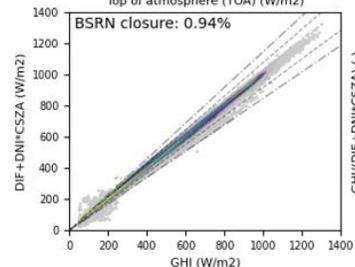
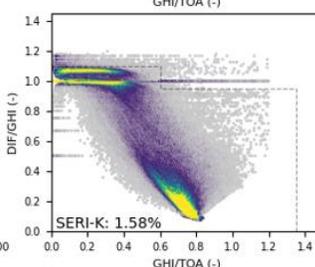
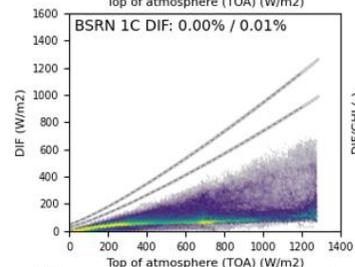
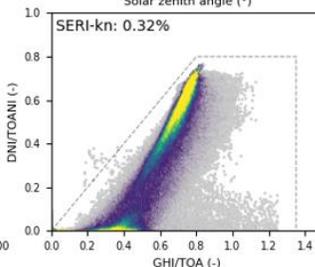
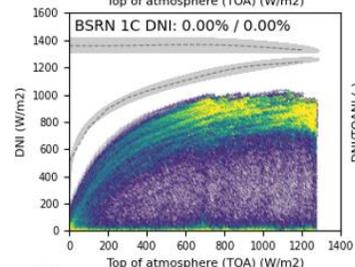
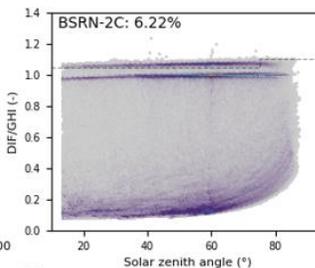
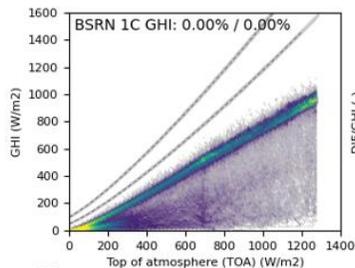
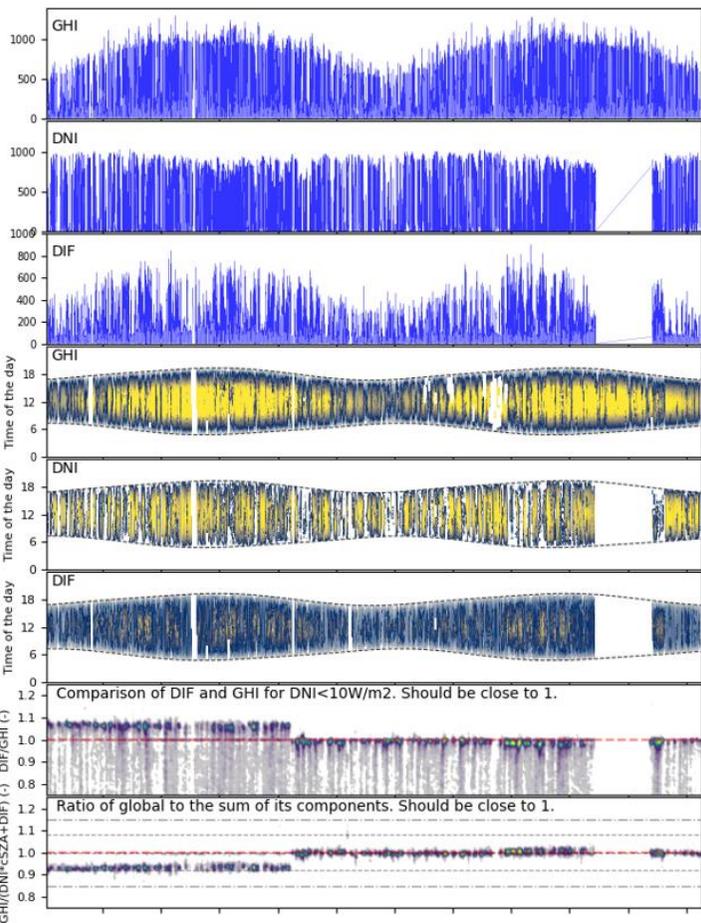
# Collecte, formatage et analyse de mesures in-situ

## Exemple de rapport visuel de QC

Chesapeake Light (USA, North Atlantic Ocean)  
 CLH: Chesapeake Light  
 Source: BSRN Network  
 latitude: 36.90°  
 longitude: -75.71°  
 altitude: 37m

Period: 2015-01-01 - 2016-11-15  
 Annual sums:  
 GHI: 1660 kWh/m2 (97.3% availability)  
 DIF: 574 kWh/m2 (89.4% availability)  
 DNI: 1573 kWh/m2 (89.1% availability)

Visual plausibility control  
 v2.2 2021-08-20  
 ARMINES, DLR (CAMS)  
 Modus: Show all data  
 Daily max flag: 20%

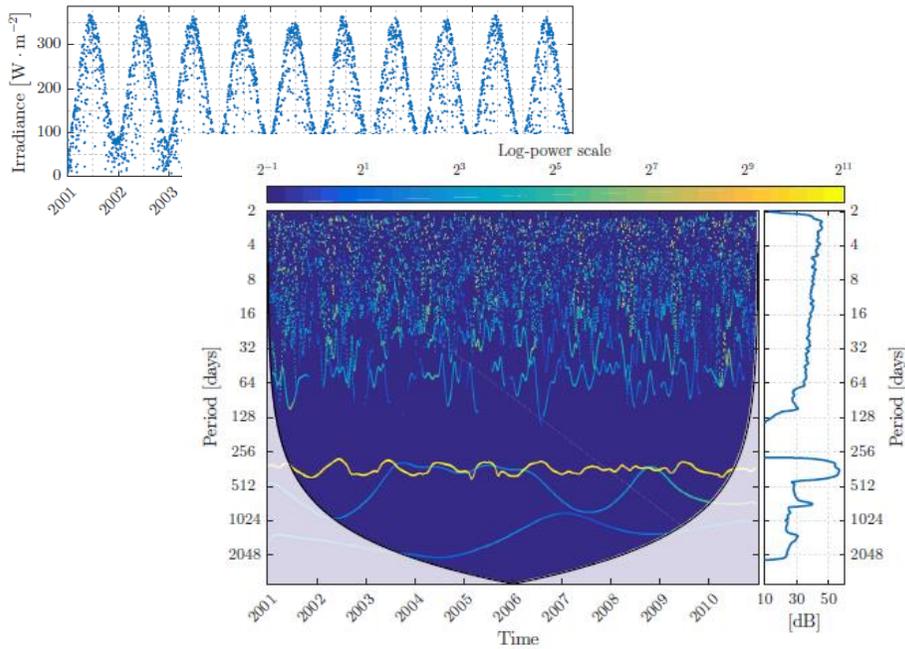


# La caractérisation de la ressource solaire

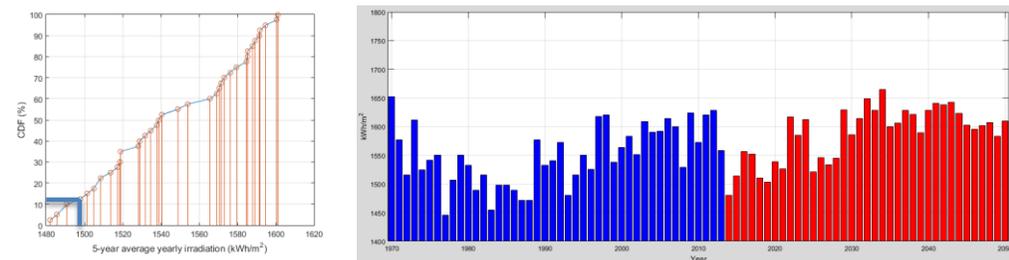
## Analyse de variabilité à différentes échelles temporelles

- Des analyses de la variabilité temporelles de la ressource solaire

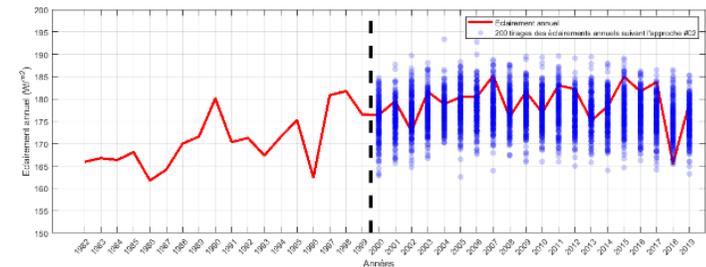
Outils d'analyse de la variabilité :  
Décomposition modale empirique (EMD) et  
Transformée de Hilbert (amplitude et freq. instantanées)  
Bengulescu, 2017



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)



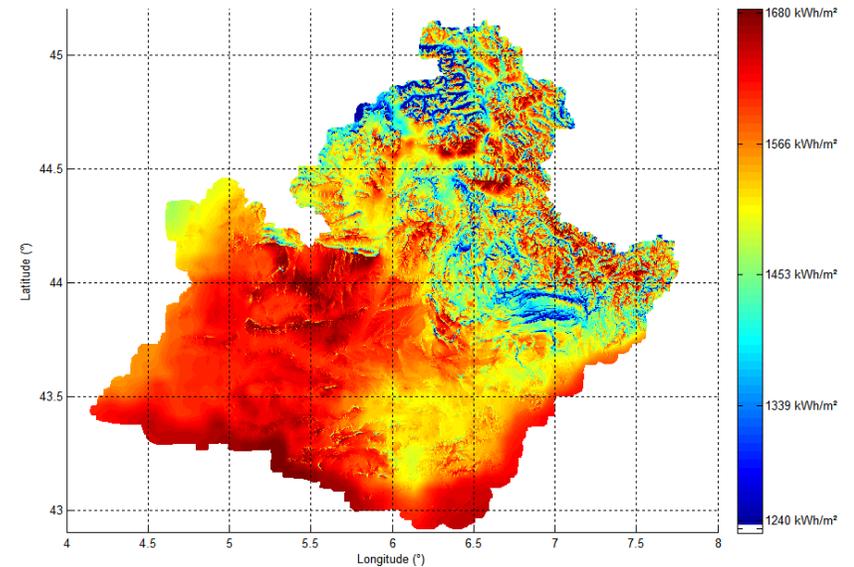
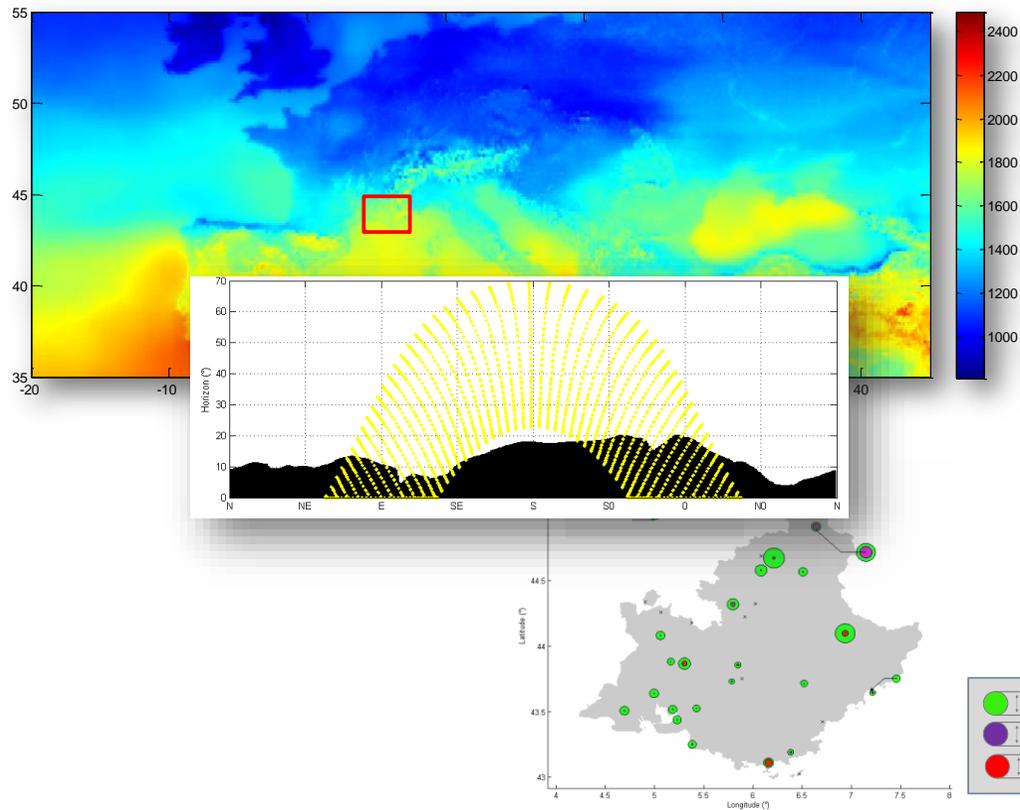
P90: 1490  $kWh/m^2$



# La caractérisation de la ressource solaire

## Atlas solaire régionale sub-kilométrique

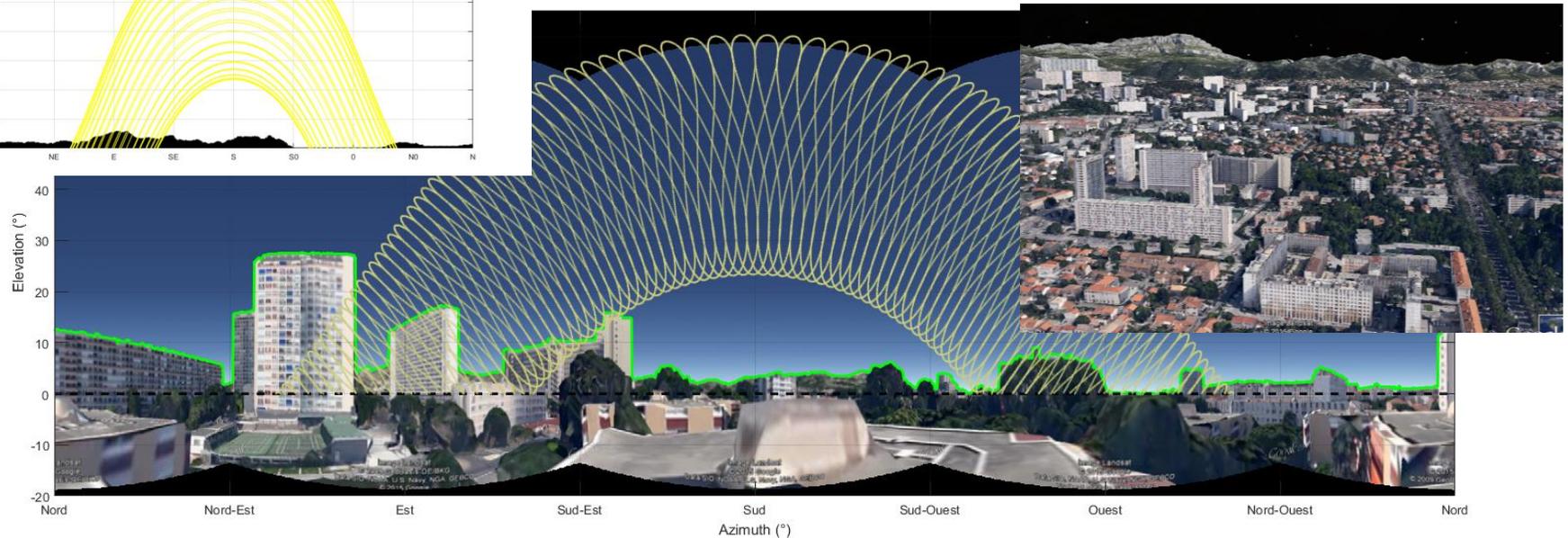
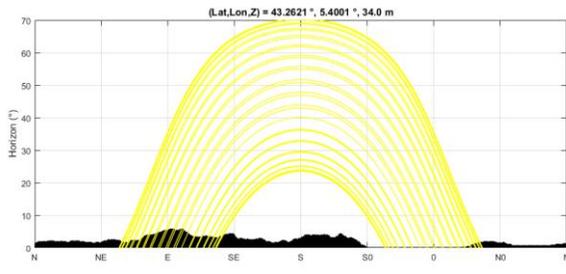
- Descente en échelle spatiale des estimations par satellite  
Atlas solaire Région Sud : de 3 km à 200 m de résolution ([www.atlas-solaire.fr](http://www.atlas-solaire.fr))



# La caractérisation de la ressource solaire

## Vers un *cadastre solaire décamétrique en milieu urbain*

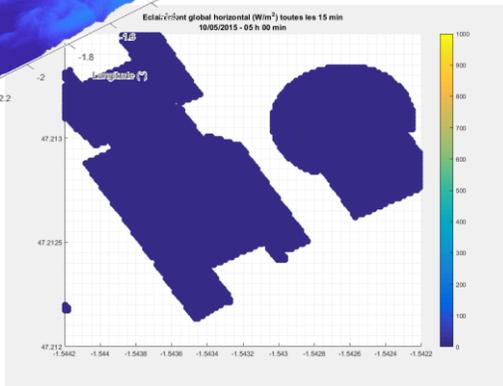
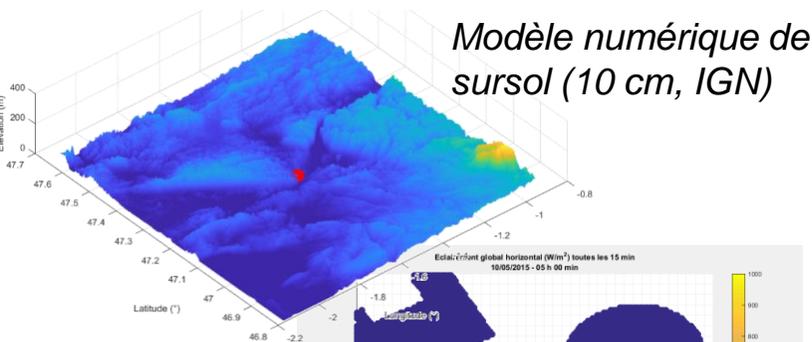
- Une démographie urbaine importante et croissante : intérêt d'une production électrique locale, renouvelable et non-émettrice de pollution au plus près de la demande énergétique
- Une première difficulté : l'information 3D à haute résolution
  - ☑ vers une "démocratisation" de cette information (par exemple Google Earth)



# La caractérisation de la ressource solaire

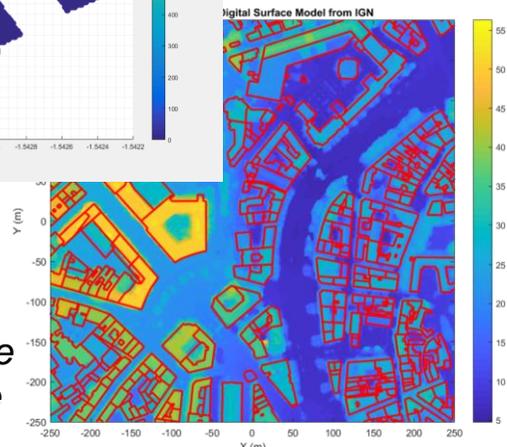
## Cadastre solaire à très haute résolution

- Descente en échelle spatiale des estimations par satellite
- Cadastre Solaire métrique avec**  
**In Sun We Trust, IGN, Transvalor Innovation SoDa**



Calcul d'ombrage

Calcul de cadastre



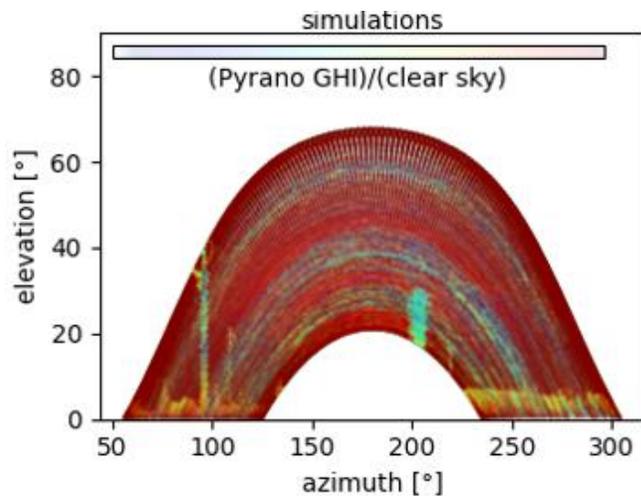
VOUS		AUTOCONSOMMATION		THERMIQUE	
		SAU		CHAUFFE	
<b>Résultat économique sur 20 ans</b>					
REVENUS	INVESTISSEMENT	GAINS			
145 000 €	124 500 €	20 500 €			
Notre estimation du prix d'installation comporte un surcoût car votre toiture n'est pas plane, et nécessite donc des fixations supplémentaires pour la pose.					
<b>Résultat énergétique sur 20 ans</b>					
PRODUCTION	FUSANCE	CO2 ECONOMISÉ			
1 380 750 kWh	66 kWc	122.9 tonnes			
Soit l'équivalent de 180 ANNAÏS PLAYERS					

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 !

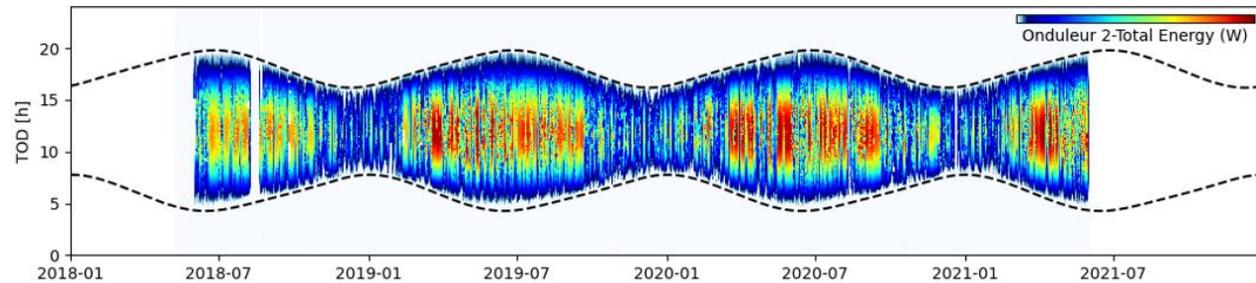
# Applications dans le domaine de l'énergie

- Accompagnement d'utilisateurs des données helioclim pour l'exploitation des données de rayonnement solaire dans leurs applications

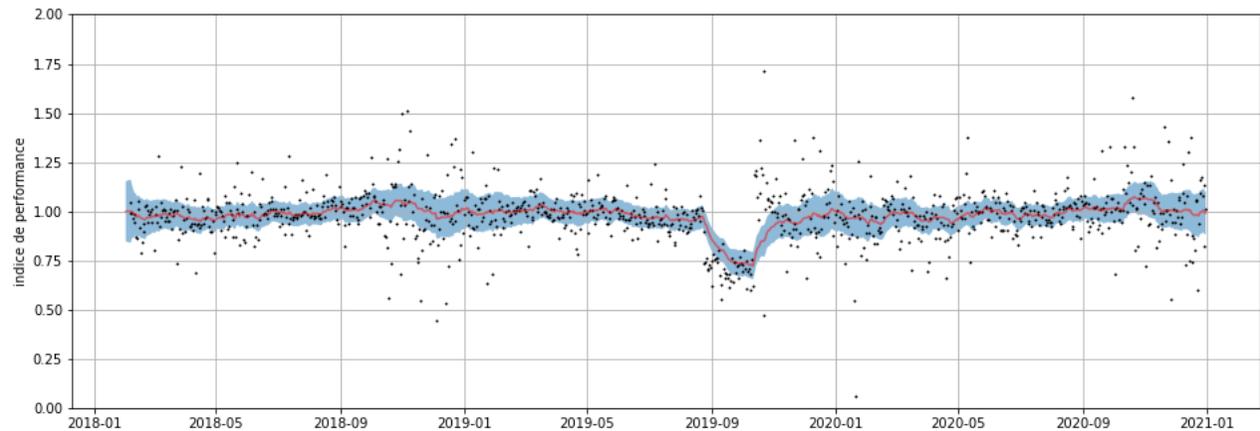
- ✓ Utilisation des données helioclim pour l'analyse de données de production d'installations PV.



Analyse d'ombrage



Vérification de la référence temporelle des données



Analyse de données de productible

# Applications dans le domaine de l'énergie

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

- ✓ Evaluation de la faisabilité technique d'approvisionnement électrique par cellule PV de moteurs de volets



Aussi fiable qu'un volet roulant électrique

Pourquoi choisir une installation solaire ?

- Pas de travaux, pas de dégradation de votre intérieur
- Solution autonome indépendante du réseau électrique

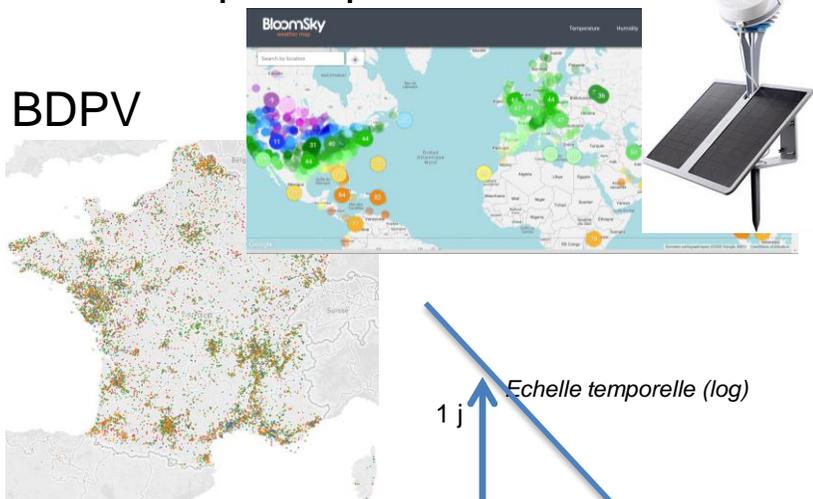


# Perspective: les sciences de la donnée

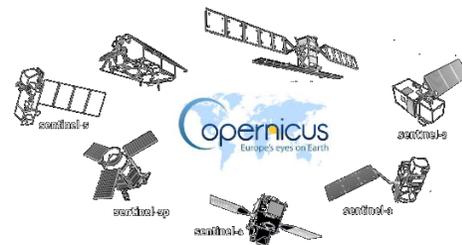
- Conjonction entre des avancées algorithmiques et l'accroissement des données disponibles, multi-dimensionnelles et hétérogène

## Sciences participatives

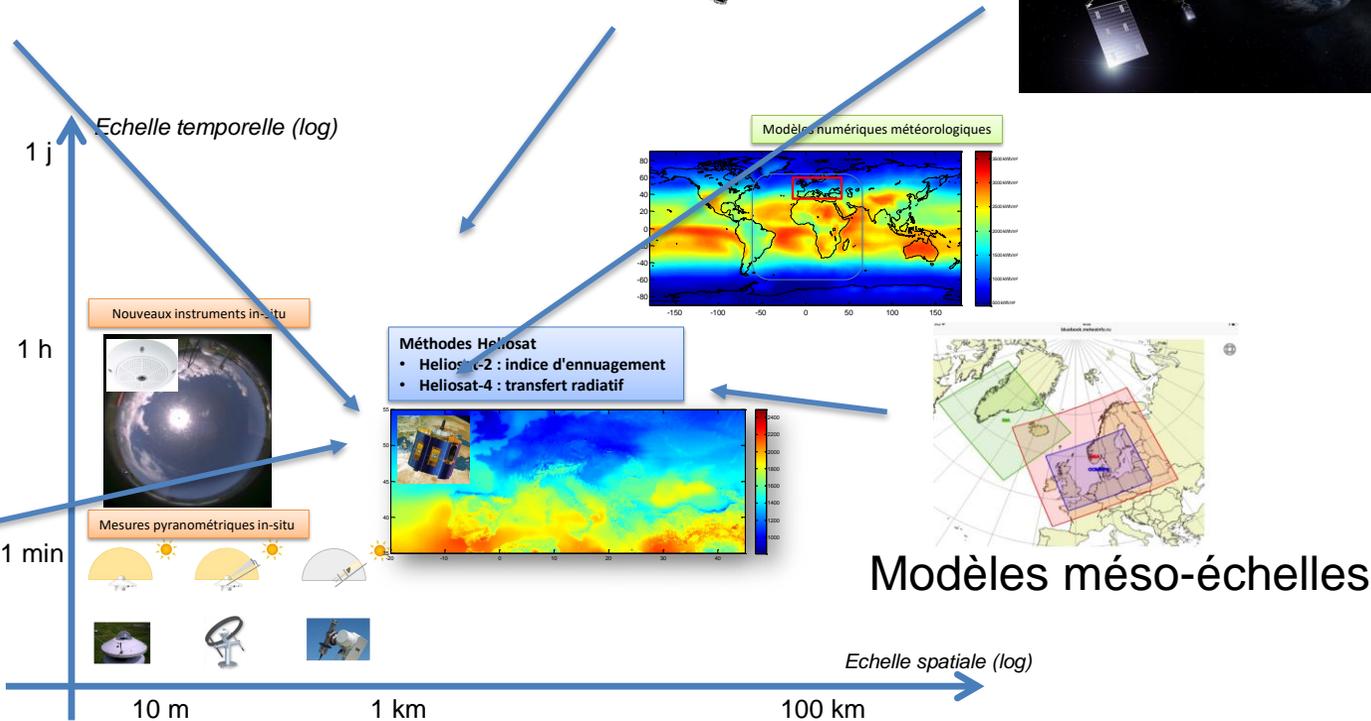
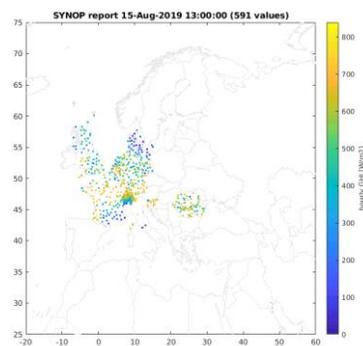
BDPV



## Nouveaux sat. géostationnaires



## Données Synop



**Dr. Yves-Marie SAINT-DRENAN**  
MINES ParisTech, PSL Research University, ARMINES

**Centre Observation, Impacts, Energie**  
*Responsable des activités de recherche sur l'évaluation  
des ressources énergétiques renouvelables*

*yves-marie.saint-drenan@mines-paristech.fr*

T. (+33) 4 93 95 74 12

F. (+33) 4 93 67 89 08

[www.mines-paristech.fr](http://www.mines-paristech.fr)  
[www.oie.mines-paristech.fr](http://www.oie.mines-paristech.fr)

