

Téledétection de la température de surface de la mer et des eaux continentales en Occitanie

Emmanuelle Autret⁽¹⁾, Thierry Tormos⁽²⁾, David Doxaran⁽³⁾

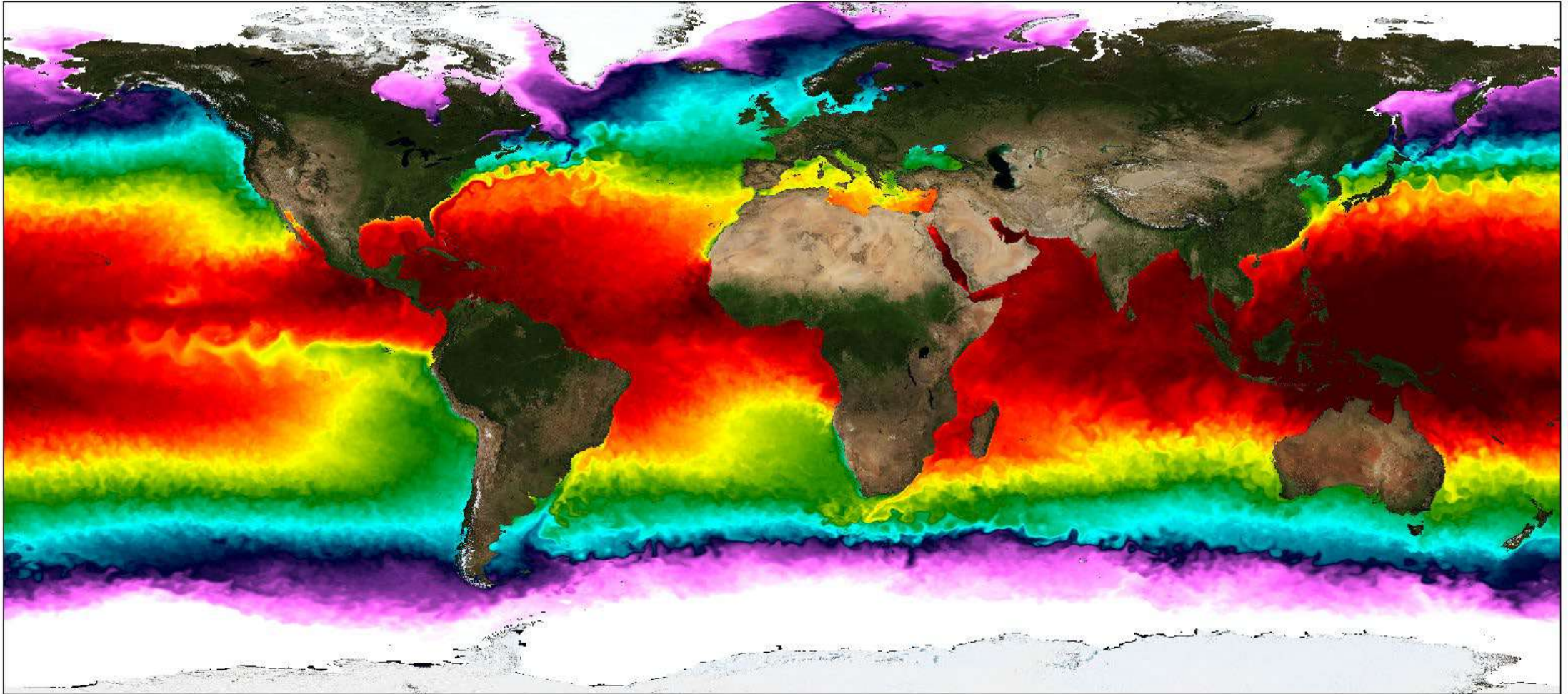
(1) Ifremer, LOPS, Plouzané

(2) ECLA, OFB, Aix-en-Provence

(3) LOV, Villefranche-sur-Mer

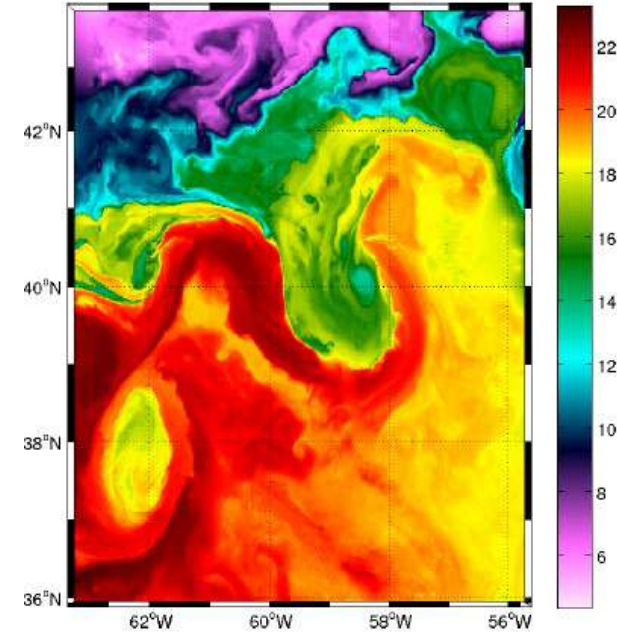
Introduction – A quoi ressemble la SST ?

Depuis 40 ans, grâce à plusieurs missions de satellites d'observation de la Terre, la SST peut être cartographiée quotidiennement à l'échelle globale .



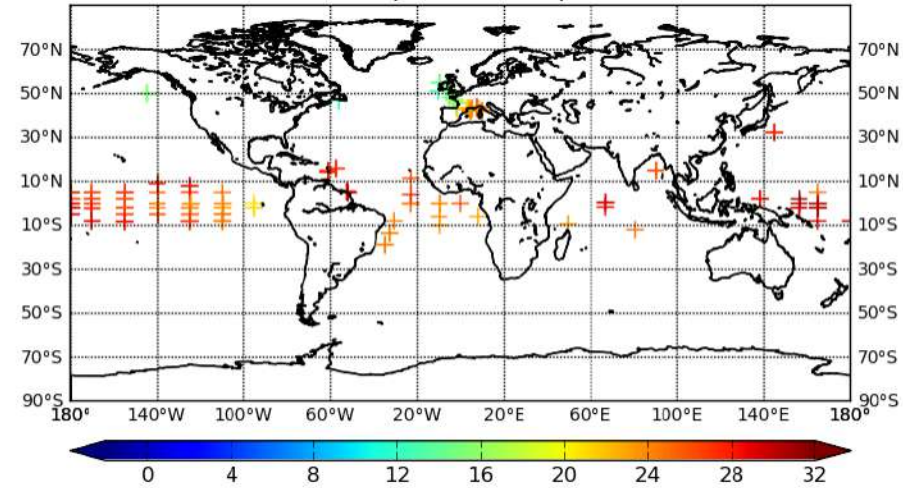
Introduction – Pourquoi mesurer la SST ?

- La SST est une variable essentielle climatique (ECV)
- Joue un rôle important dans les échanges d'énergie, de gaz, de quantité de mouvement entre l'océan et l'atmosphère
- SST à l'interface océan-atmosphère a un impact sociétal important : les grands gyres océaniques et les cellules de circulation atmosphérique influencent le temps et le climat, les systèmes météorologiques et les tempêtes violentes, ainsi que les phénomènes à l'échelle locale, génération de brises de mer, nuages convectifs
- Les champs de SST sont utilisés comme conditions aux limites pour les modèles océaniques, météorologiques et de prévisions saisonnières, ainsi que pour l'évaluation des écosystèmes, le soutien à la pêche, la qualité de l'eau, etc

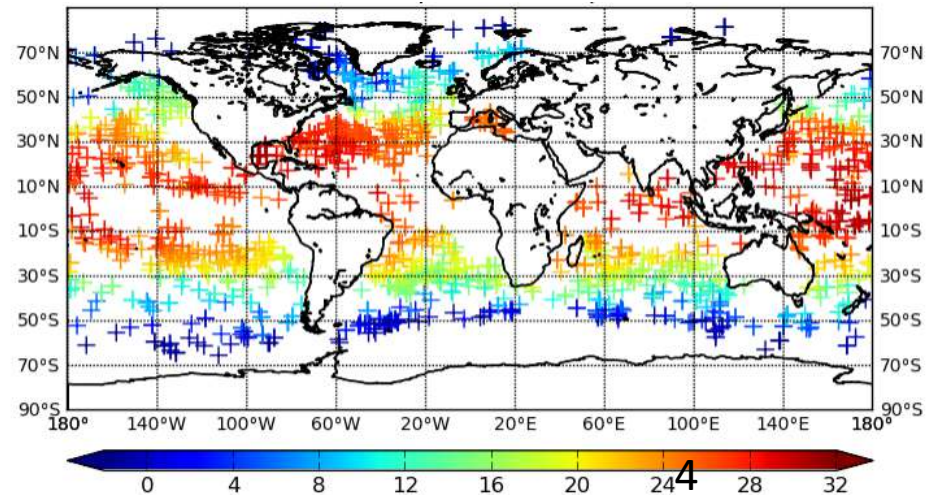


Introduction – Comment mesurer la SST ?

- In-situ : Since the 1980's



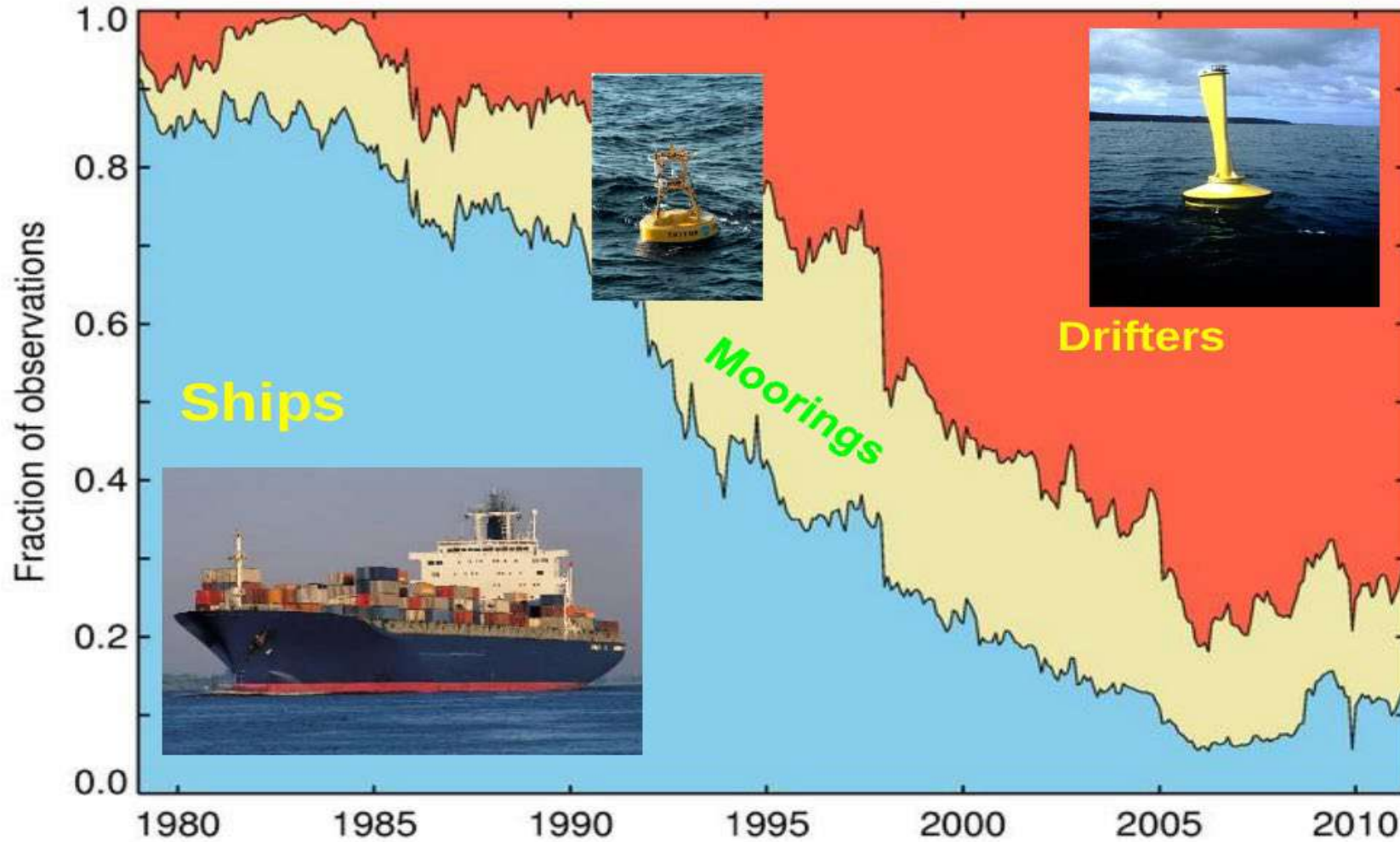
Location and SST
from moored buoys
(10/09/2016)



Location and SST
from drifting buoys
(10/09/2016)

Introduction – Comment mesurer la SST ?

- In-situ : Since the 1980's



Introduction – Comment mesurer la SST ?

- In-situ :



Saildrone :
Jia et al., 2022; Vazquez-Cuervo et al., 2019; Vazquez-Cuervo et al., 2020 Koutantou et al., 2023



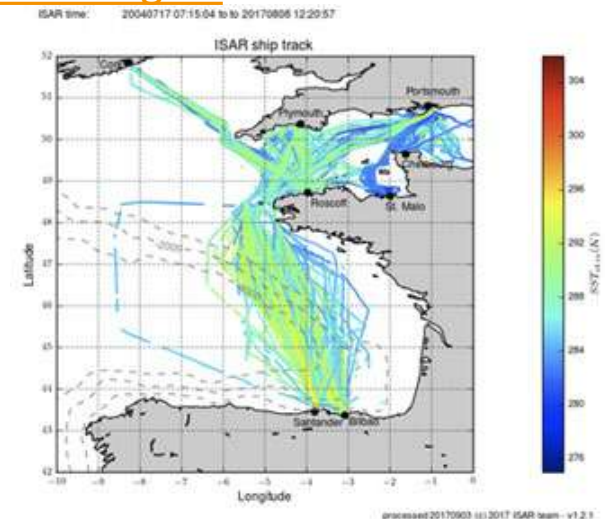
Citizen scientists :
loggers attached to the surfboard leash or Smartfin
(*[Vanhellemont et al., 2022](#); [Brewin et al., 2020a](#); [Bresnahan et al., 2017](#)*)



Shipborne radiometer (ISAR), deployed on passenger vessels

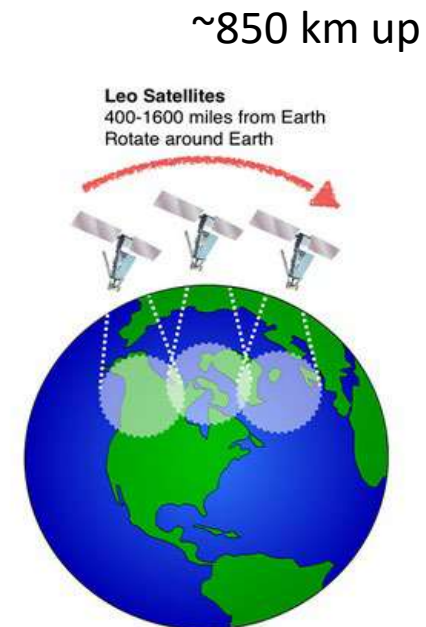
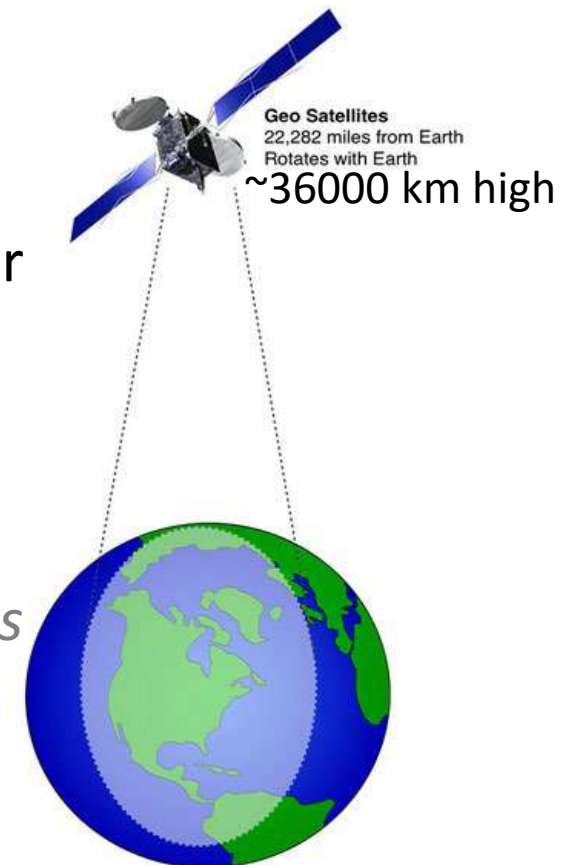
<https://www.ships4sst.org>

<https://www.isar.org.uk>



Introduction – Comment mesurer la SST ?

- From space : since the end of the 1970's (first images in the 60's), with **radiometers** onboard satellites
- 2 main types of Earth orbit :
 - Low Earth orbit (LEO) polar Sun synchronous or drifting (*Sun- synchronous overfly approximately the same location of the Earth, including high latitudes, at approximately the same time twice/day*)
 - Geostationary Earth orbit (*provides continuous view of about 1/3 of the Earth's surface centered on the stationary sub-point*)

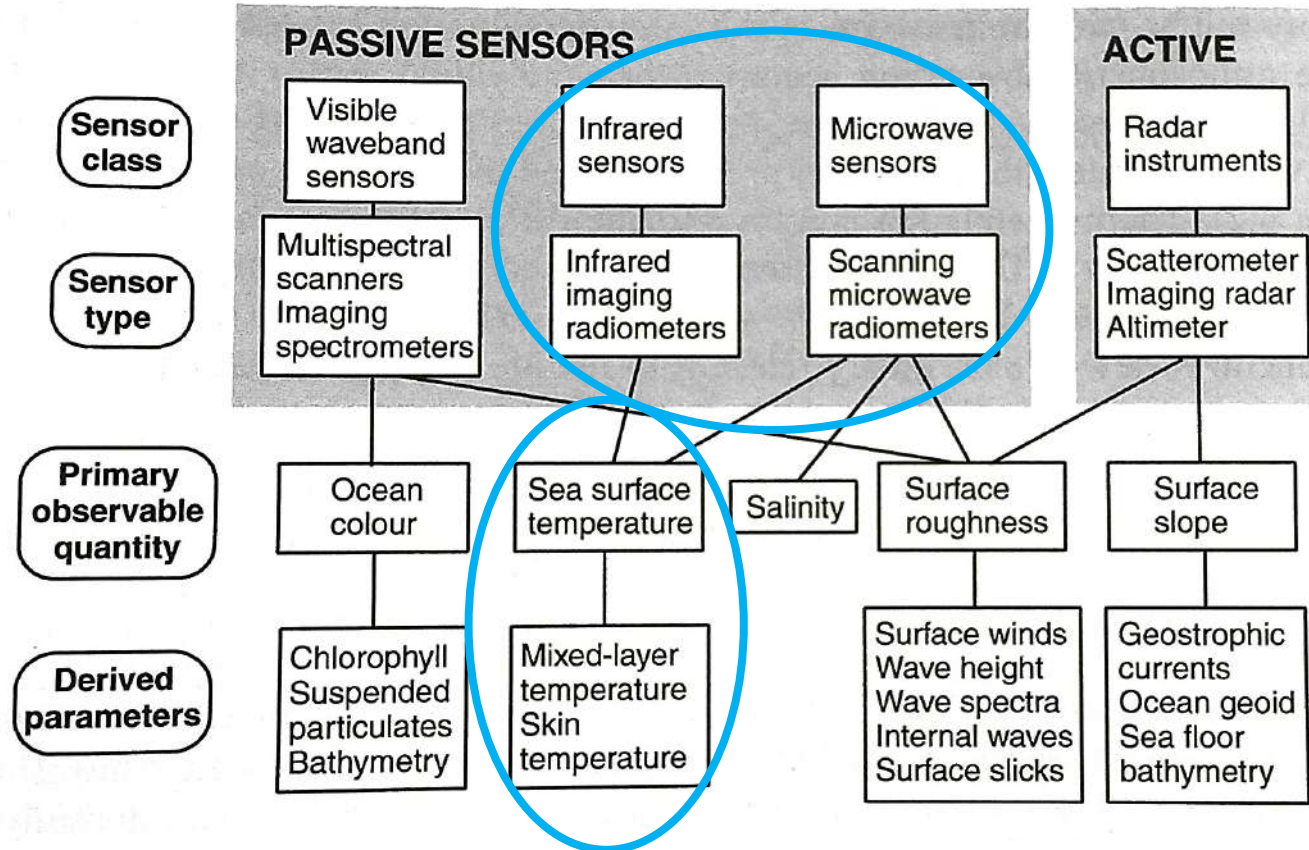


Measuring SST from space

- Principle
 - based on the measurement of electromagnetic radiation (e.m.r.) over a wide range of wavelengths, and on its propagation properties in the atmosphere and interactions with the ocean surface
 - energy received by the sensor from the surface is either direct (emitted by the surface), reflected or scattered
 - The nature of the interaction between e.m.r. and the atmosphere and ocean surface depends on the wavelength
 - The parts of the e.m.r. spectrum useful for ocean observation are those for which the atmosphere is not opaque, and the wavelengths used differ according to the surface properties we wish to access.

Measuring SST from space

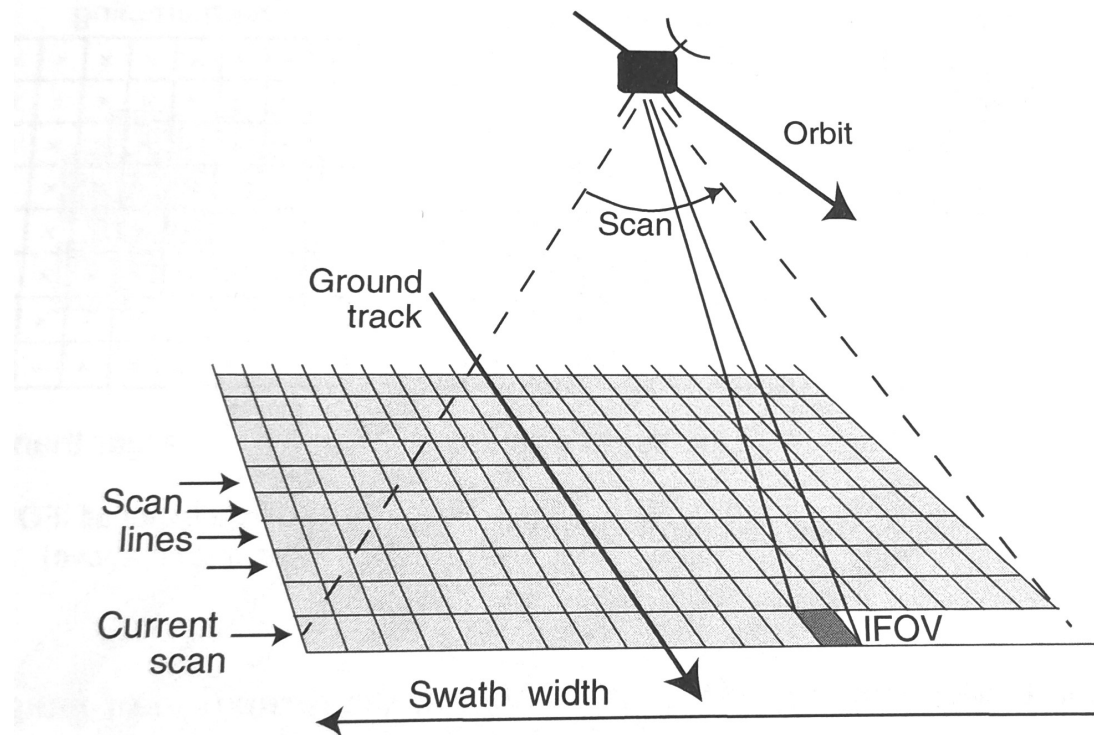
- Principle : **radiometry** (passive sensors)



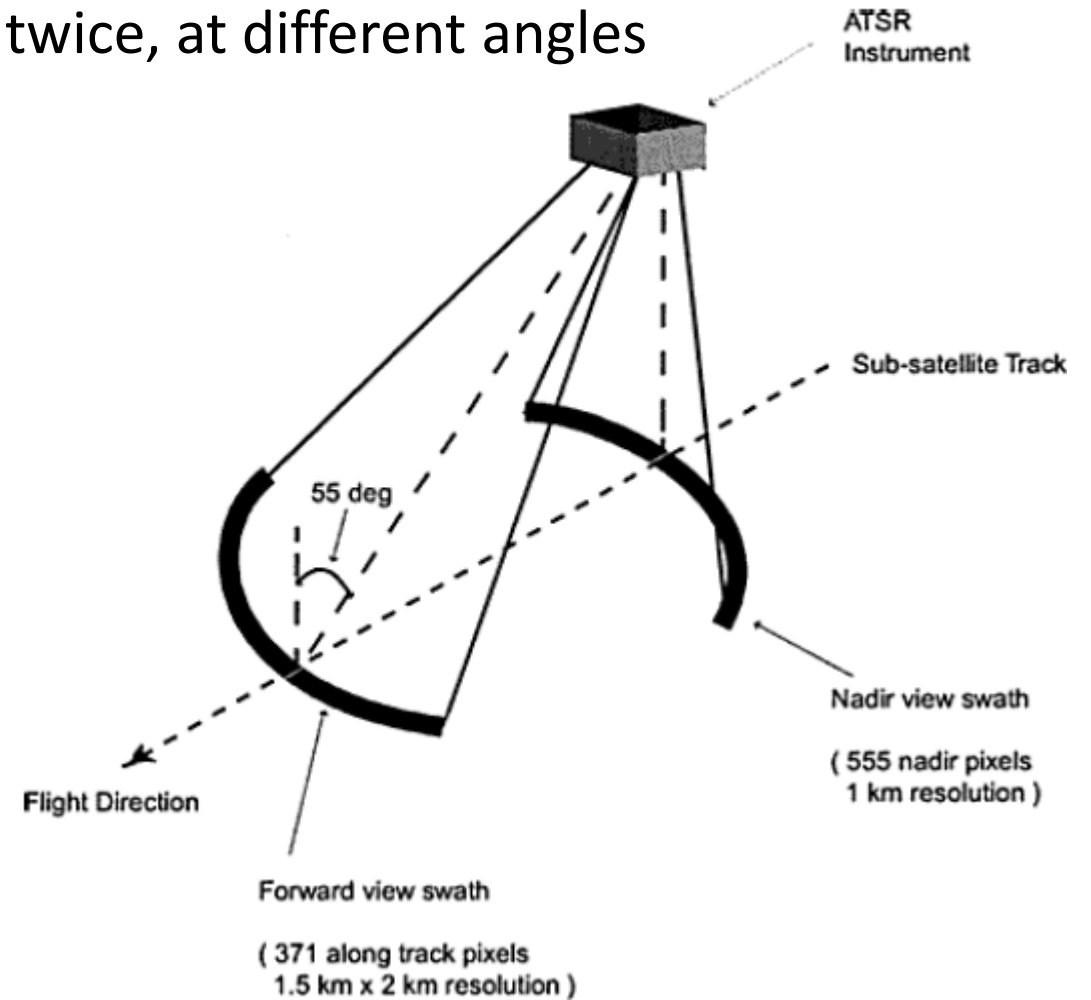
Schematic illustrating the different remote sensing methods and classes of sensors used in satellite oceanography

Measuring SST from space – Creating images

- Ex 1 : Scanning (usually by a rotating mirror) either in one direction or backwards and forwards across the swath



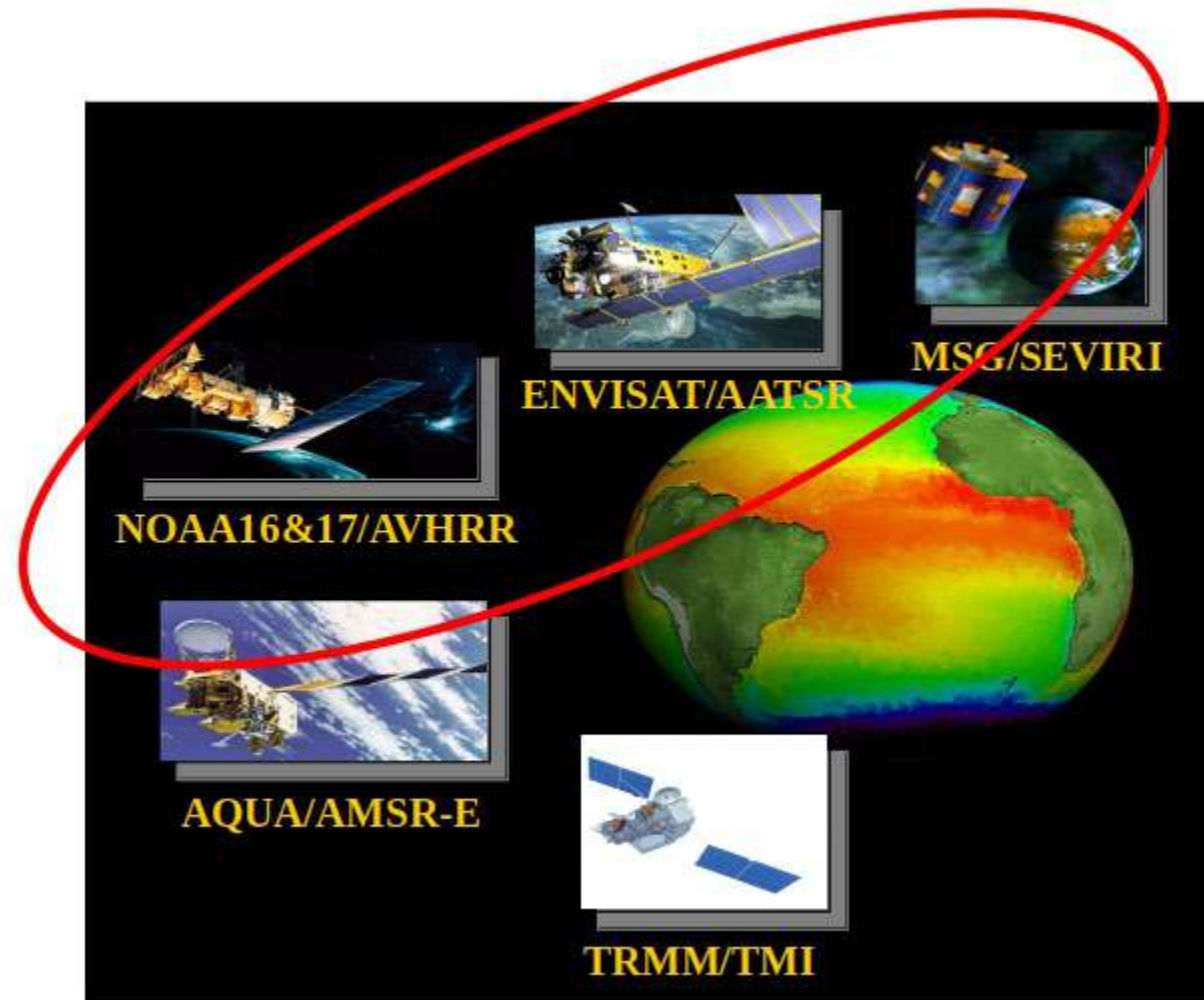
- Ex 2: the same scene observed twice, at different angles



Measuring SST from space

Radiomètres Infra-Rouge (IR) :

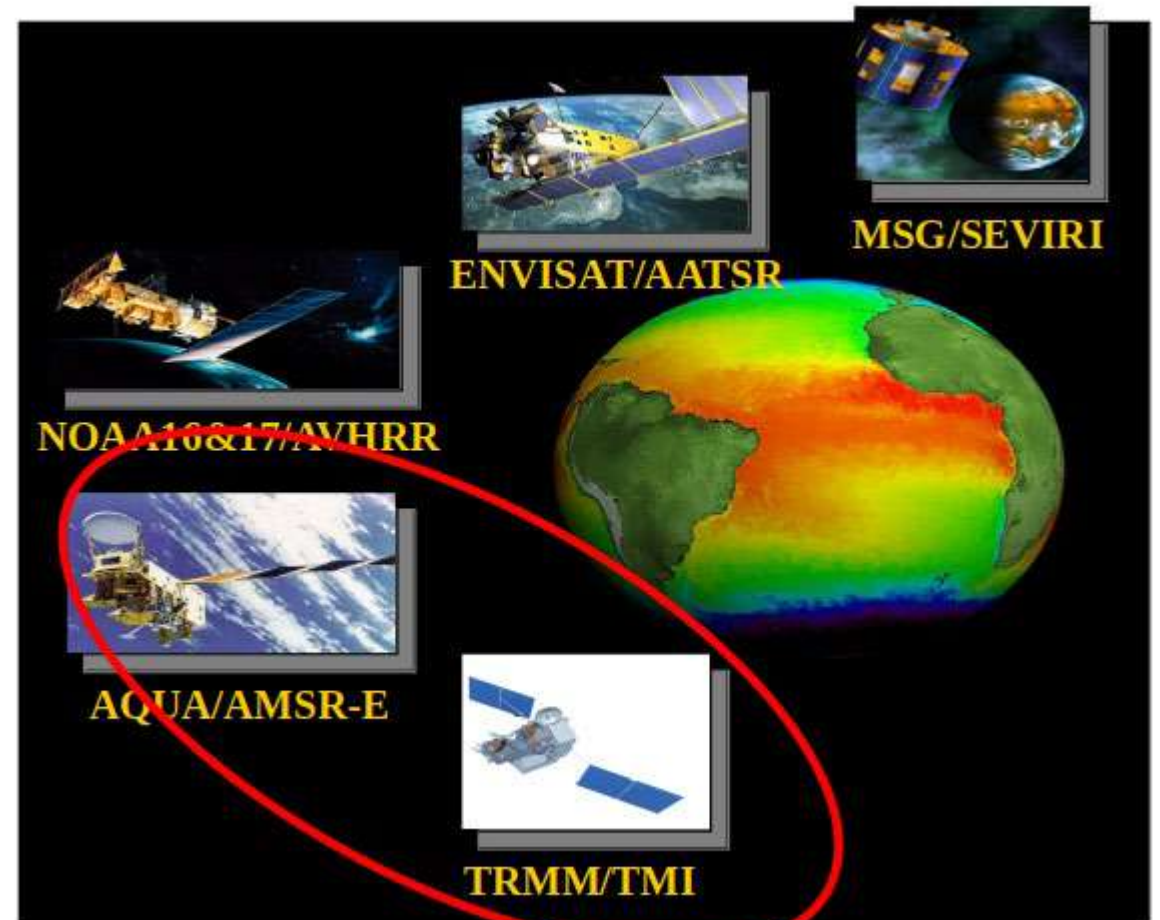
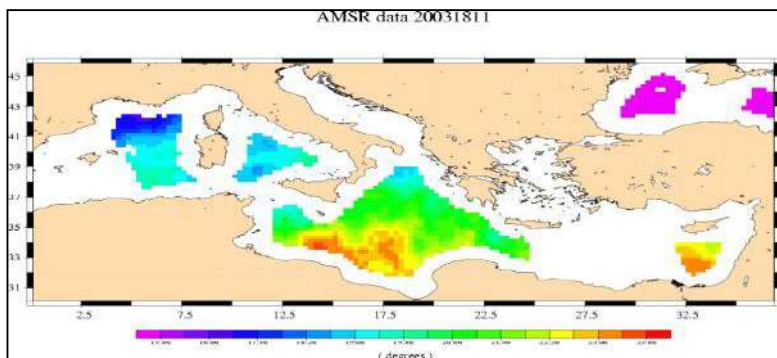
- Satellites en orbite polaire ou géostationnaires
- Skin SST (10-20 μm)
- **Pb des nuages (non détection ou « sur-masquage »), contamination par aérosols, ...**
- Affecté par cycle diurne (rechauffement)
- Haute résolution (5km > 1km), jusqu'à 100m et + (Landsat, ECOSTRESS, ASTER, et futures missions TRISHNA, LSTM, SBG)



Measuring SST from space

Radiomètres micro-onde (MW) :

- Satellites en orbite polaire
- Subskin SST (~ 1 mm)
- Relation entre SST et rayonnement reçu plus complexe
- Affecté par cycle diurne (rechauffement)
- **Basse résolution (25-50 km), pas de données à moins 75-100 km des côtes**

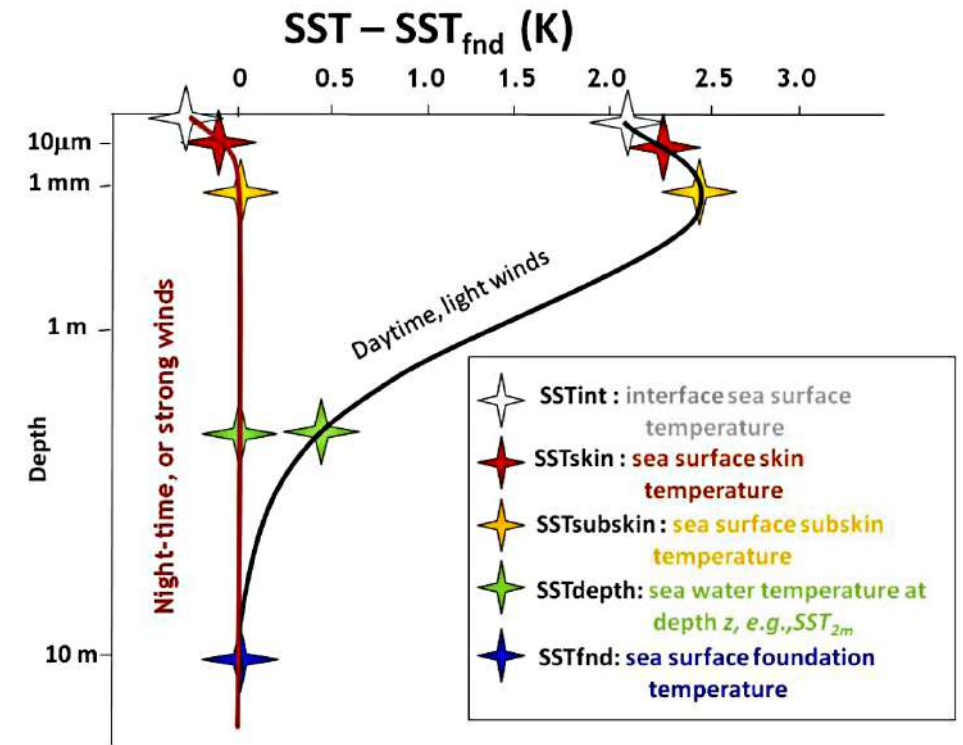


Measuring SST from space

- What is the SST measured by the radiometers ?
- SST : temperature in the first 10 meters ...
- Several definitions ...
- IR measurements : first μm (skin SST)
- MW measurements : first mm (sub-skin SST)
- Drifting buoys : 40 cm
- Moored buoys : 1 to 10 m



- High variability of SST (space and time) :
night-time obs considered as a reference



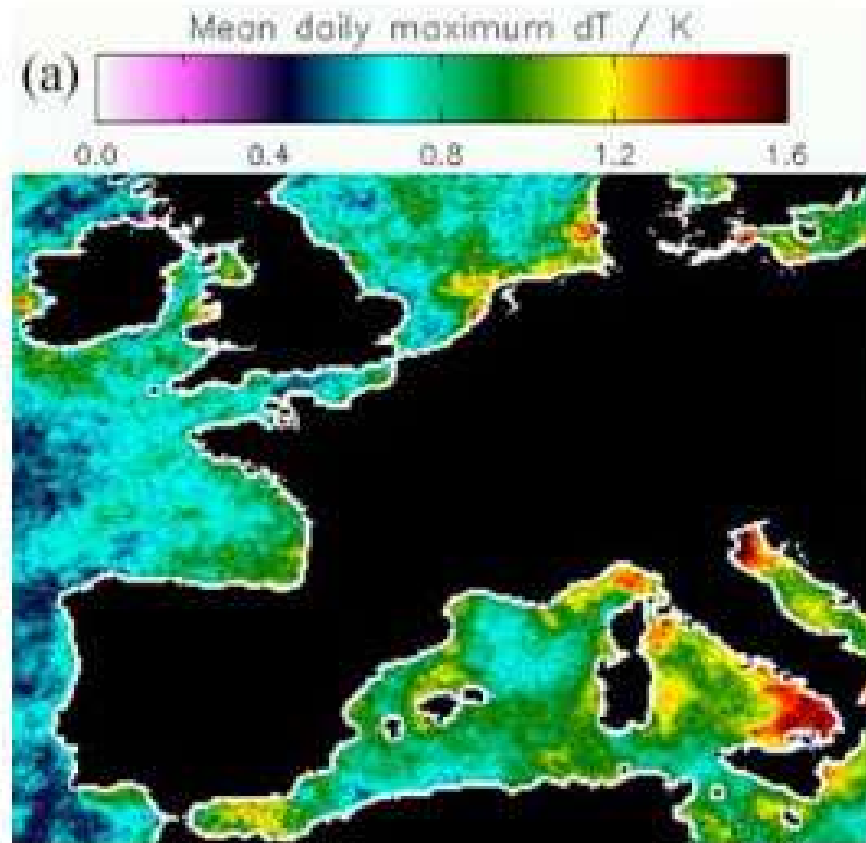
SST definitions, from [Minnett and Kaiser-Weiss \(2012\)](#)

Measuring SST from space

- What is the SST measured by the radiometers ?



High temporal variability : Example of diurnal warming



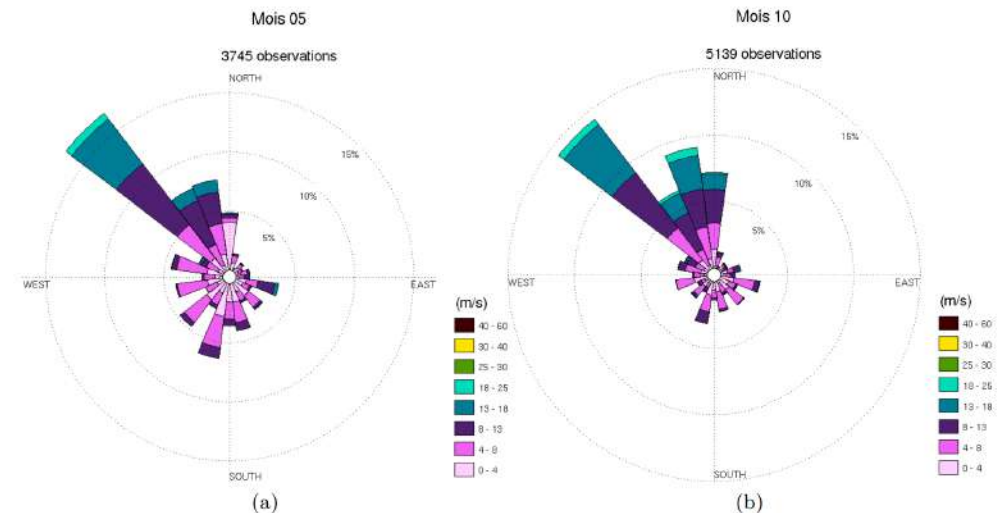
Mean of the daily maximum of the diurnal cycle in sea surface temperature Small scale (40 km) extreme diurnal warming events (peak $>4 K$) are routinely observable in SEVIRI SSTs in the Mediterranean and European shelf seas. Many cases of peak amplitudes of $dSST >6 K$ have been observed (from April to Sept. 2006). From Merchant et al., 2007.

SST sur le Golfe du Lion

- Golfe du Lion influencé par plusieurs facteurs:
 - Circulation Générale : courant liguro-provençal
 - Apports fluviaux (Rhône)
 - Vents : Mistral et Tramontane de secteur Nord-Nord Ouest (et plus rarement vent de Sud-Sud Est) -> Upwellings/downwellings



Source M. San Baudelio, stage 2022 Ifremer/LOPS



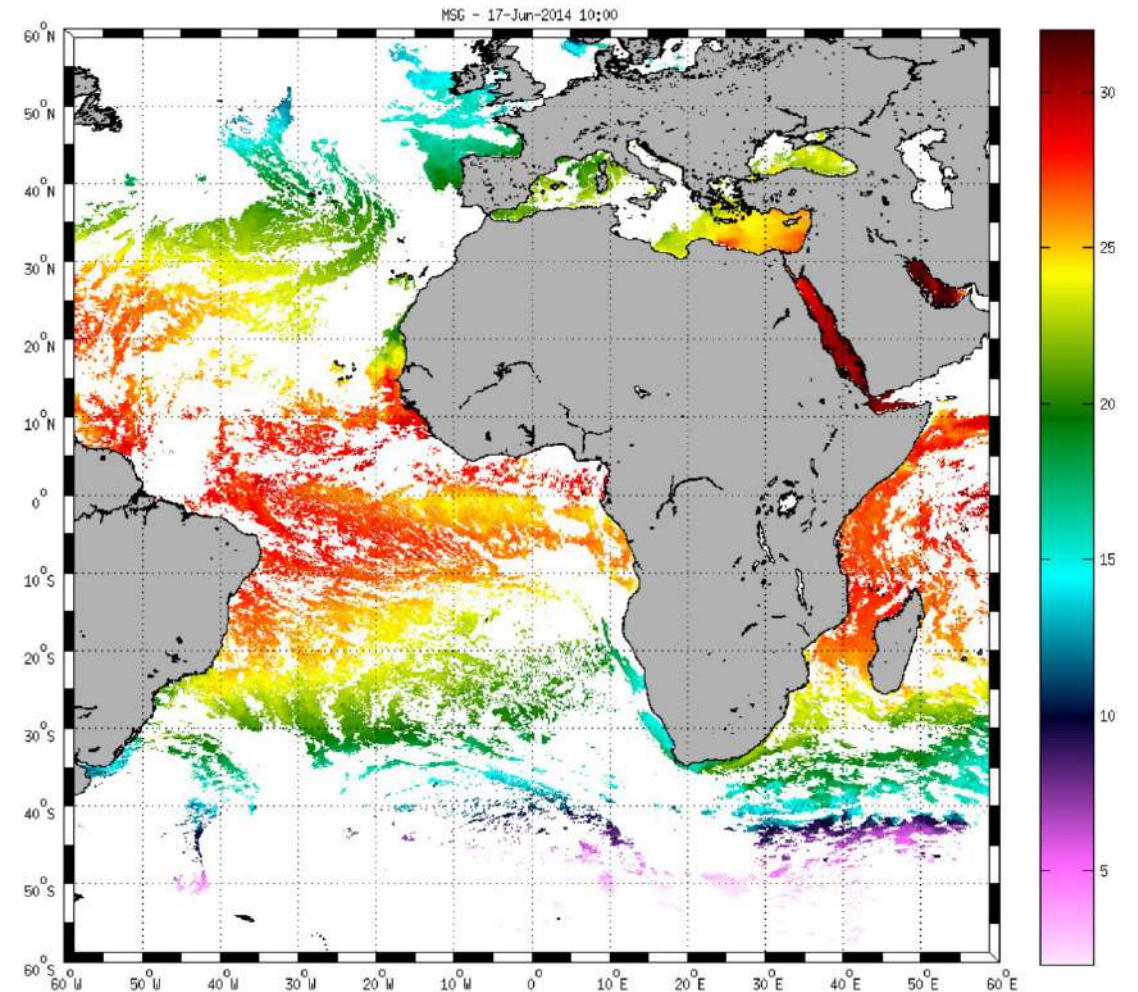
Rose des vents représentant les distributions de direction et vitesse du vent en mai (a) et Octobre (b), à partir des données de la bouée Golfe du Lion (Hymex). Source : C. Talierco, stage 2015 Ifremer/LOPS

Observations de SST sur le Golfe du Lion

- Observations du géostionnaire (MSG)
- Résolution spatiale : **5km**
- Haute résolution temporelle : 15 min

⇒ Accès à la variabilité haute fréquence

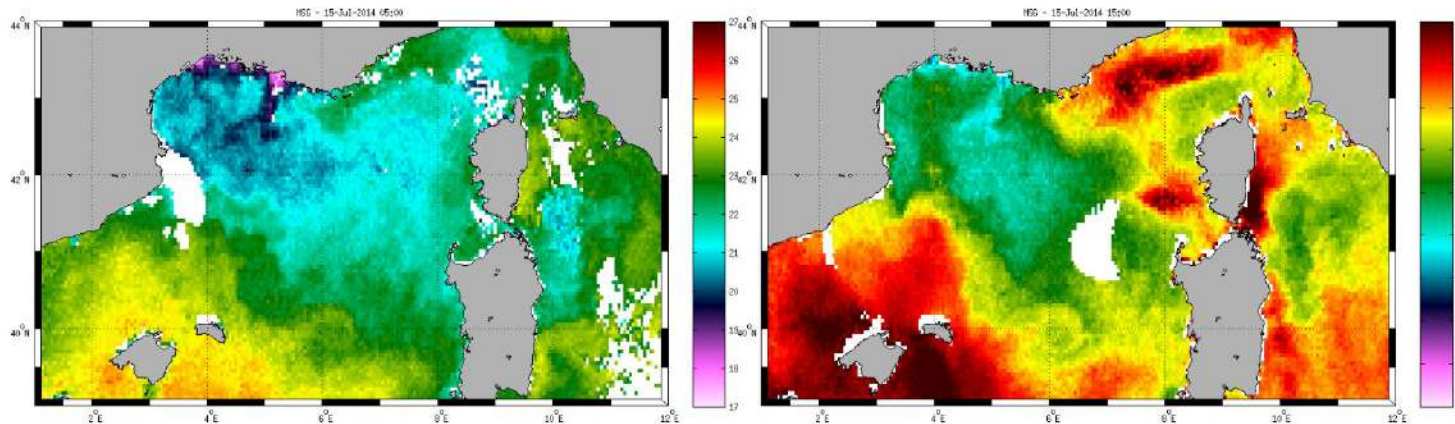
⇒ Inconvenient : faible resolution spatiale



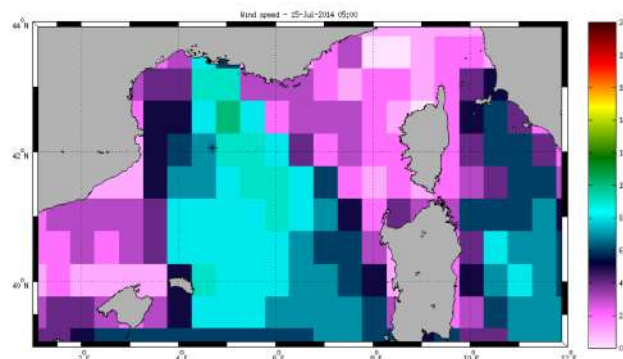
Observations de SST sur le Golfe du Lion

- Observations du géostionnaire (MSG)

Exemple : Cycle diurne



Haute resolution temporelle : accès au cycle diurne. Exemple le 15 juillet 2014 à 5h et à 15h dans une situation de vent faible. Source figure: C. Talierco, stage Ifremer/LOPS 2015

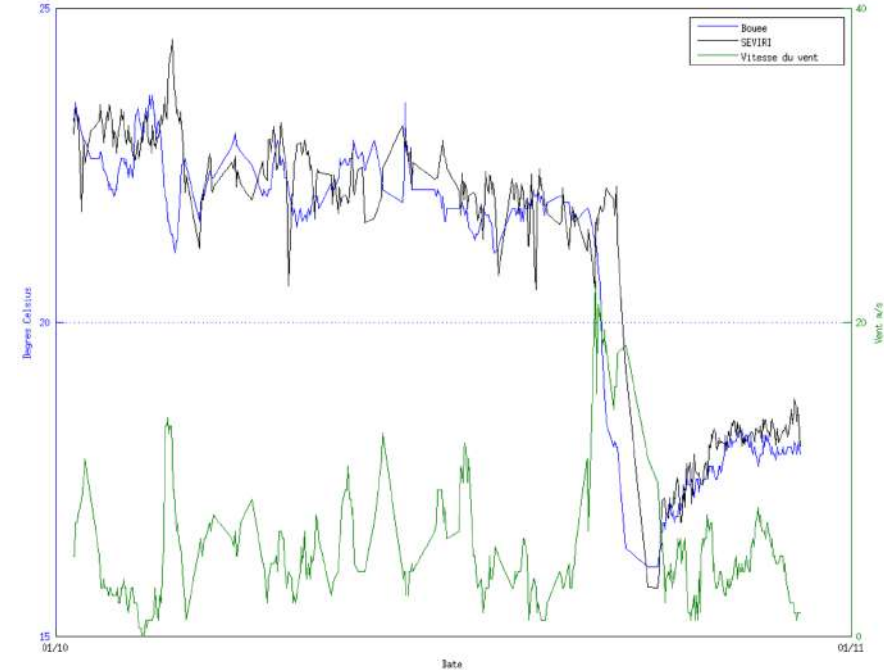
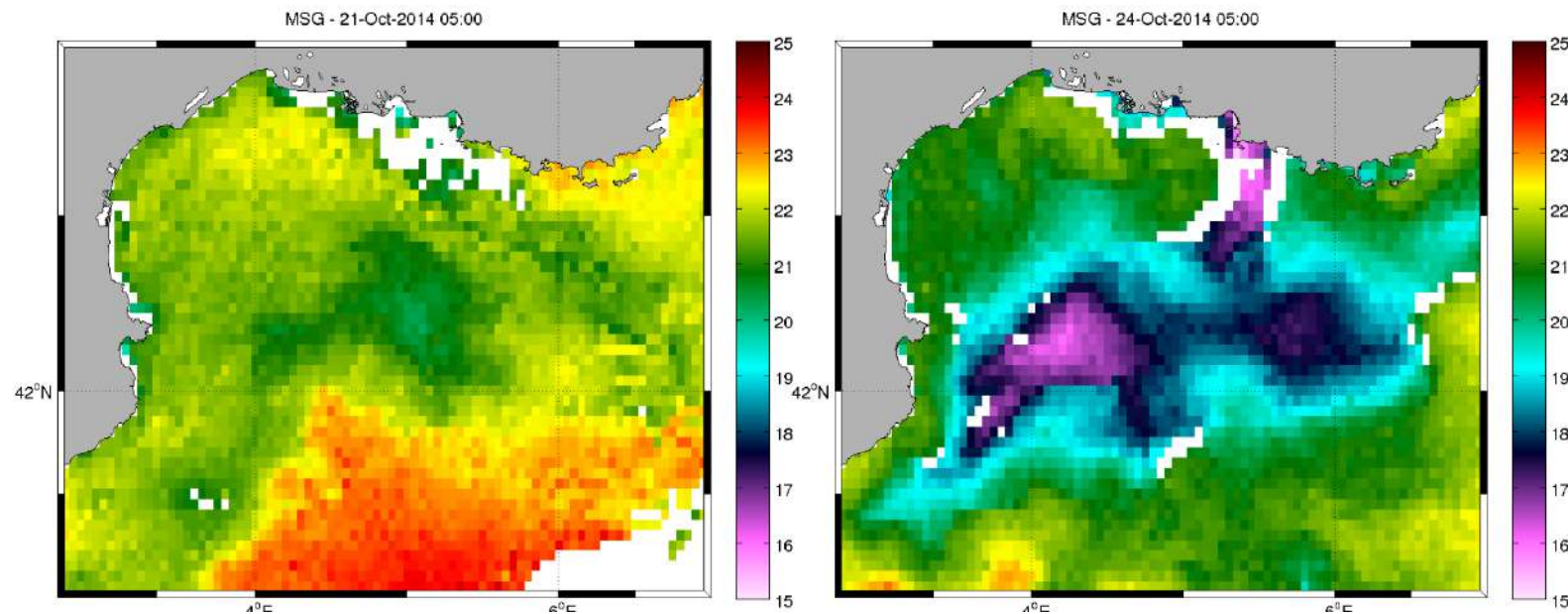


Vitesse du vent du modèle ECMWF le 15 juillet 2014. Source figure: C. Talierco, stage Ifremer/LOPS 2015

Observations de SST sur le Golfe du Lion

- Observations du géostionnaire (MSG)

Exemple : variation journalière de SST. La SST passe de 23°C à 16°C en moins de 3 jours en réponse à un événement de vent fort.

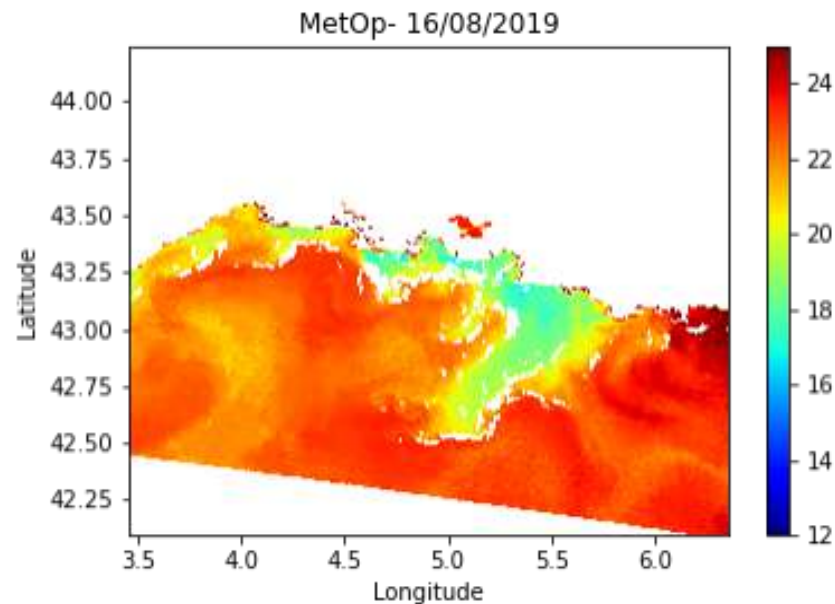
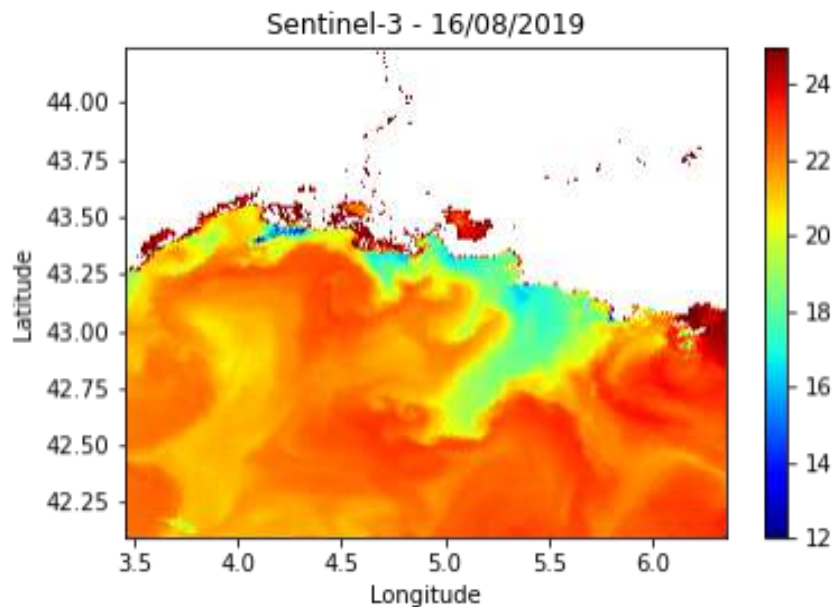


Haute resolution temporelle : Température de surface de SEVIRI et de la bouée Golfe du Lion (Hymex) superposée avec la vitesse du vent pour le mois d'octobre 2014. Source figure: C. Talierco, stage Ifremer/LOPS 2015

SST le 21 octobre à 5h et le 24 oct à 5h. Source figure: C. Talierco, stage Ifremer/LOPS 2015

Observations de SST sur le Golfe du Lion

- Observations des satellites défilants (AQUA, METOP, Sentinel-3, NOAAs)
- Résolution spatiale : **1km**
- Résolution temporelle : 1 jour



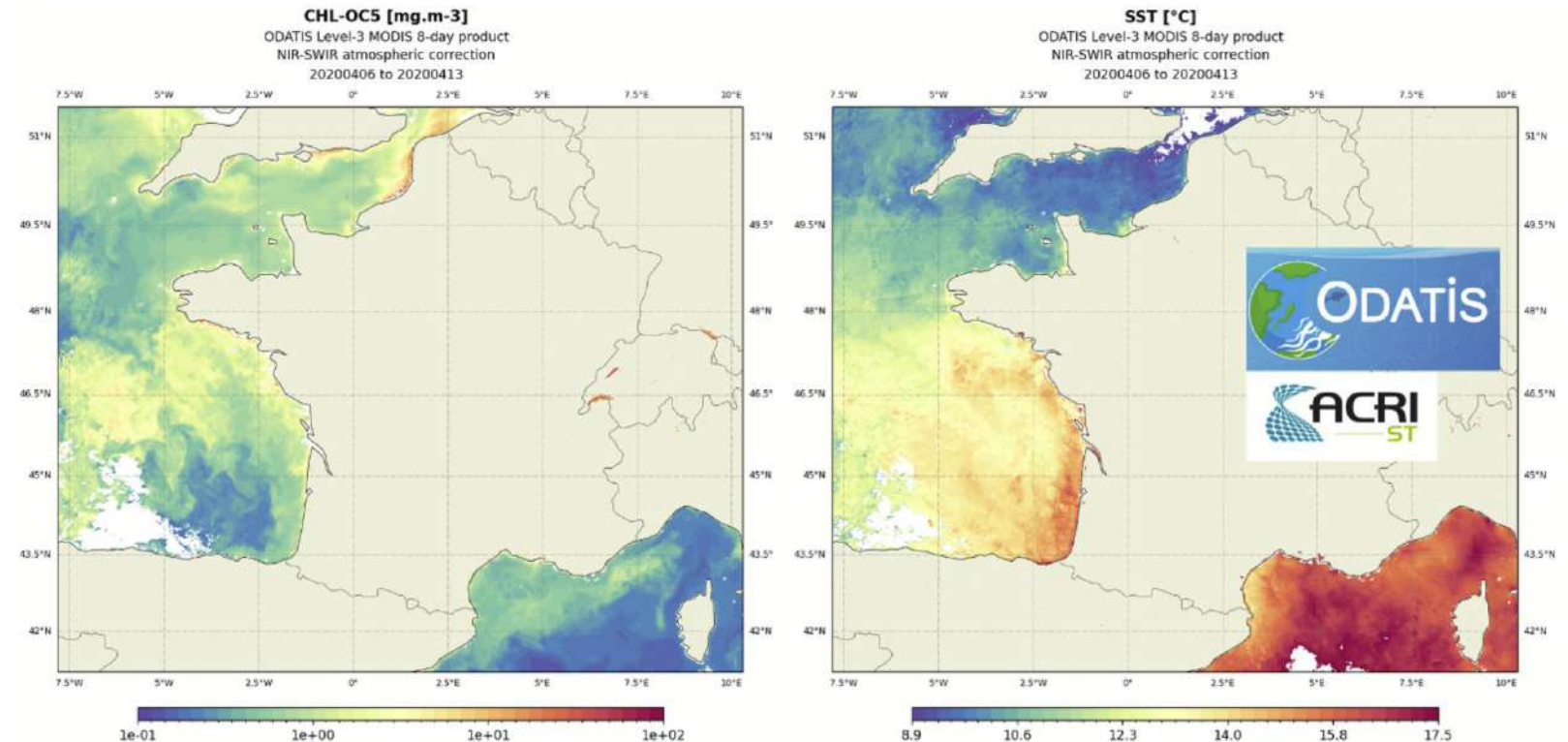
Vitesse du vent du modèle ECMWF le 15 juillet 2014. Source figure: M. San Baudelio, stage Ifremer/LOPS 2022

Observations de SST sur le Golfe du Lion

- Observations des satellites défilants (AQUA, METOP, Sentinel-3, NOAAs)

Exemple : Base de données MODIS-SST (1km interpolé à 300m)

SST, Réflectance, IOPs, Turbidité, MES, Chla, CDOM, POC, DOC
Algorithmes développés en France et validés (e.g., stations SOMLIT)



Exemple de moyennes sur 8 jours. Les lagunes côtières (E.G. étangs de Berre et de Thau) également accessibles

Observations de SST sur le Golfe du Lion

- Observations des satellites défilants (AQUA, METOP, Sentinel-3, NOAAs)

Exemple : Base de données MODIS-SST (1km interpolé à 300m)

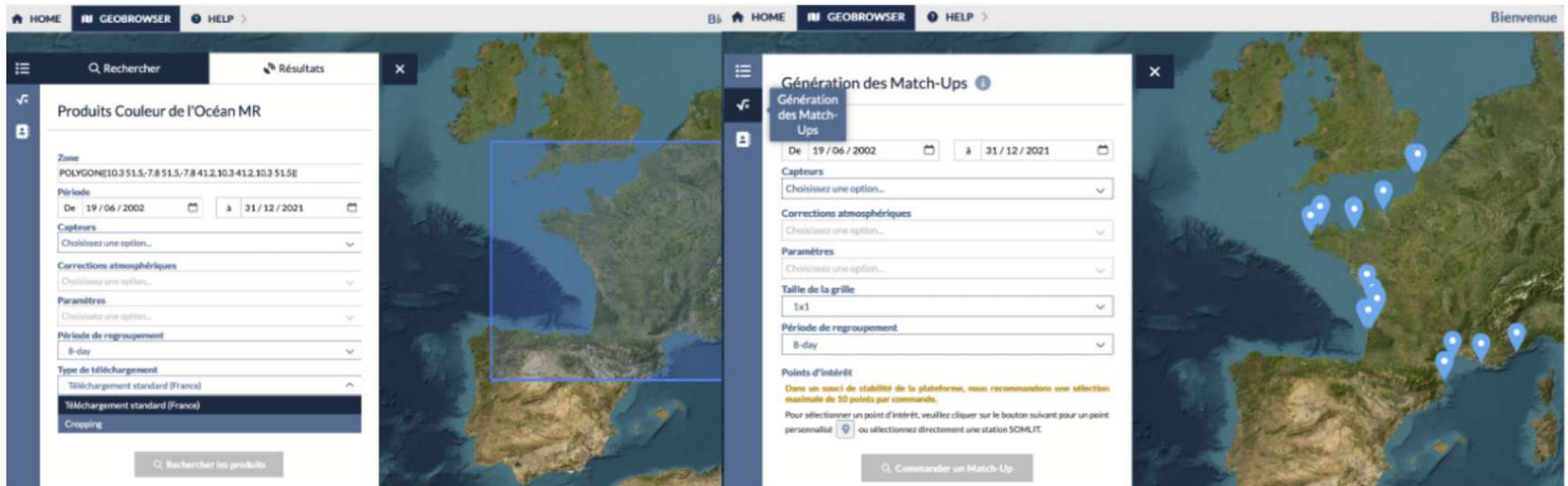
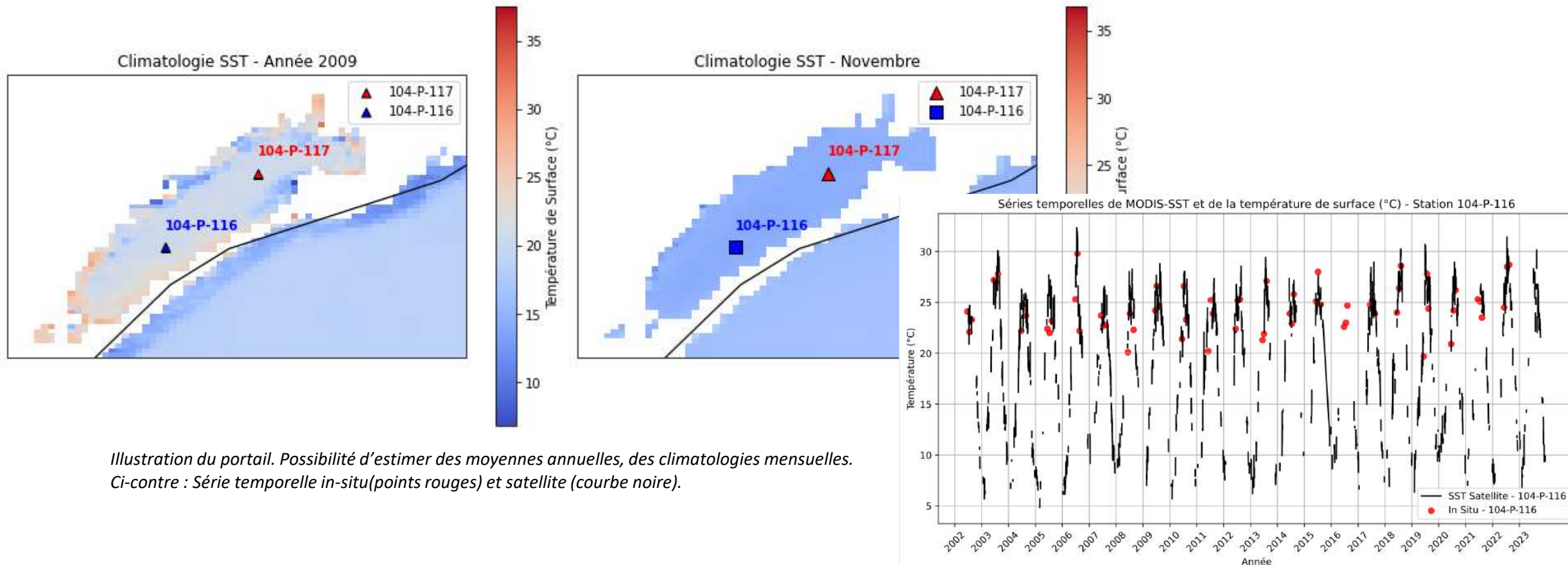


Illustration du portail. Les observations des stations côtières sont également disponibles.

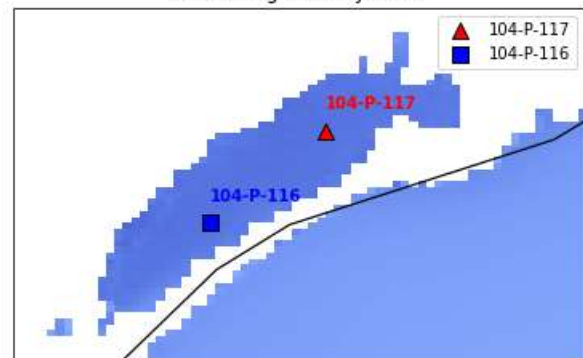
Observations de SST sur le Golfe du Lion

- Observations des satellites défilants (AQUA, METOP, Sentinel-3, NOAAs)

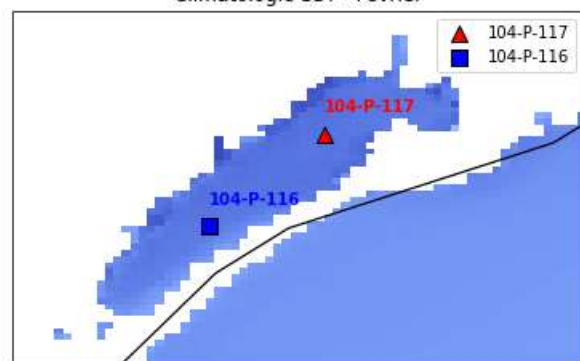
Exemple : Base de données MODIS-SST (1km interpolé à 300m)



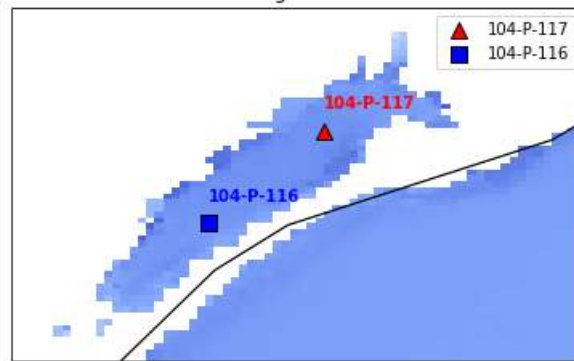
Climatologie SST - Janvier



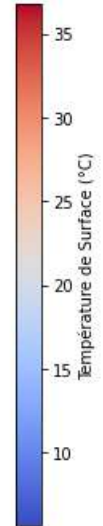
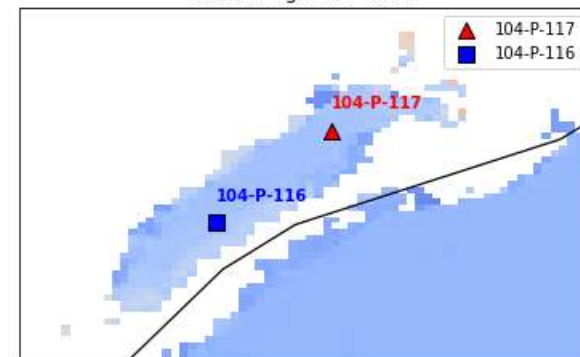
Climatologie SST - Février



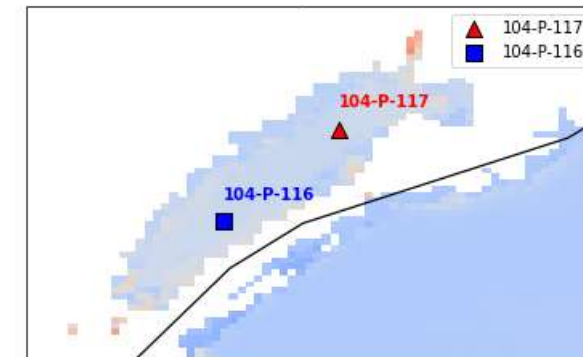
Climatologie SST - Mars



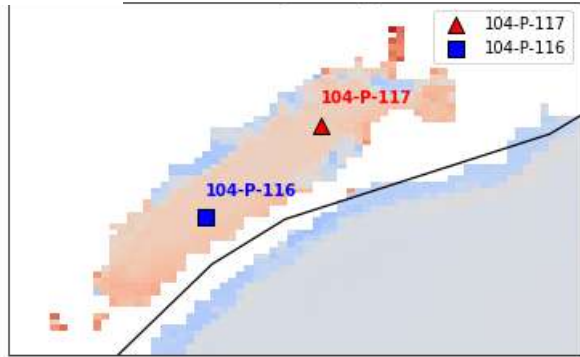
Climatologie SST - Avril



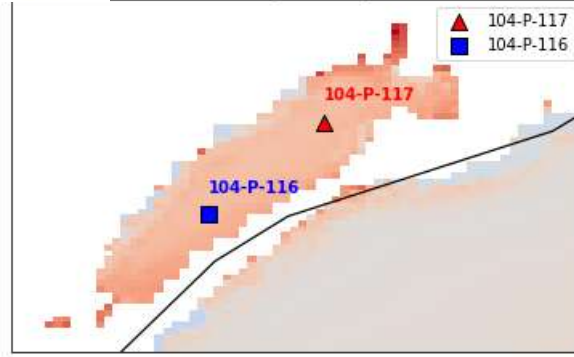
104-P-117
104-P-116



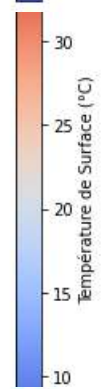
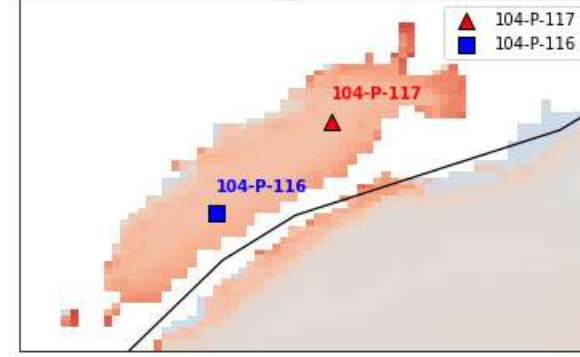
104-P-117
104-P-116



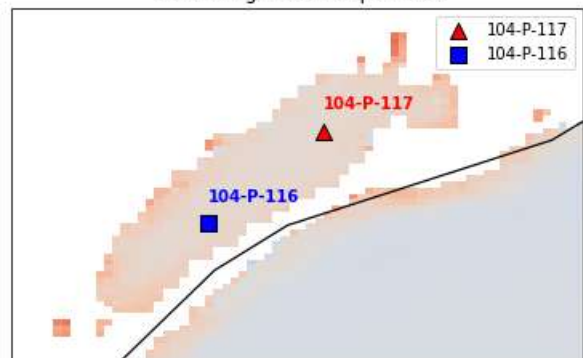
104-P-117
104-P-116



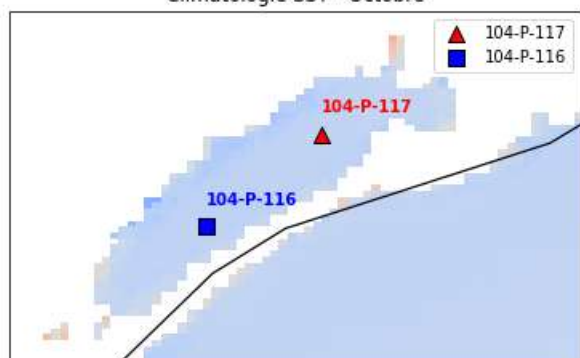
104-P-117
104-P-116



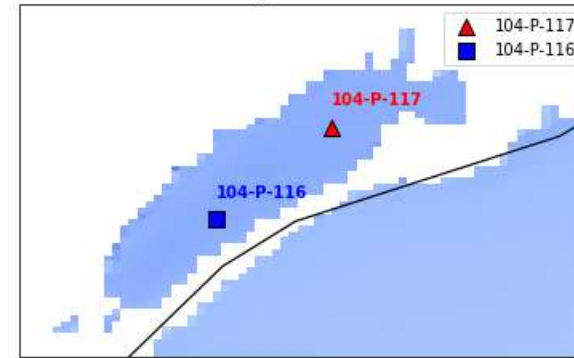
Climatologie SST - Septembre



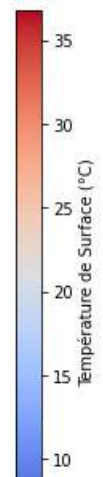
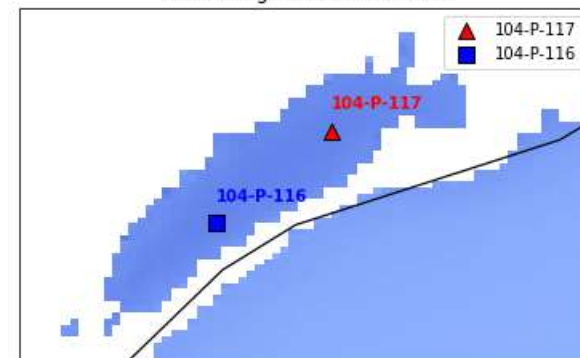
Climatologie SST - Octobre



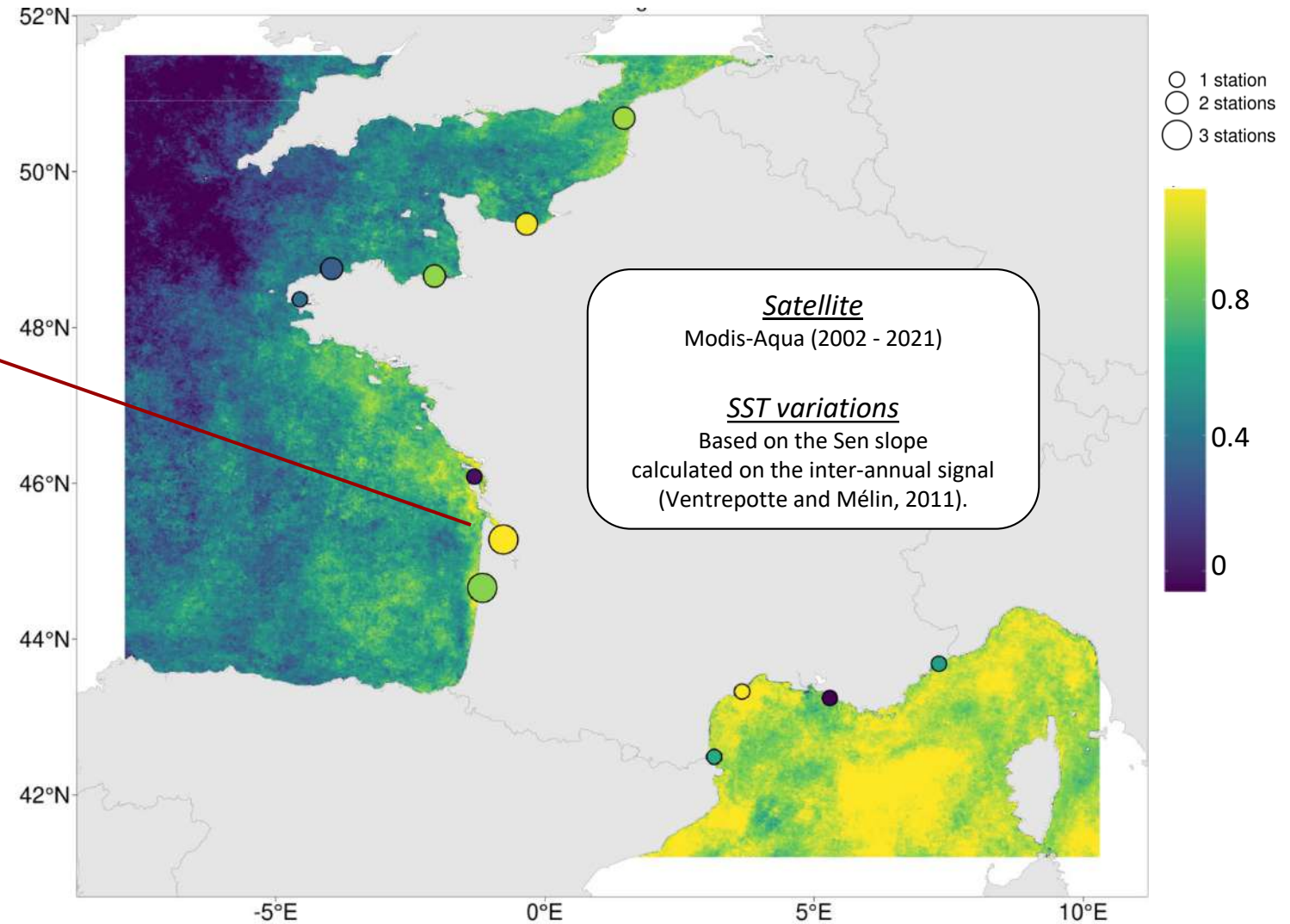
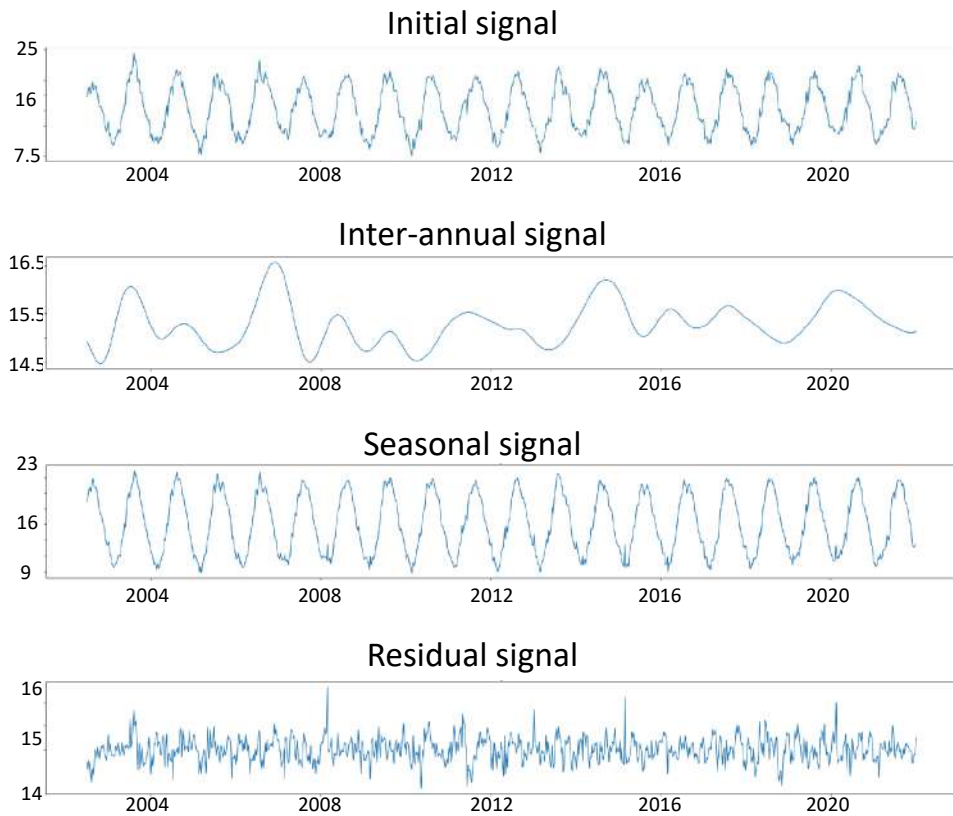
Climatologie SST - Novembre



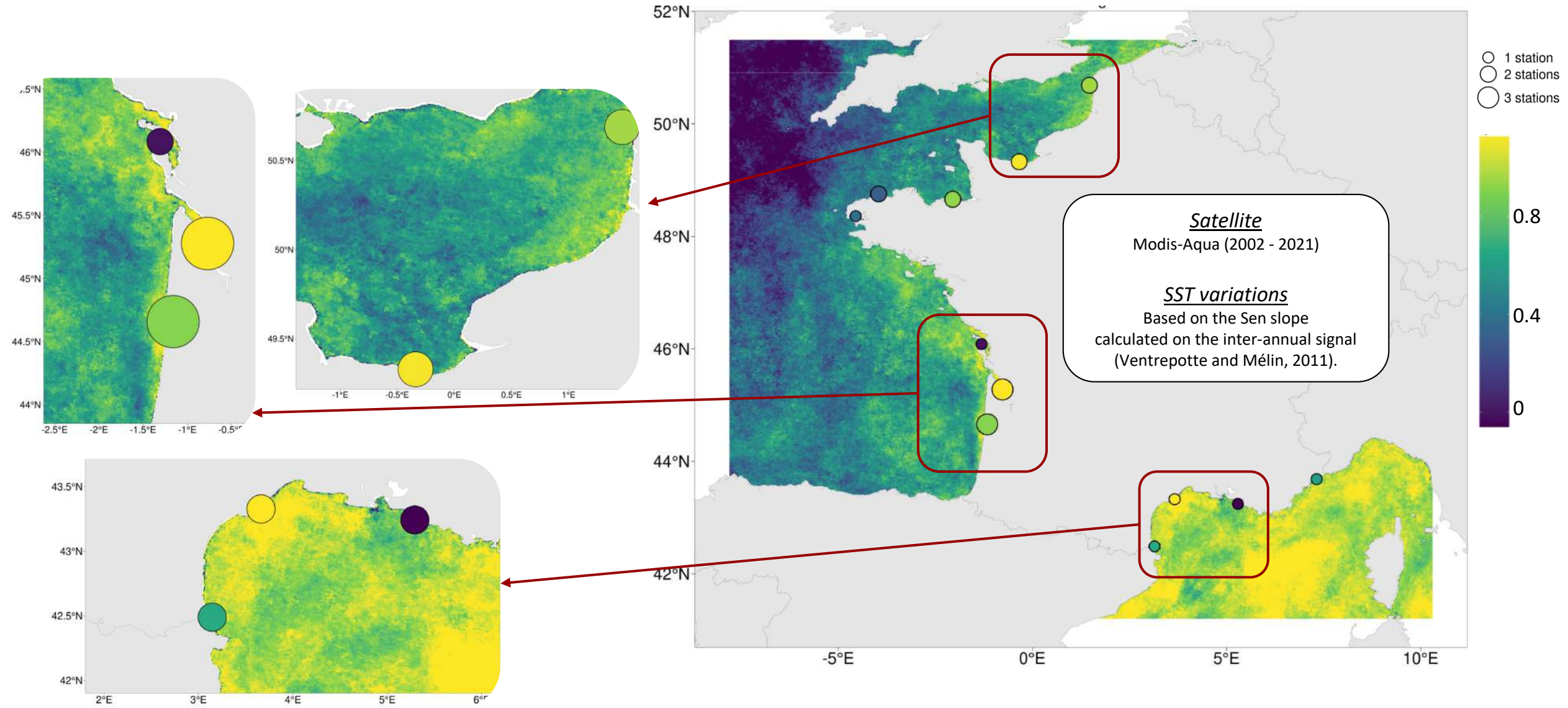
Climatologie SST - Décembre



SST variations from 2002 to 2021 (°C)

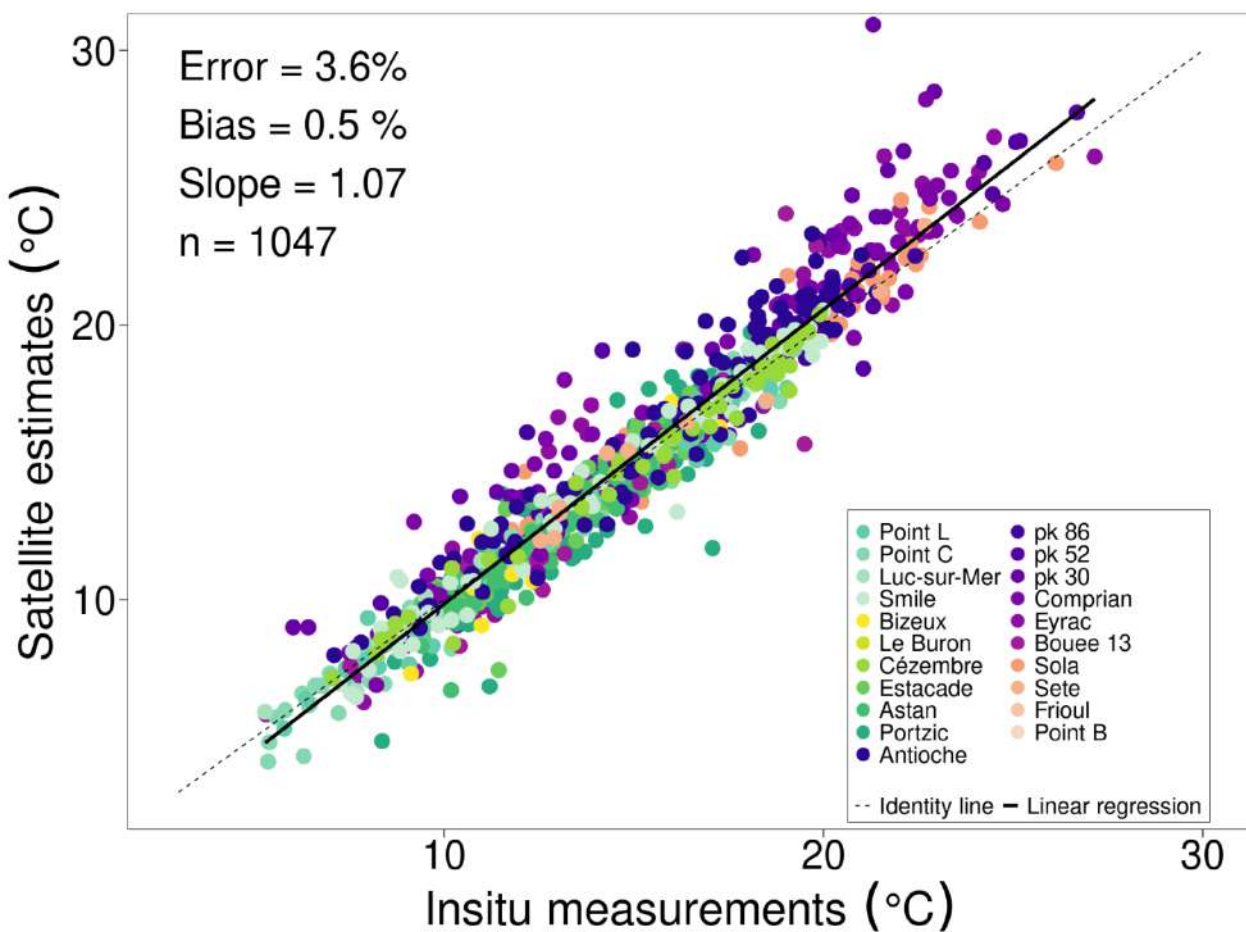


SST variations from 2002 to 2021 (°C)

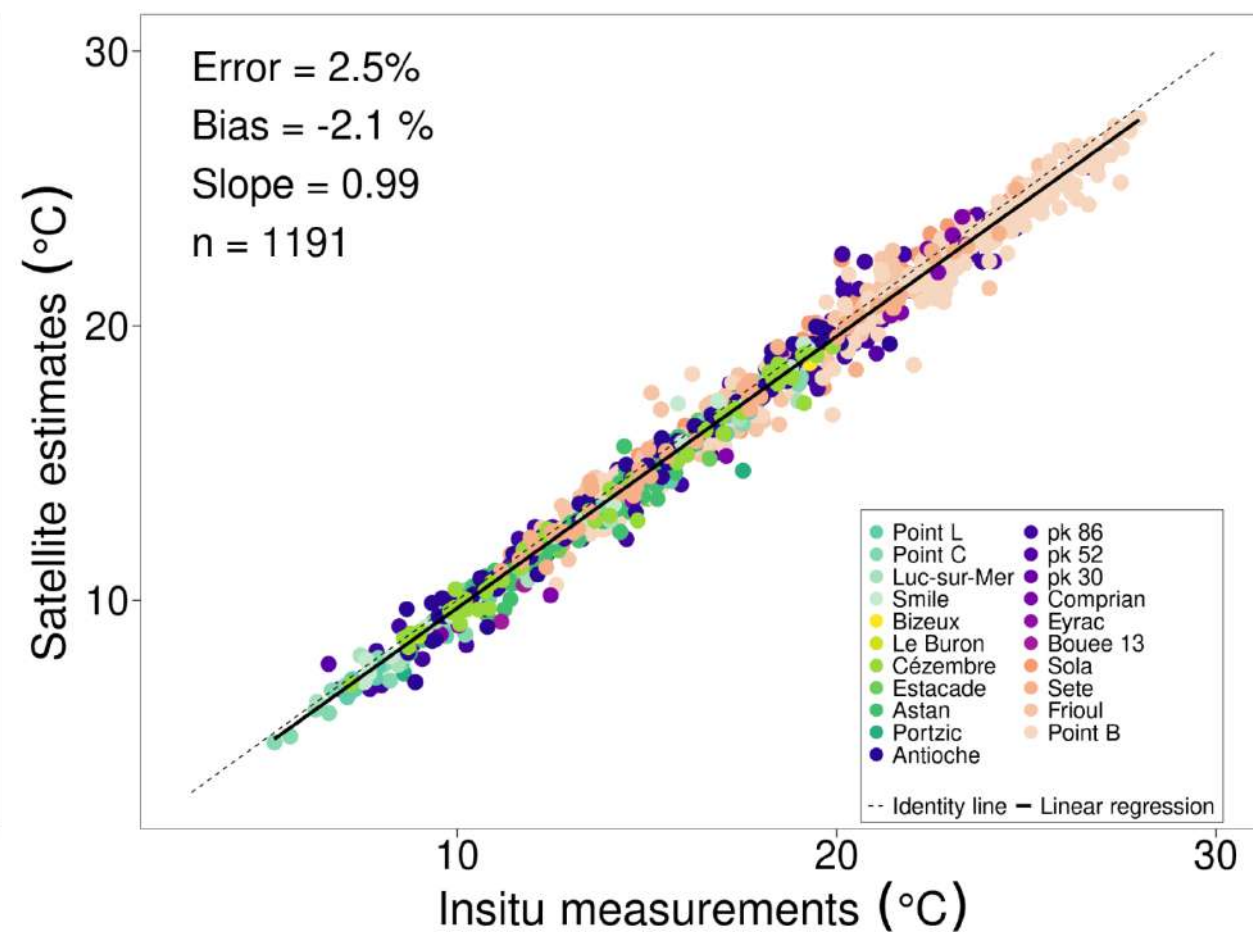


Validation of satellite SST products

SST-DAY

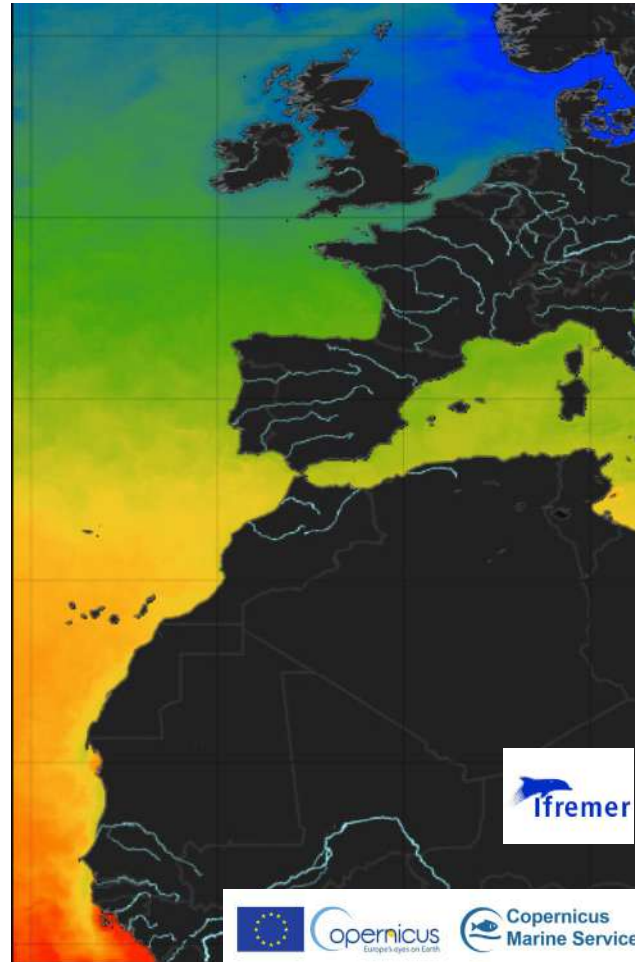
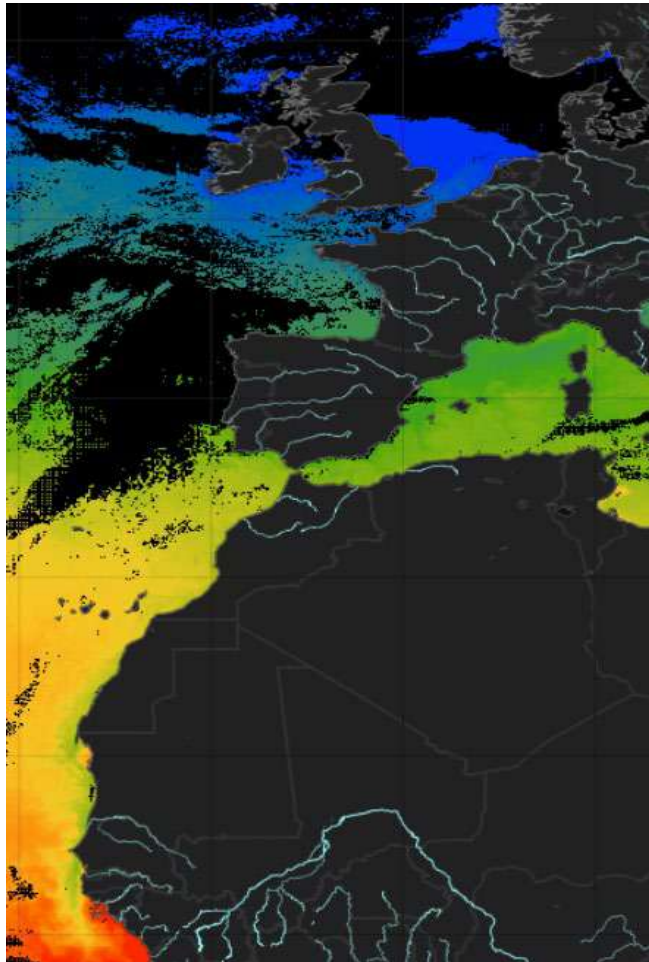


SST-NIGHT

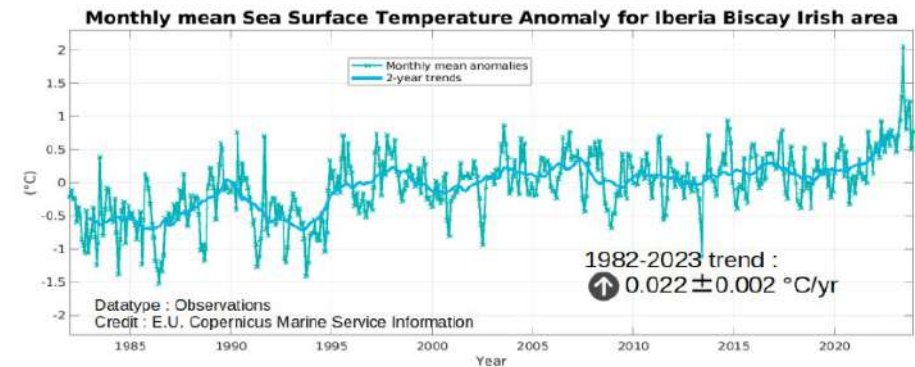


Observations de SST sur le Golfe du Lion

Exemples de produits de SST de niveaux L3 (multi-capteurs) et L4 temps réel et retraité (1982-2024) - SST
Copernicus Marine Service : 2 km, 1 jour



Et exemple d'indicateurs



Informations complémentaires :



<https://marine.copernicus.eu/fr>

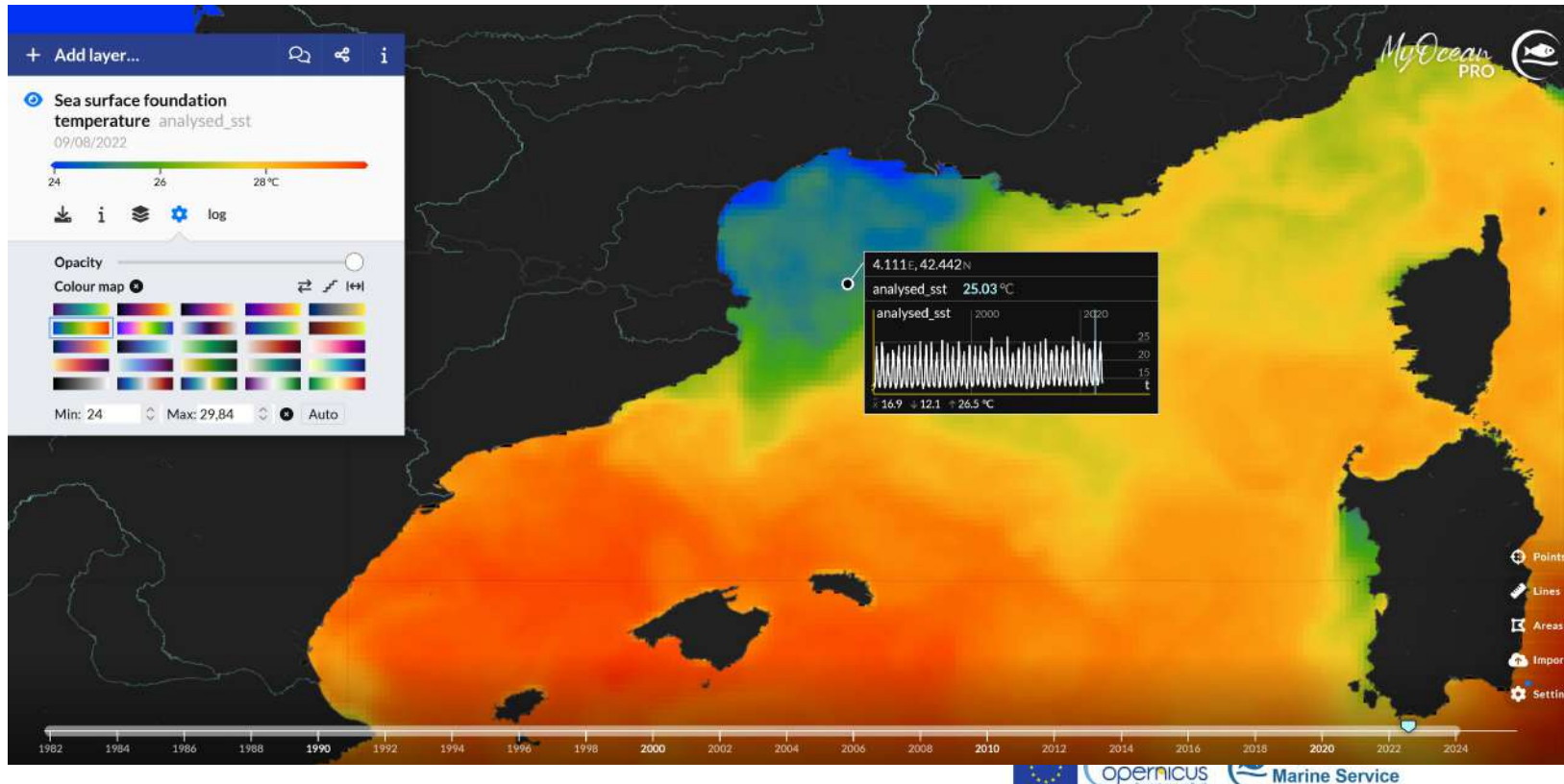
L4 :
résolution effective ~ 10-100 km (selon produits)

Produits Ifremer L3 et L4 globaux et régionaux Ifremer accessibles sur <https://marine.copernicus.eu>

Observations de SST sur le Golfe du Lion

Exemples de produits de SST de niveaux L3 (multi-capteurs) et L4 temps réel et retraité (1982-2024) - **SST Copernicus Marine Service** : 2 km, 1 jour

Produits Ifremer L3 et L4 globaux et régionaux Ifremer accessibles sur <https://marine.copernicus.eu> 1982-présent



<https://marine.copernicus.eu/fr>

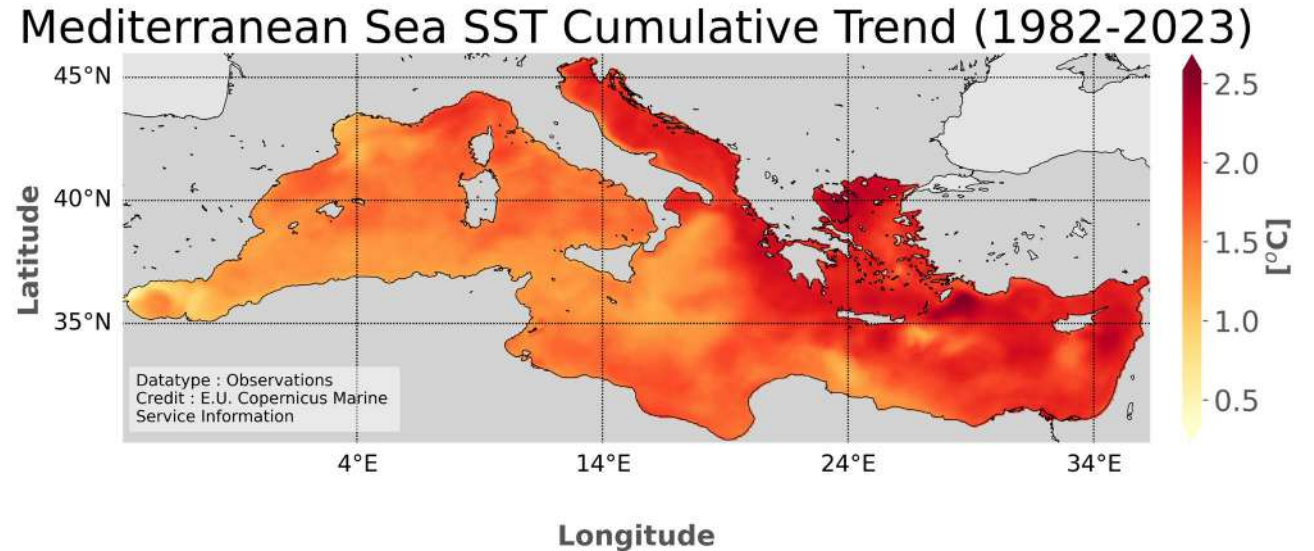
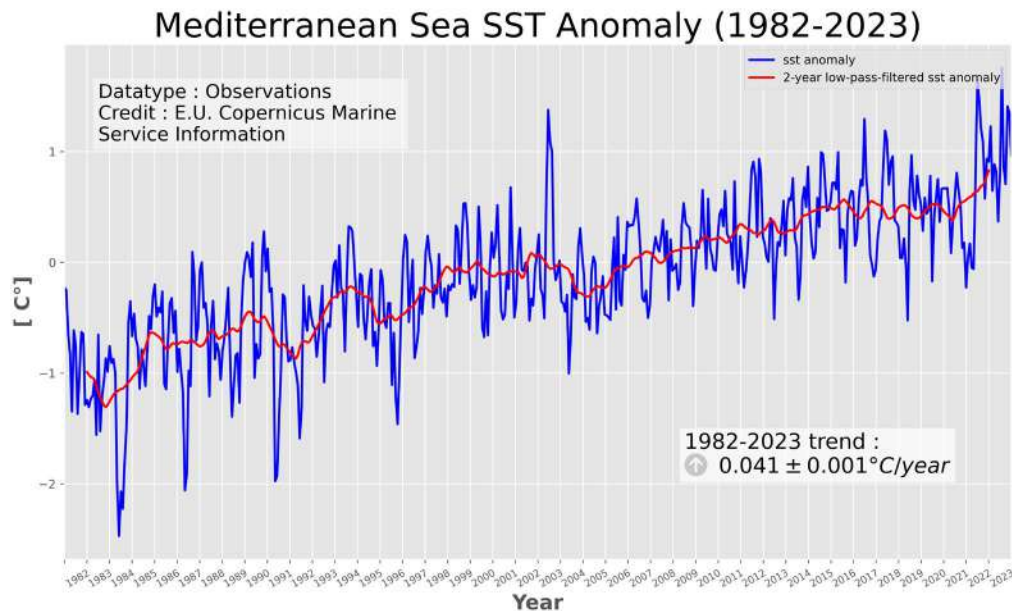
Produits Ifremer L3 et L4 globaux et régionaux Ifremer accessibles sur <https://marine.copernicus.eu>

Observations de SST sur le Golfe du Lion

Exemples de produits de SST de niveaux L3 (multi-capteurs) et L4 - SST Copernicus Marine Service

Indicateurs produits à partir des données quotidiennes CMES (producteur : CNR)

SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021 (Voir <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/mediterranean-sea-surface-temperature-cumulative-trend-map>)

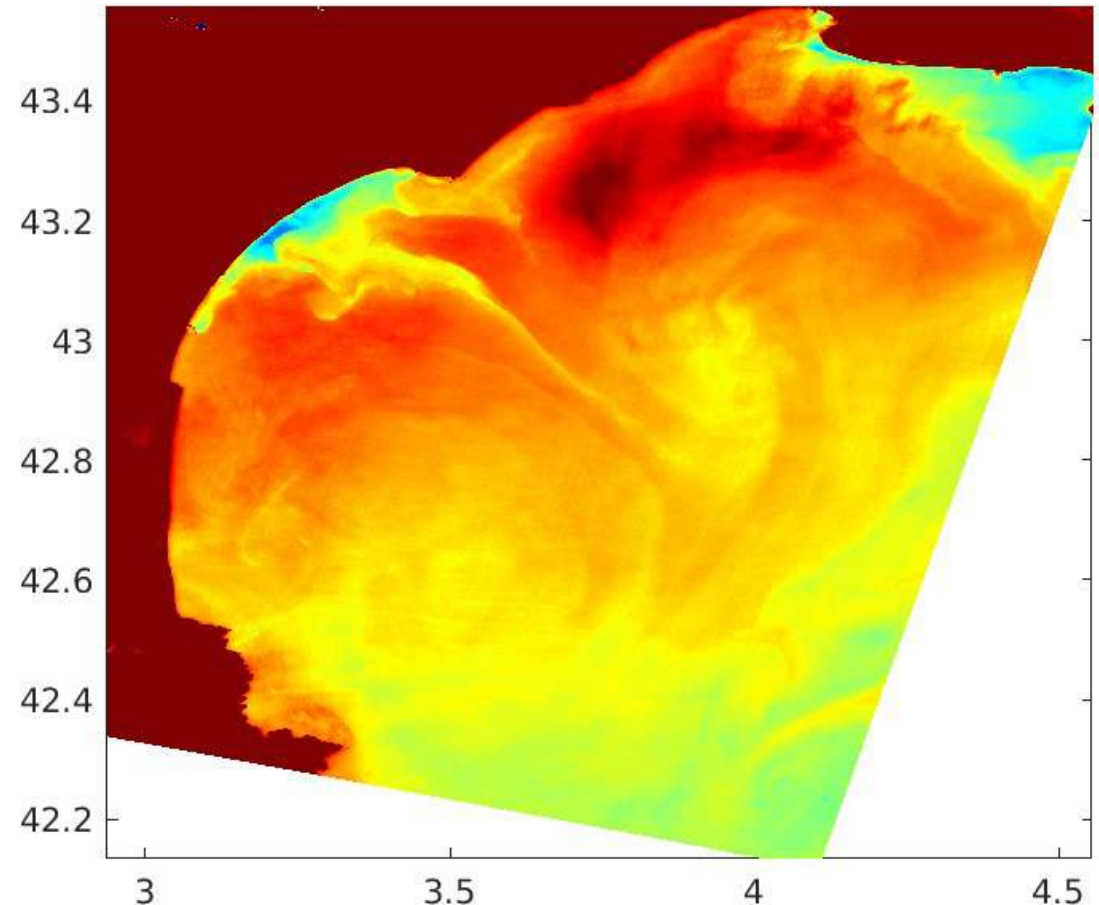


Observations de SST sur le Golfe du Lion et eaux intérieures

Vers la plus haute résolution ~100m

Mission Landsat (NASA), depuis 1984

- Avantages :
 - resolution spatiale => accès aux lacs et au littoral
 - Longue série
- Inconvénients:
 - faible resolution temporelle (~15 jours)
 - Un seul canal IR pour Landsat4-7
 - Observations “bruitées” (beaucoup moins sur Landsat9)



Observations de SST sur le Golfe du Lion et eaux intérieures



<https://data.ecla.inrae.fr/donnees/teledetection/WST>

<https://dataecla.fr/geoserver/Tskin/wms>



λ Température de Peau

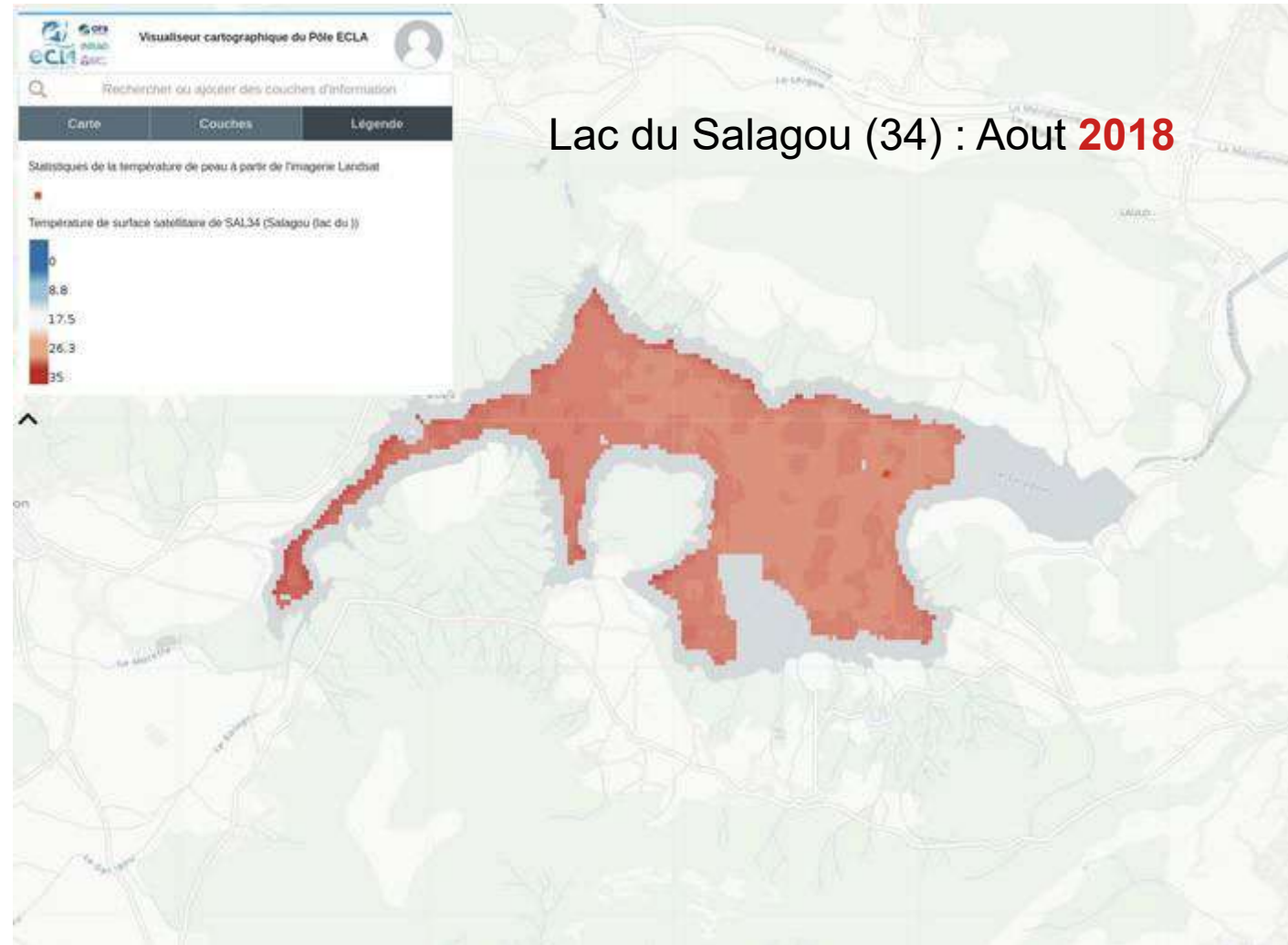
📷 T Landsat (4/5/7/8/9)

📏 30 m (90-120 m natif)

📅 1984 – à nos jours

🕒 16 jours

🎯 +/- 1 à 2 °C



Lac du Salagou (34) : Aout **2018**

Observations de SST sur le Golfe du Lion et eaux intérieures



<https://data.ecla.inrae.fr/donnees/teledetection/WST>

<https://dataecla.fr/geoserver/Tskin/wms>



λ Température de Peau

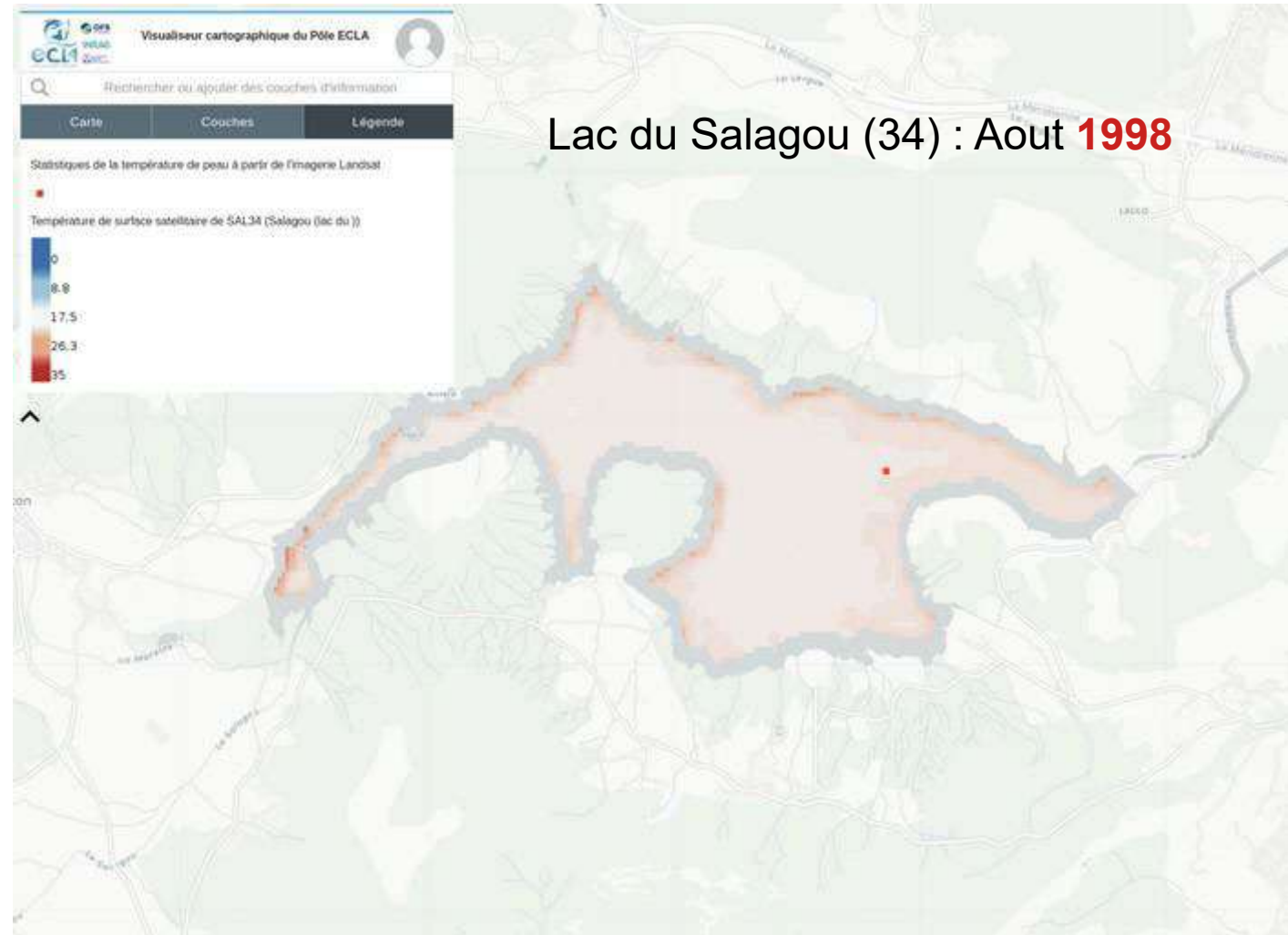
📷 T Landsat (4/5/7/8/9)

📏 30 m (90-120 m natif)

📅 1984 – à nos jours

🕒 16 jours

🎯 +/- 1 à 2 °C





Observations de SST sur le Golfe du Lion et eaux intérieures



<https://data.ecla.inrae.fr/donnees/teledetection/WST>

<https://dataecla.fr/geoserver/Tskin/wms>



2016-03-12 00:00:00

λ Température de Peau

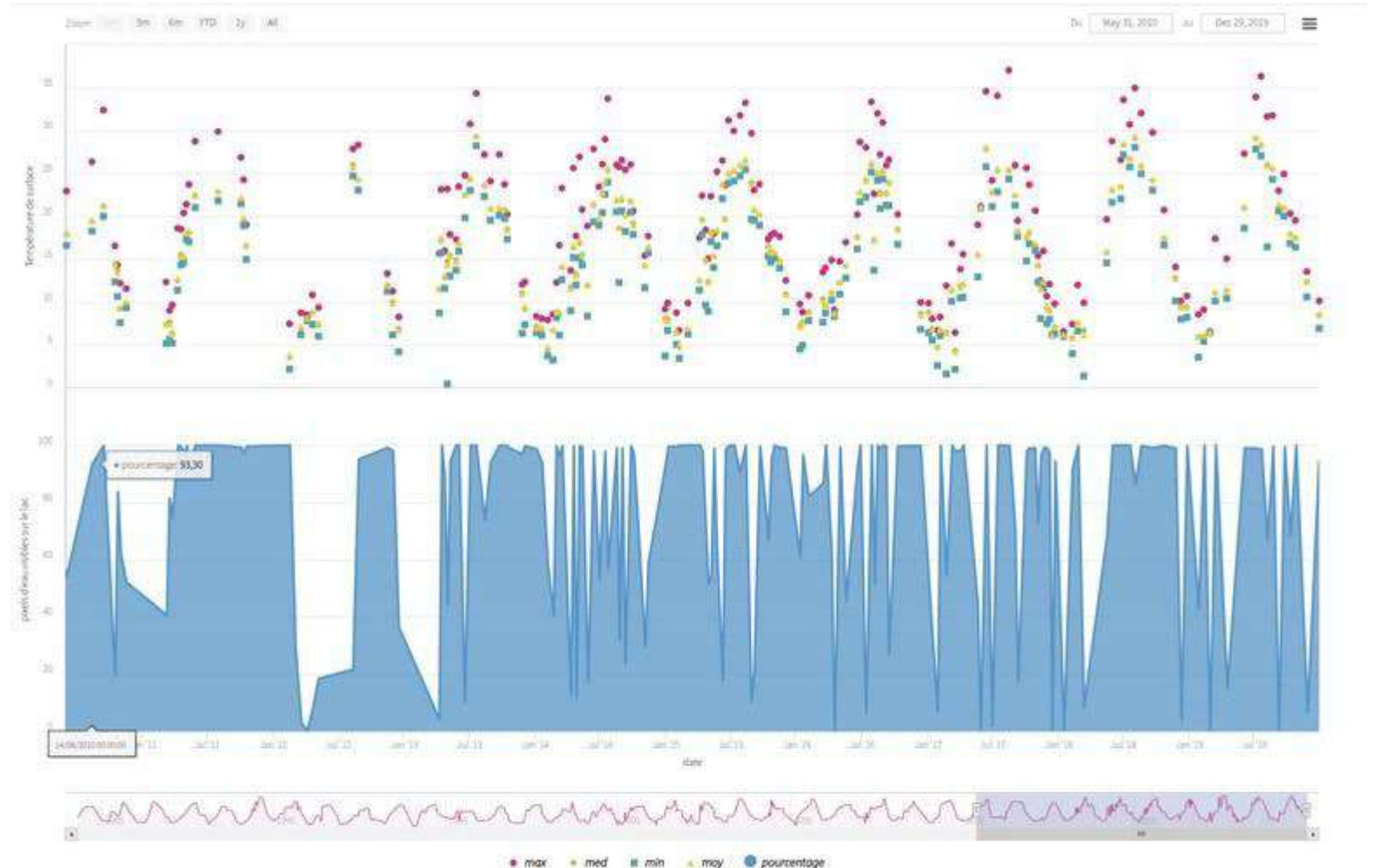
📷 T Landsat (4/5/7/8/9)

📏 30 m (90-120 m natif)

📅 1984 – à nos jours

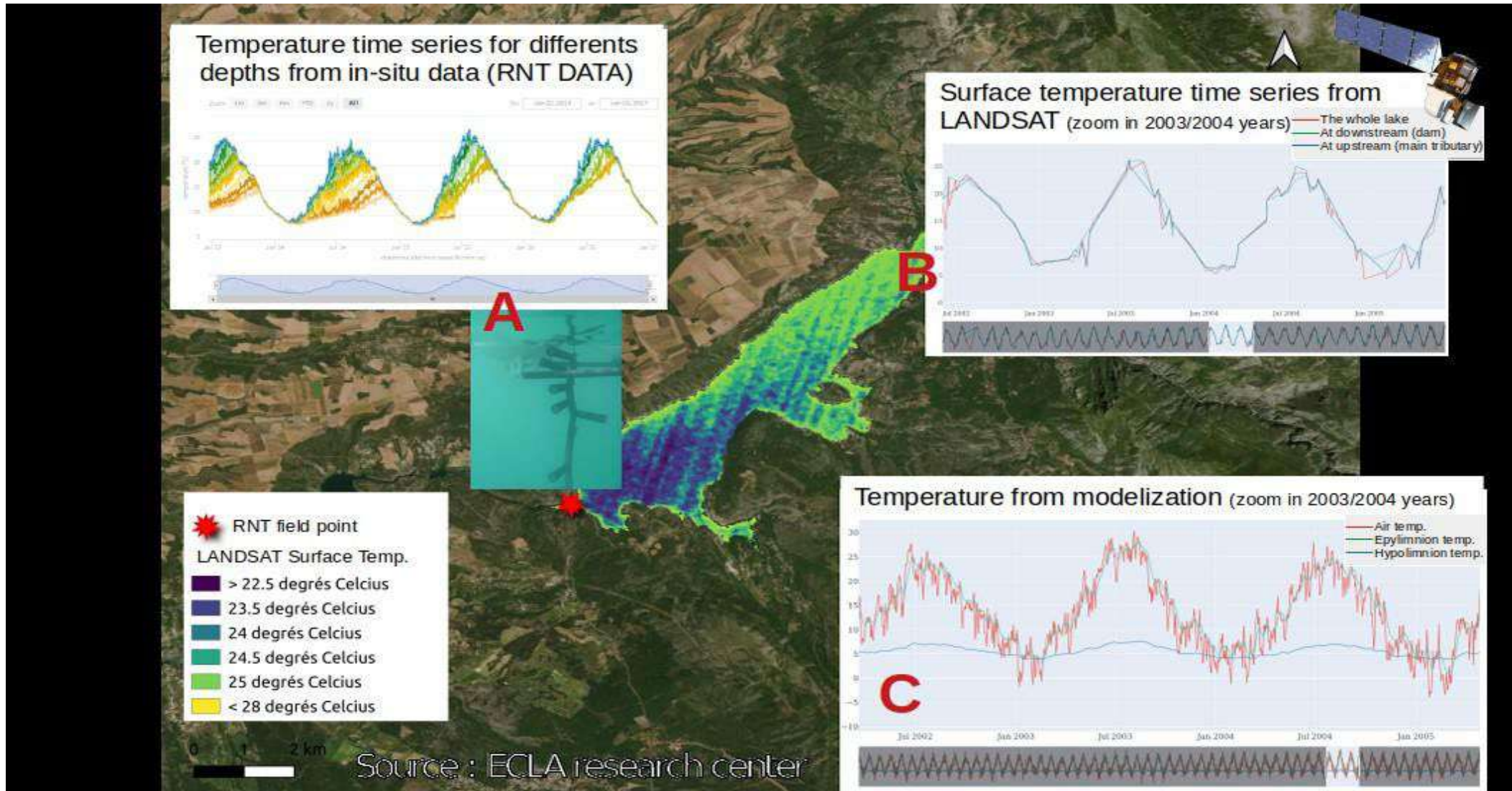
🕒 16 jours

🎯 +/- 1 à 2 °C



Observations de SST sur le Golfe du Lion et eaux intérieures

Modélisation : couplage in-situ et télédétection

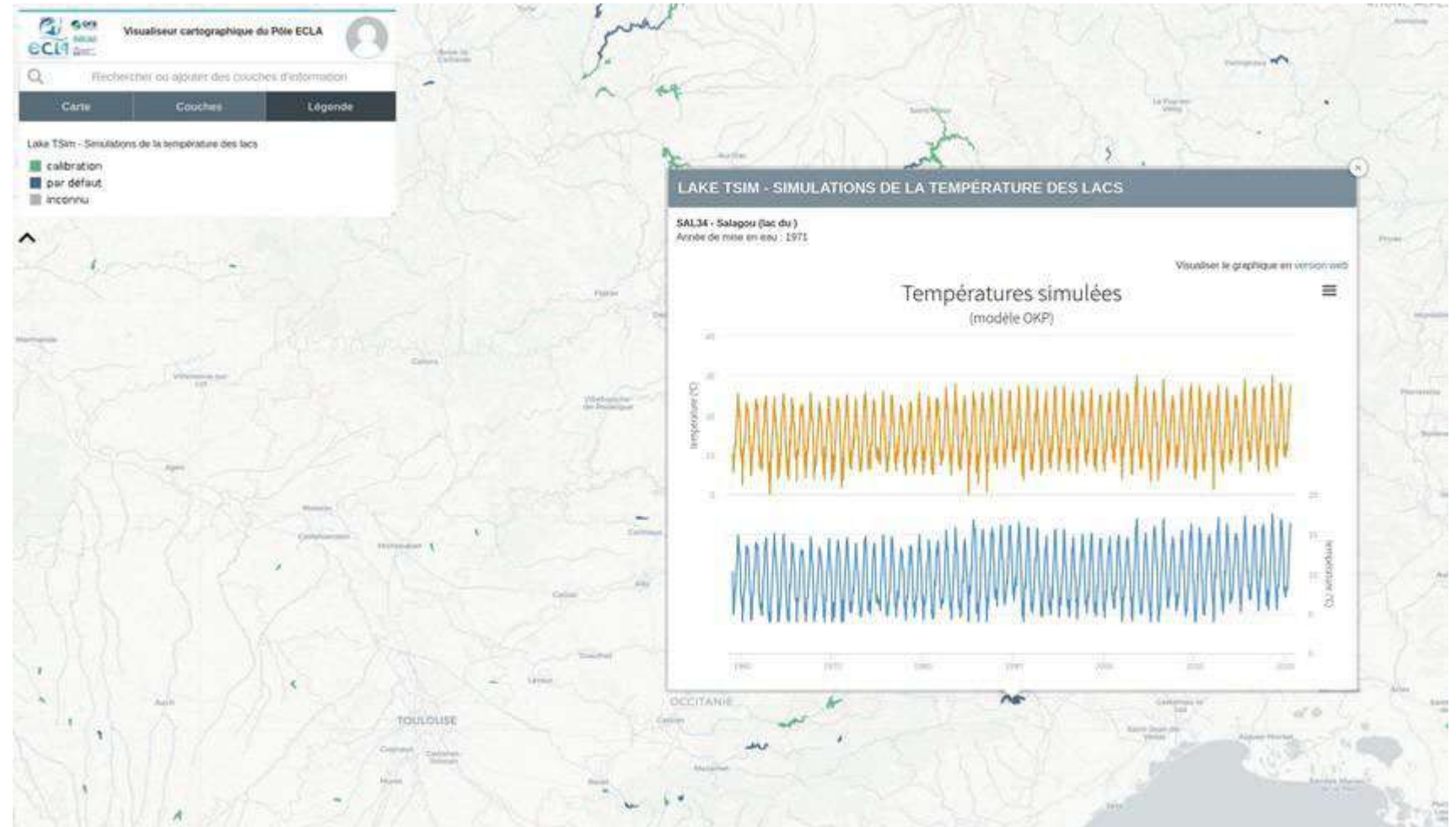


Observations de SST sur le Golfe du Lion et eaux intérieures



Chroniques sur 60 ans pour **401 plans d'eau**
(Sharaf et al, 2023)

La modélisation 1D



λ Température simulée surface et de fond

Modélisation 1d

1959 - 2019

journalier



Calibration forçage in-situ

Calibration par défaut

Température de surface

$\pm 1,85 \text{ }^\circ\text{C}$

$\pm 5,42 \text{ }^\circ\text{C}$

Température de fond

$\pm 2,32 \text{ }^\circ\text{C}$

$\pm 8,5 \text{ }^\circ\text{C}$

<https://data.ecla.inrae.fr/donnees/modelisation/temperature>

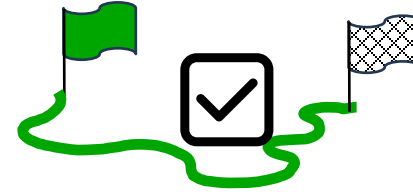
Observations de SST sur le Golfe du Lion et eaux intérieures

Exemple d'utilisation
(Jeu de données LakeTSim, Sharaf et al, 2023)

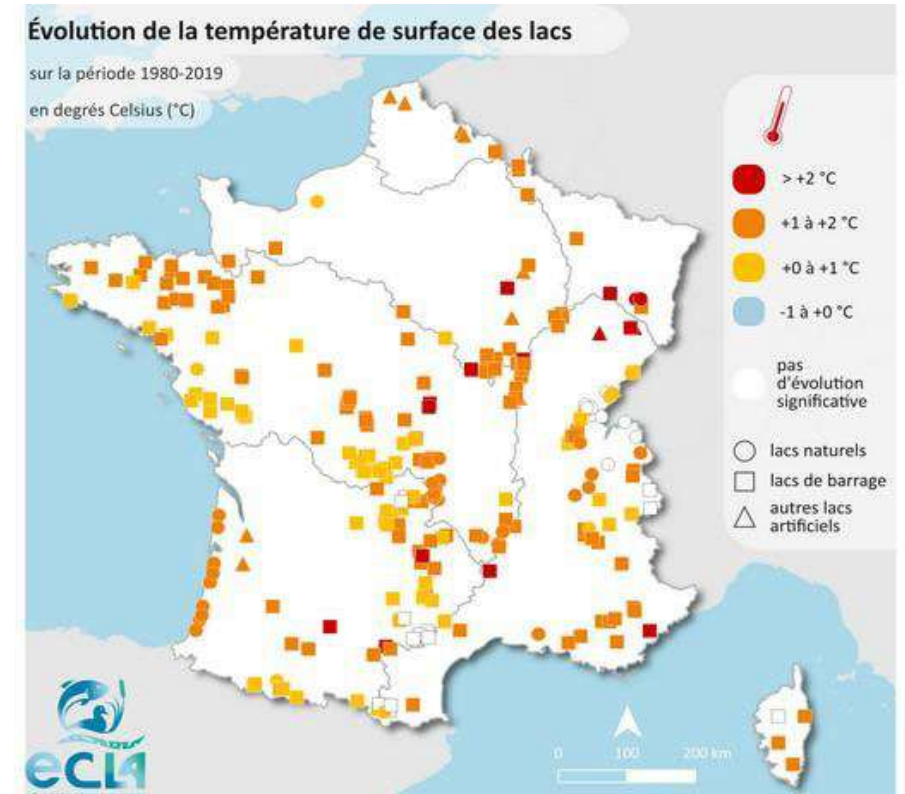
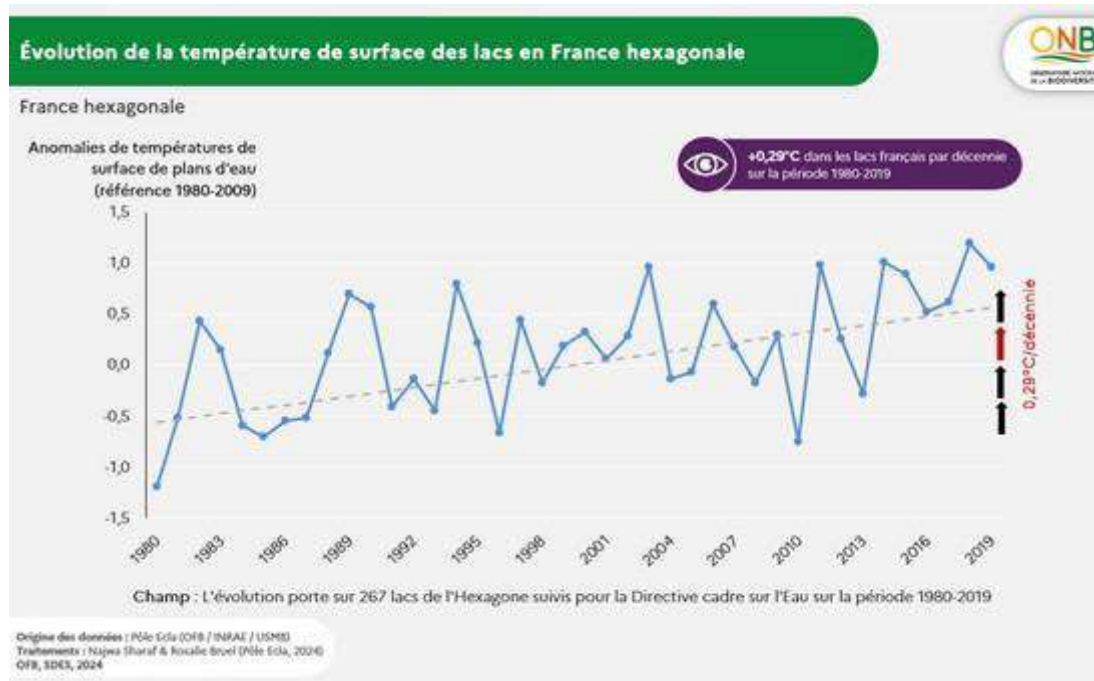
Calcul d'indicateurs
(p.ex. : ONB)



401 lacs



Modèle OKP
(Prats & Danis, 2019)



Observations de SST sur le Golfe du Lion et eaux intérieures

- Vers la très haute résolution, 50-100m / 2-3 jours : Futures Missions



CNES/ISRO
TRISHNA
2026



NASA SBG
2028



2029 et 2031

- En attendant TRISHNA :

CALISTA (COASTAL 100m RESOLUTION SEA SURFACE TEMPERATURE FROM SATELLITE INFRARED IMAGERY)



Les données

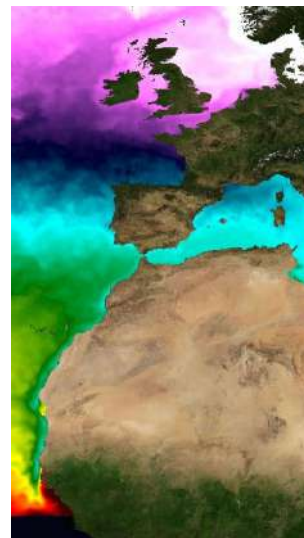


ECOSTRESS



LANDSAT

La zone



la méthode et les résultats

- Algo split-window (NLSST)
- Coefficients à partir de
 - produits satellite 1km
 - RTTOV + 700000 profils atmos.
- Evaluation et **amélioration des masques nuages et terre/mer**
- **Débruitage**
- Colocalisation avec Felyx
- Validation et diagnostics:
 - GHRSSST 1km SSTs, In-situ (bouées, stations), ISAR
- Distribution du produit (format GHRSSST) 
- *Contact : emmanuelle.autret@ifremer.fr*