

# Fusion de séries temporelles d'images satellites Sentinel-2 pour la production d'images et la cartographie des fonds marins de la surface jusqu'aux profondeurs mésophotiques dans le sud-ouest de l'océan Indien

Pascal Mouquet  
UMR Espace-Dev / IRD  
Station SEAS-OI, La Réunion

merIGéo 2025 - 18-20 mars - Nantes



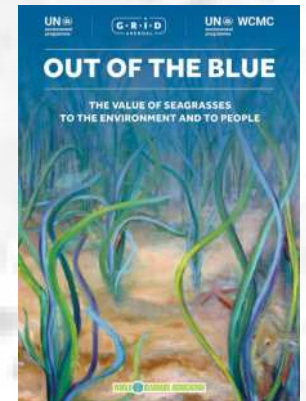
# Habitats marins, précieux et vulnérables

- **Récifs coralliens / Herbiers de phanérogames marines**
  - biodiversité / stock de carbone / nurserie poissons / etc.
  - occupent moins de **0,3 %** de la surface des fonds marins
  - dégradation, **décroissance à échelle mondiale**
- **Habitats marins** parmi les écosystèmes de la planète les plus **vulnérables** aux **pressions anthropiques** et / ou aux impacts liés aux **changements climatiques** (température, niveaux marins, acidification, etc.)
- Maintenir l'**intégrité et la résilience** des **écosystèmes coralliens** est **essentiel** pour le bien-être des **communautés littorales tropicales** à travers le monde.
- Importance de **produire et fournir** la meilleure **information scientifique** sur les **status et les tendances** des récifs coralliens et des écosystèmes associés dans un but de **conservation et de gestion**



Global Coral Reef Monitoring Network,  
2020

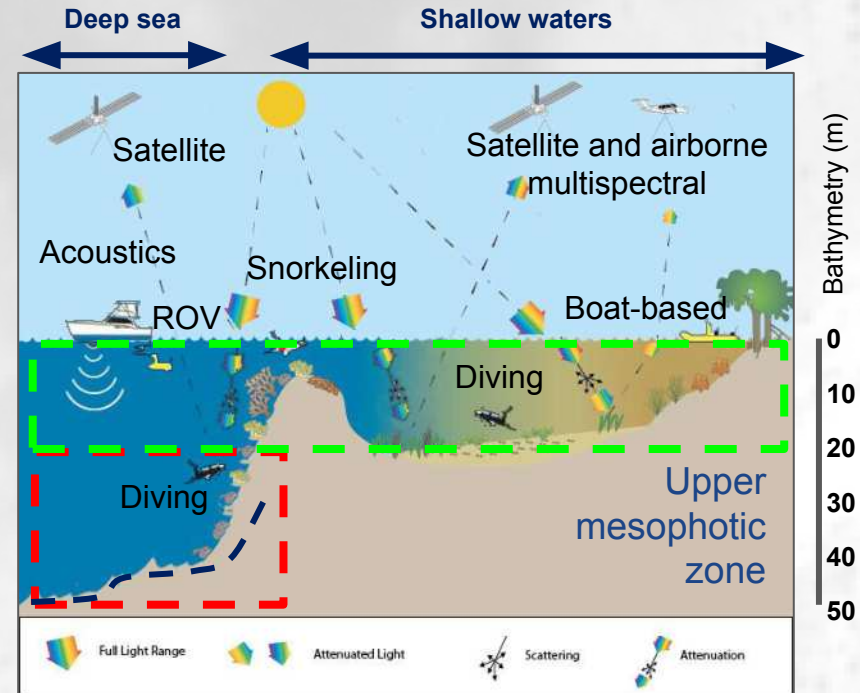
<https://gcrmn.net/>



United Nations  
Environment Programme (UNEP), 2020  
<https://www.unep.org>

# Téledétection et Cartographie marine

- **Téledétection** utilisée pour l'**acquisition de données environnementales** (température de surface de la mer, bathymétrie, cartographie des habitats benthiques, etc.) **complémentaire** aux **mesures in-situ** (plongée, acoustique sous-marine, etc.)
- **Limitée aux premiers mètres** de hauteur d'eau à cause de **fortes contraintes** liées aux **interactions avec la colonne d'eau** (effets de surface, absorption du signal, turbidité, etc.)
  - Cartographie des habitats (<20m pour Allen Coral Atlas)
  - Satellite Derived Bathymetry (SDB) (<15-20m)



Adapté de Roelfsema & al. (2017), A Web Based Toolkit for Using Remote Sensing to Map and Monitor Terrestrial, Marine and Atmospheric Environments. <https://www.rsrc.org.au/rstoolkit/>

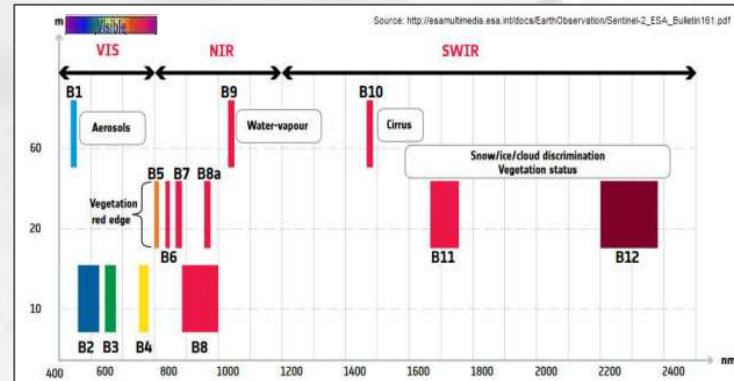
➤ **Dépasser ces limites, + profond possible**

Données utilisées

# Images satellites Sentinel-2

- Constellation de **satellites haute Résolution**
  - Projet Copernicus (European Space Agency)
  - 2 satellites Sentinel-2 **depuis 2015 & 2017**
  - **13 bandes spectrales** (visible, IR)
  - **Résolutions spatiales: 10m / 20m / 60m**
  - Acquisitions tous les **5 jours**
  - Couverture **mondiale**
- Données ouvertes, **accessibles gratuitement**
- Développer de **nouvelles chaînes de traitement** exploitant ces **très gros volumes de données** pour **améliorer la cartographie des fonds et des habitats marins**

⇒ **COMMENT ?**

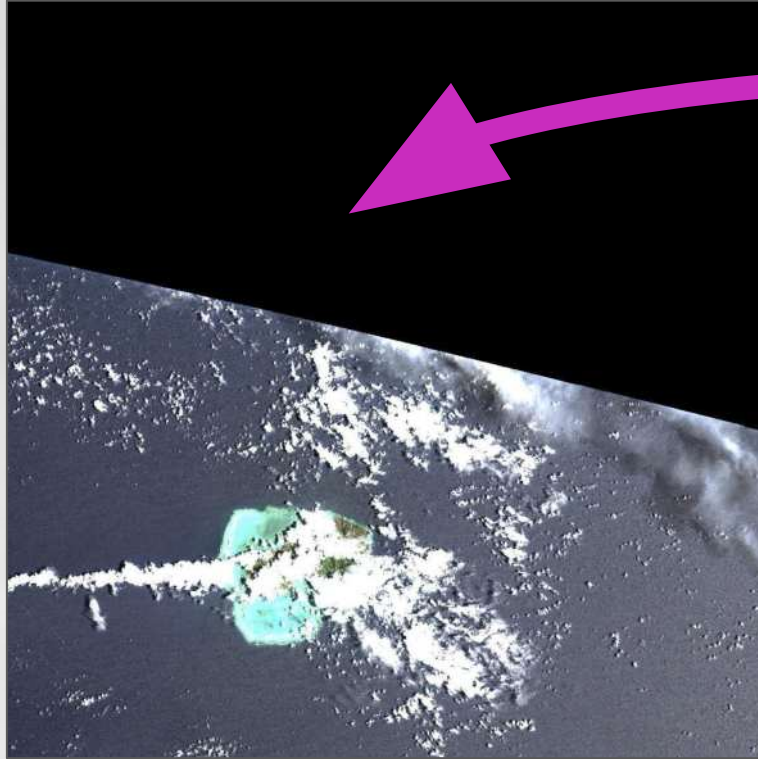


Bandes spectrales Sentinel-2  
et caractéristiques



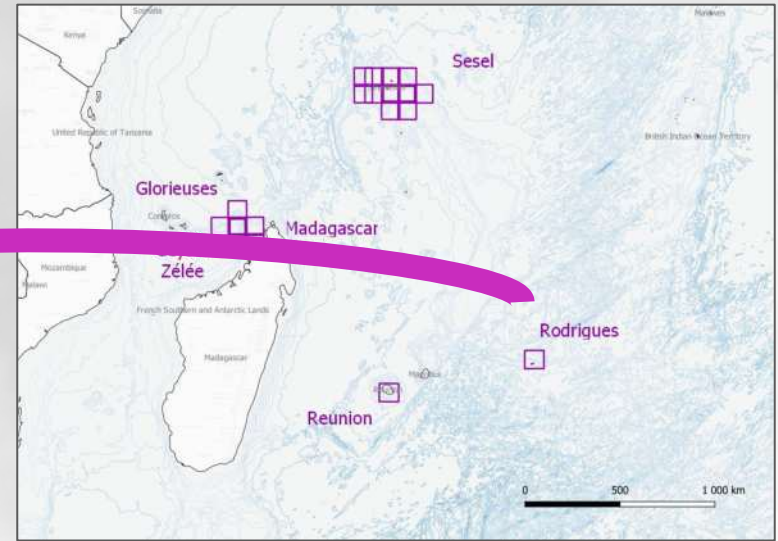
# Constat

## Produits Sentinel-2 typiques



03/01/2019

50 km



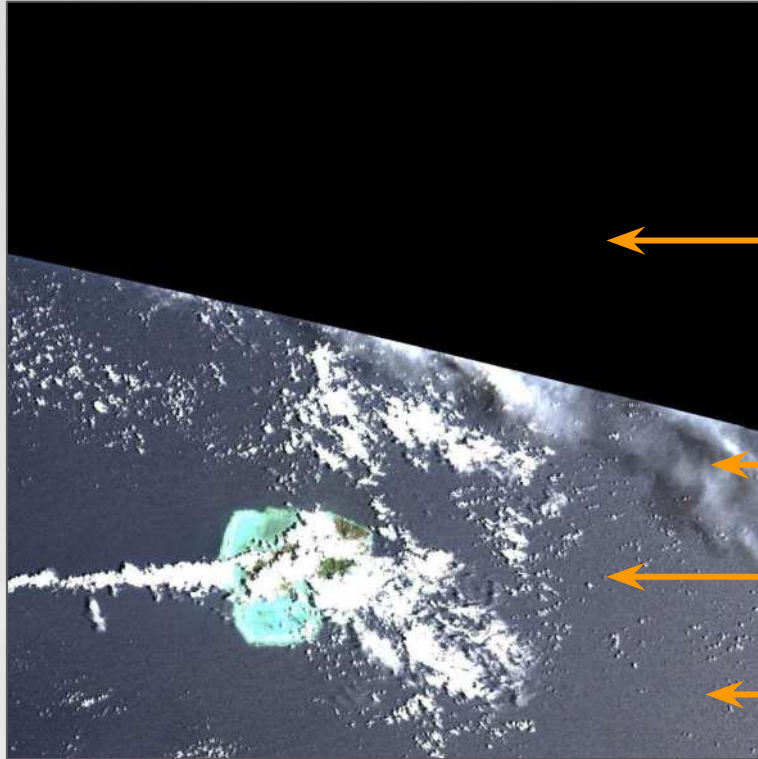
### île Rodrigues

Tuile 41KNU

- ★ Série temporelle : 406 dates / images
- ★ Période d'acquisition :  
29/03/2016 - 21/07/2022

# Constat

## Produits Sentinel-2 typiques



← Hors des limites d'acquisition

← Nuages diffus (cirrus)

← Nuages denses

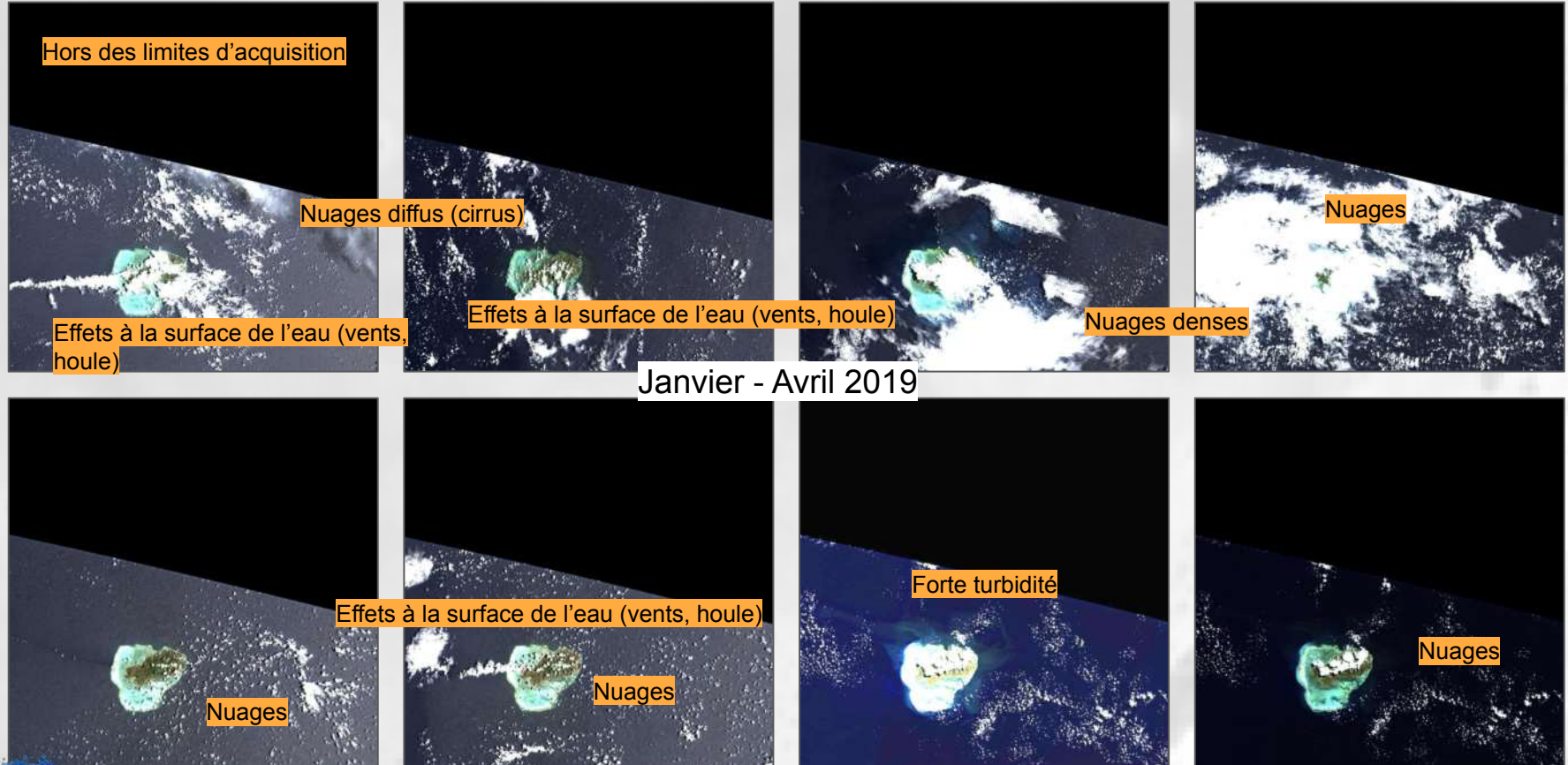
← Effets à la surface de l'eau (vents, houle)

03/01/2019

# Constat

## Produits Sentinel-2 typiques

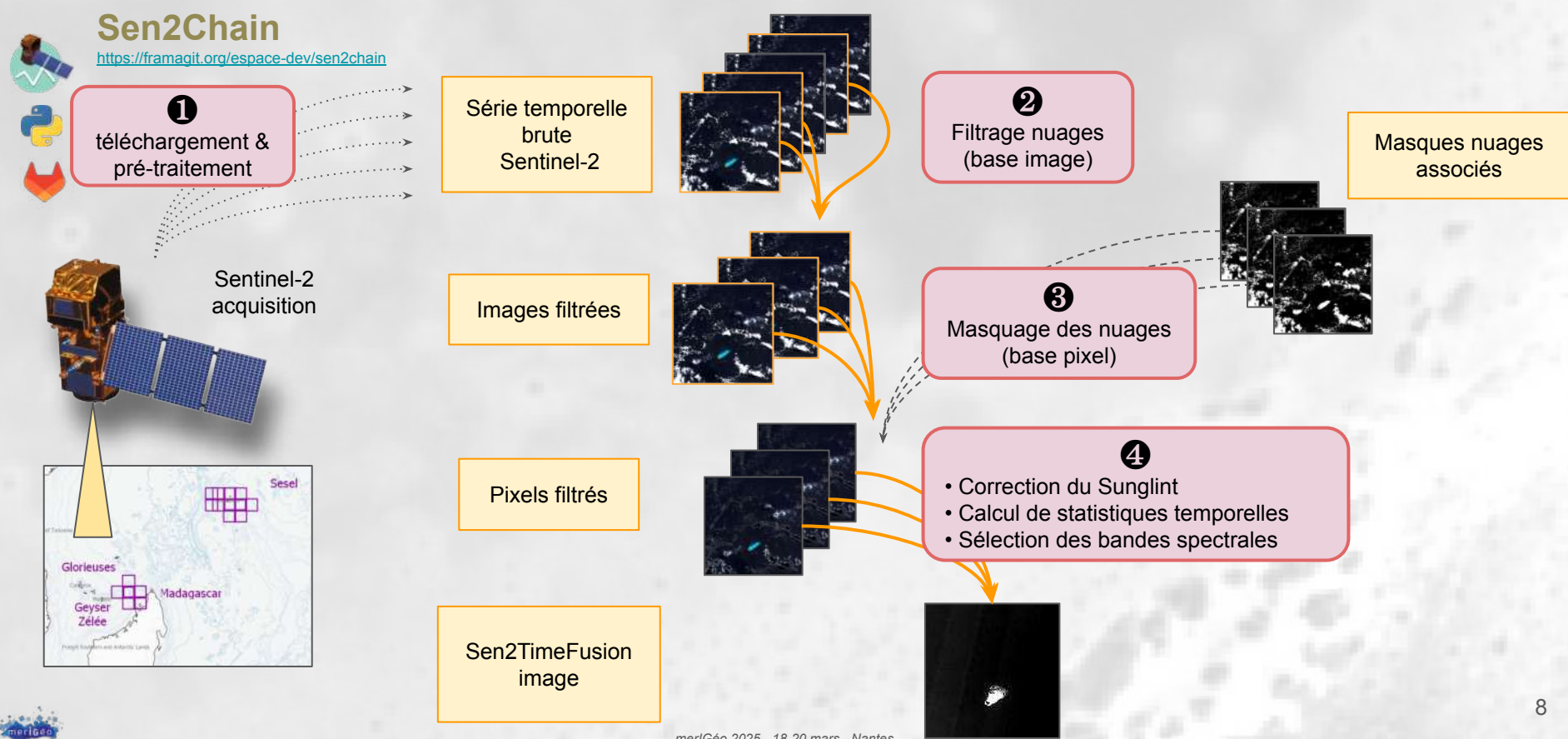
- Centaines d'images
- Qualité très variable





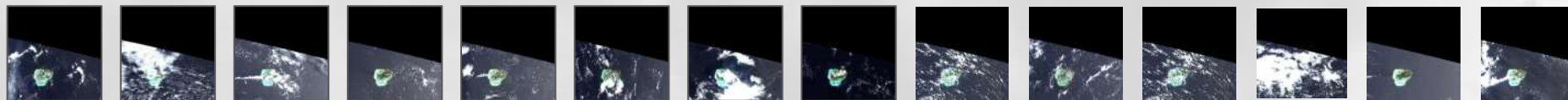
# Méthode

## Sen2TimeFusion: algorithme de traitement de séries temporelles S2





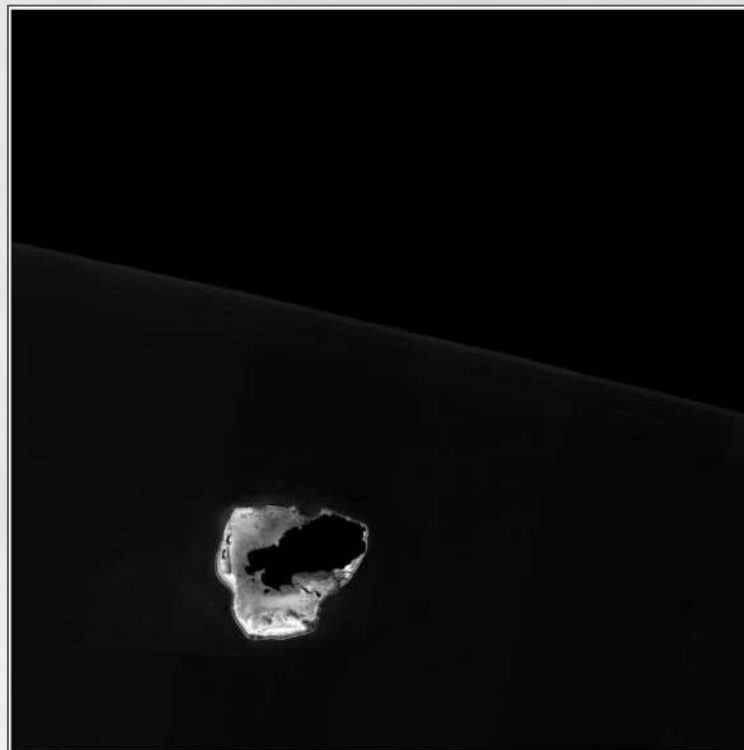
## Sen2TimeFusion - Images produites



### Ile Rodrigues

41KNU

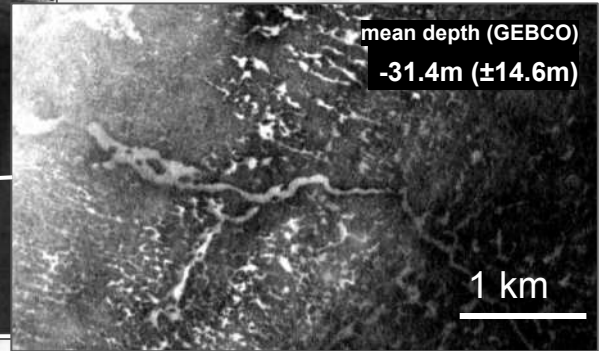
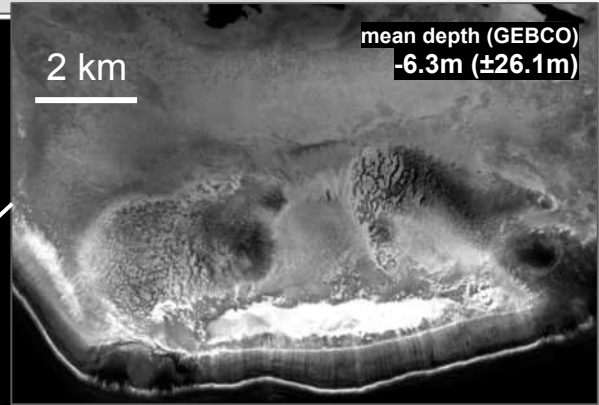
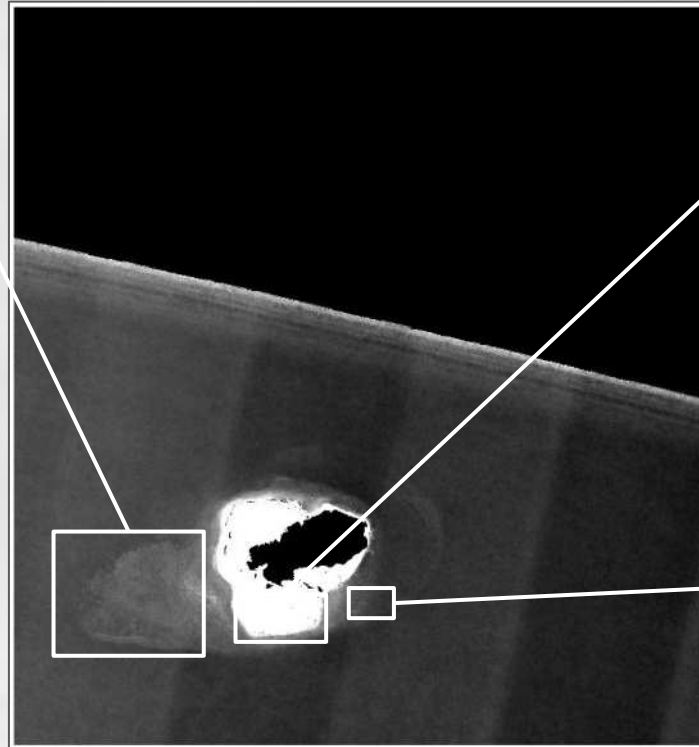
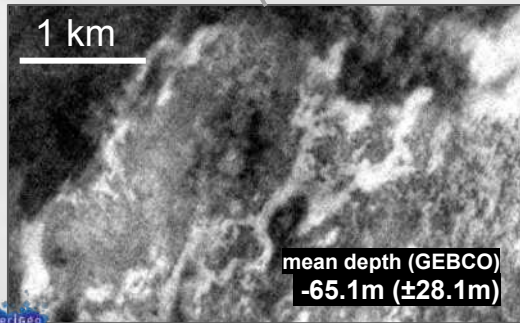
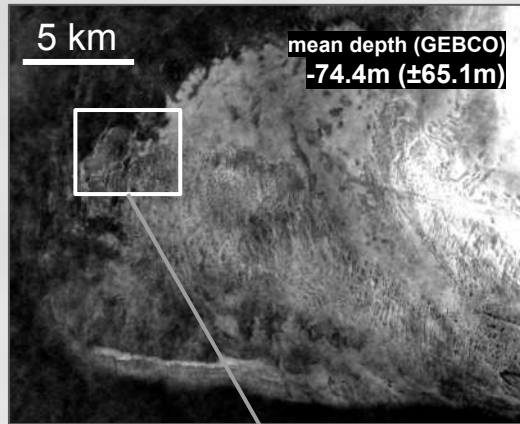
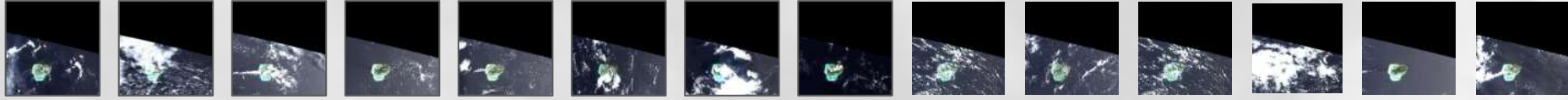
- ★ 406 dates (série temp. complète)
- ★ 191 dates (<25% cloud cover)
- ★ first date: 29/03/2016
- ★ last date: 27/07/2022



- Image N&B monochrome (bande bleue uniquement)
- Pas de nuages
- Pas d'effets de surface
- Pas de turbidité
- Réduction du bruit en profondeur (augmentation du SNR)<sup>9</sup>

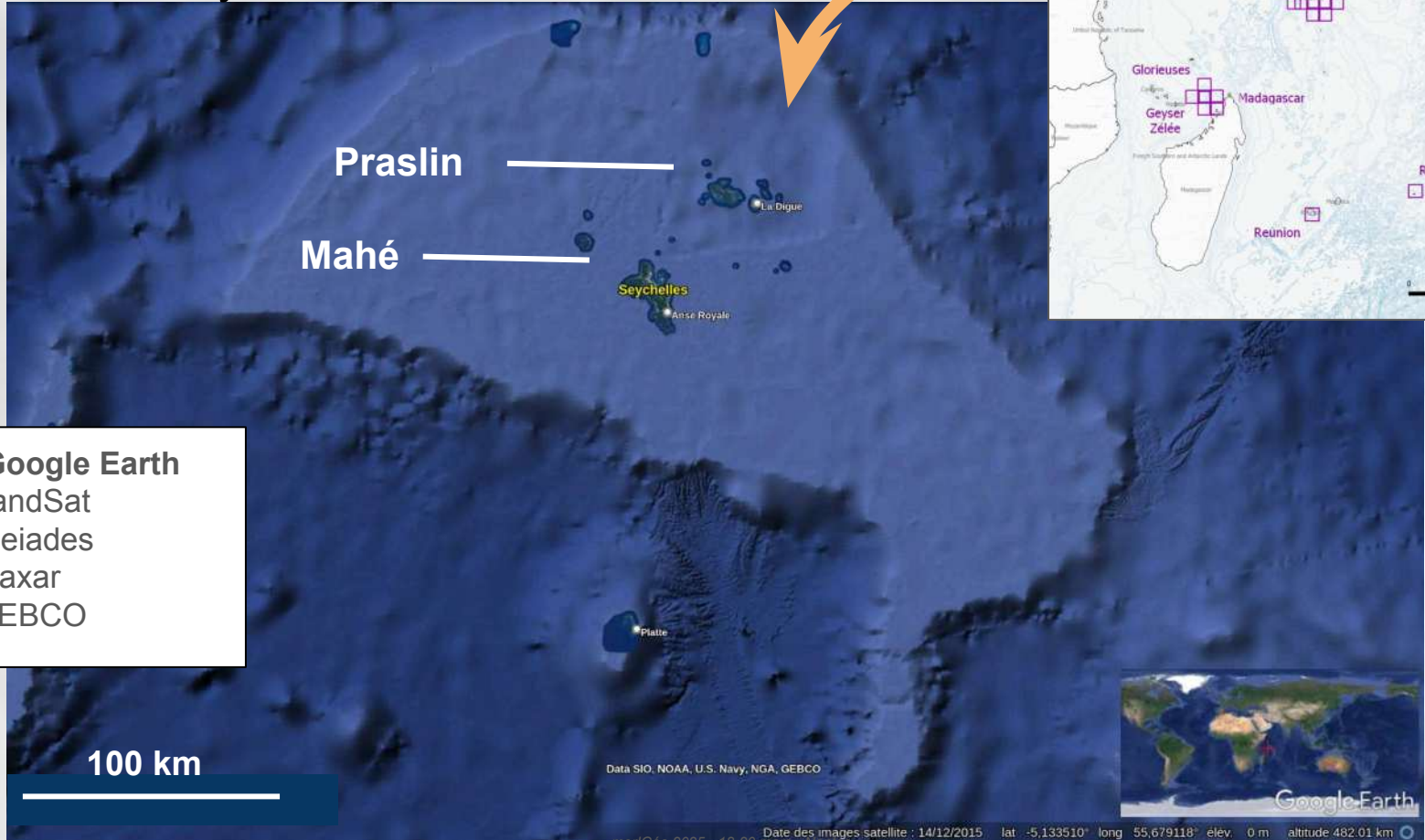
# Résultats #1

## Sen2TimeFusion - Images produites



# Résultats #2

## Plateau des Seychelles



- Image **Google Earth**
- LandSat
  - Pleiades
  - Maxar
  - GEBCO



# Résultats #2

## Plateau des Seychelles

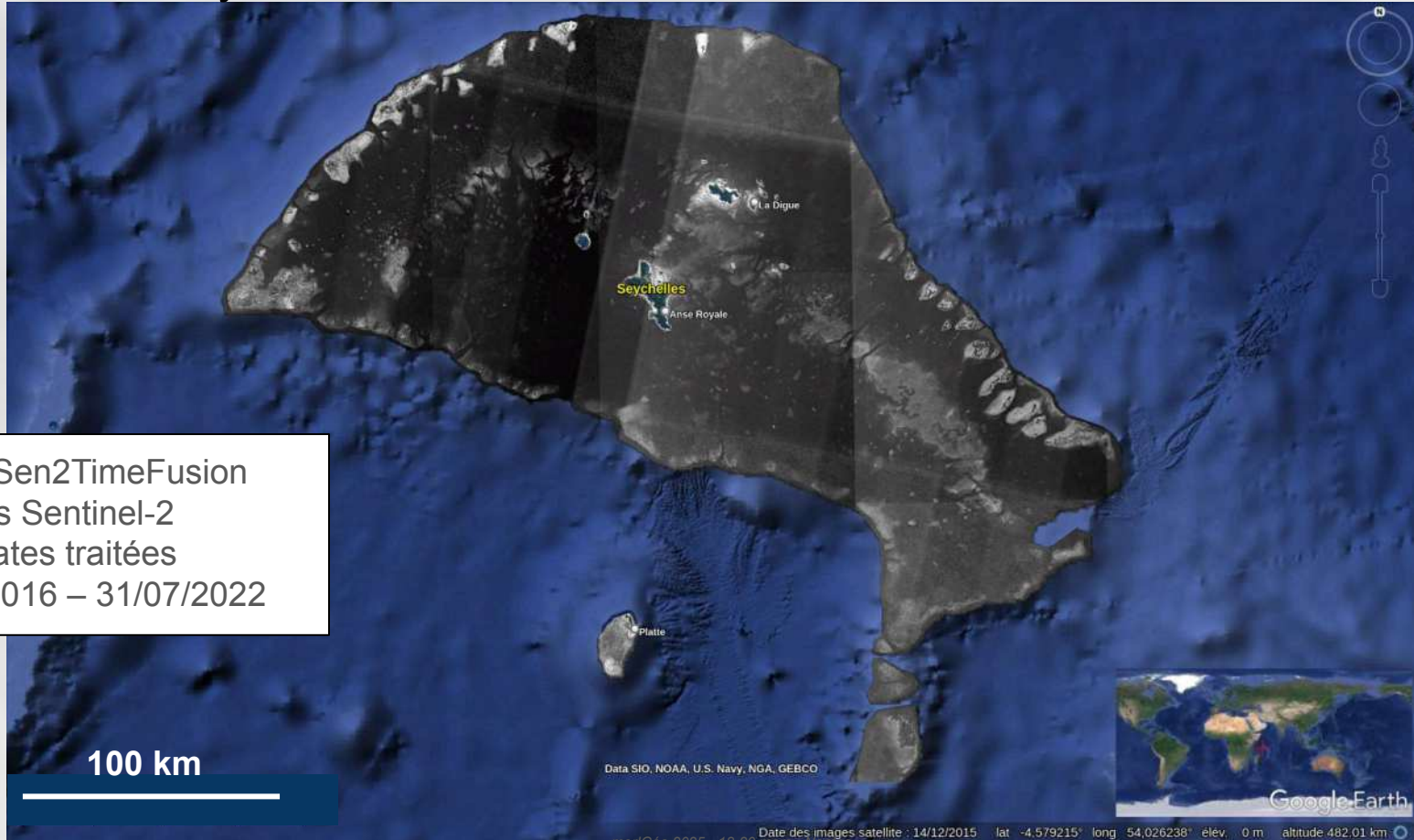


Image Sen2TimeFusion  
11 tuiles Sentinel-2  
2781 dates traitées  
24/03/2016 – 31/07/2022

100 km

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

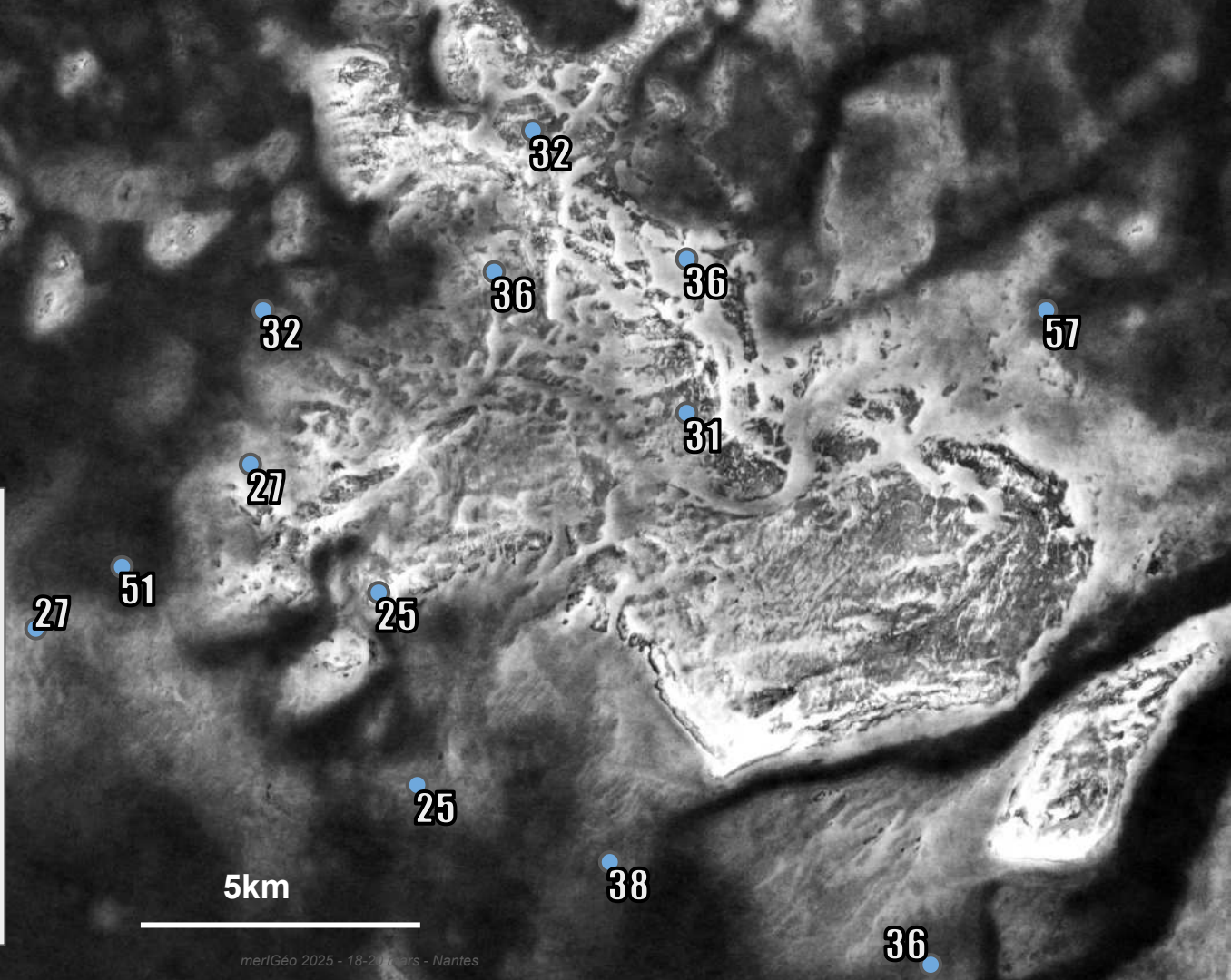
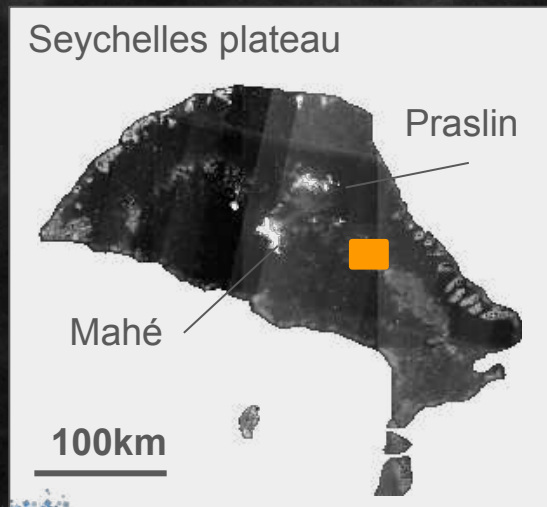
Google Earth

Date des images satellite : 14/12/2015 lat -4,579215° long 54,026238° elev. 0 m altitude 482,01 km



# Topaze bank

Bathymetry: -50m/-15m



# Thorp bank

Bathymetry: -40m/-25m

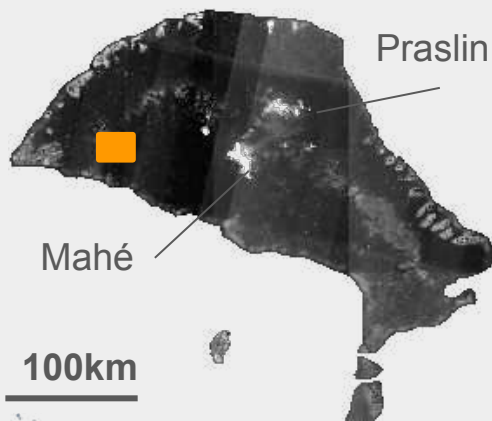


Seychelles plateau

Praslin

Mahé

100km

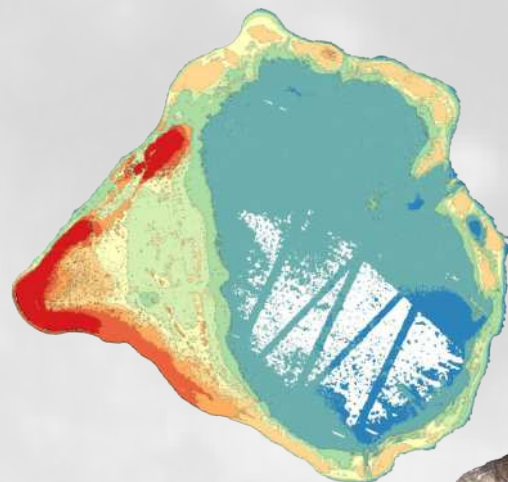


1km

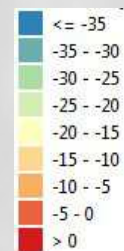
## Comparaison avec des données de référence historiques

### Données exploitées

- Campagnes Litto3d Océan Indien (2009)
  - Bathymétrie (MNT Lidar)
  - Image des fonds marins (traitement images hyperspectrales)



10km



Geyser - 38LPM





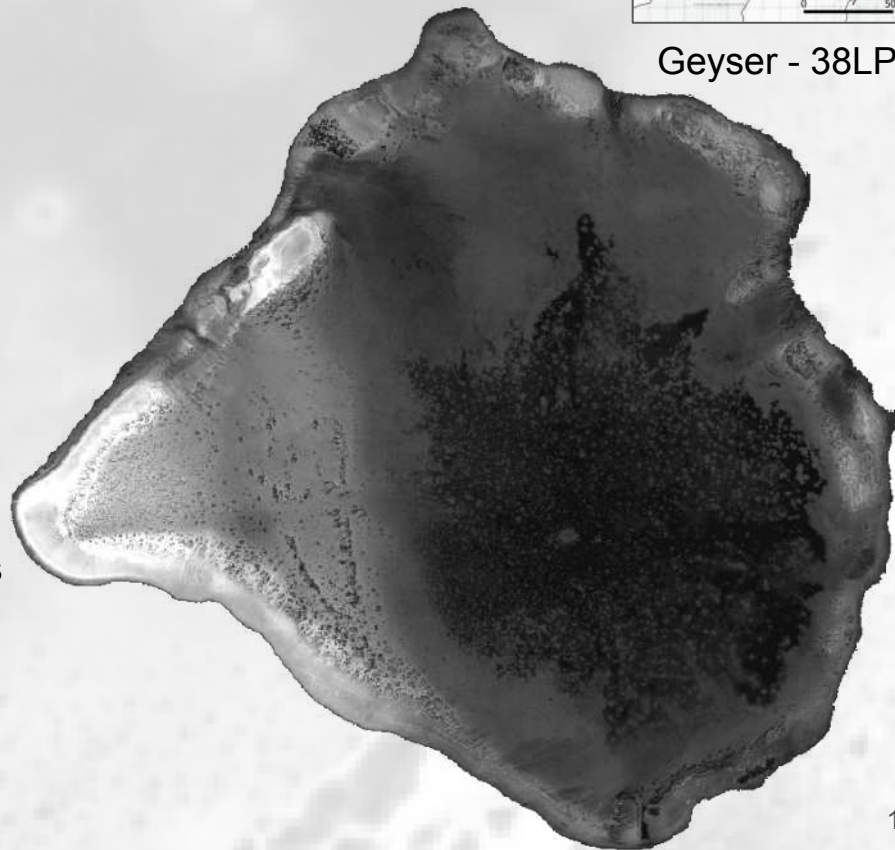
# Comparaison avec des données de référence historiques



Geyser - 38LPM

## Données exploitées

- Campagnes Litto3d Océan Indien (2009)
  - Bathymétrie (MNT Lidar)
  - Image des fonds marins (traitement images hyperspectrales)
- Calcul des images Sen2Timefusion sur 8 années
  - 05/10/2015 -> 04/08/2022
  - **911** images série temporelle (351GB)
  - **537** images filtrées (<25% CC)

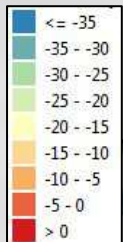




# Analyse des résultats #1

## Comparaison avec des données de référence historiques

Valeurs manquantes (<35m)



Artefacts de traitement

Limites lignes de vol très visibles

Bruit et faible SNR (effets de surface, atténuation colonne d'eau)

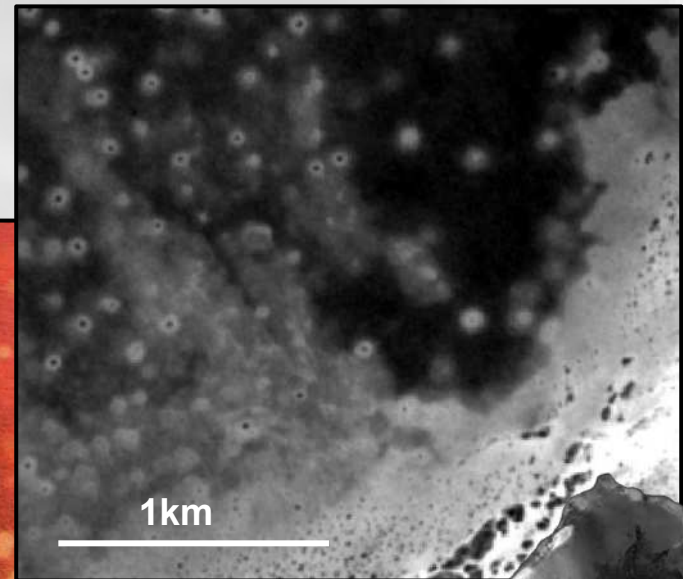
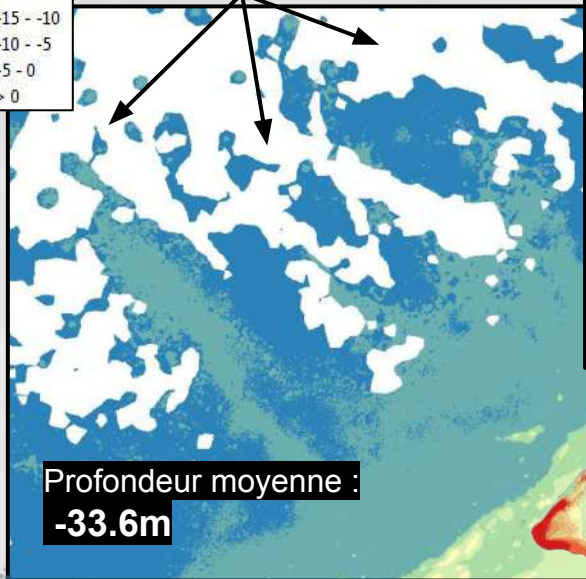


Image des fonds Sen2Timeseries



Profondeur moyenne : -33.6m

Bathymétrie Lidar

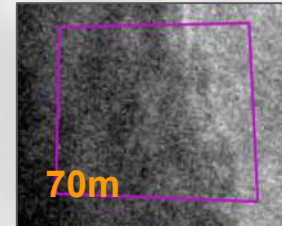
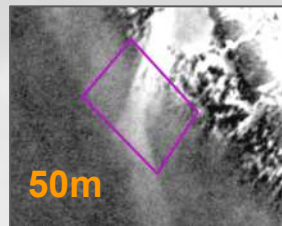
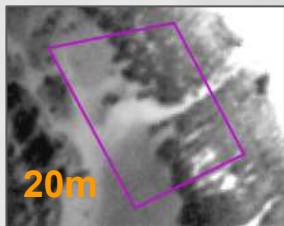
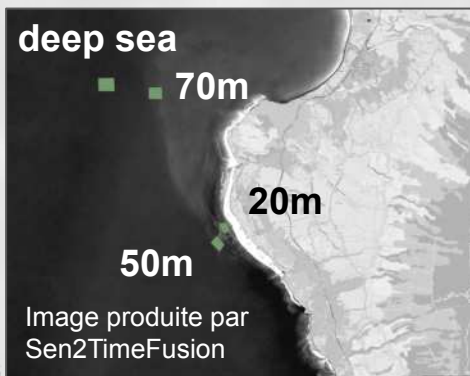
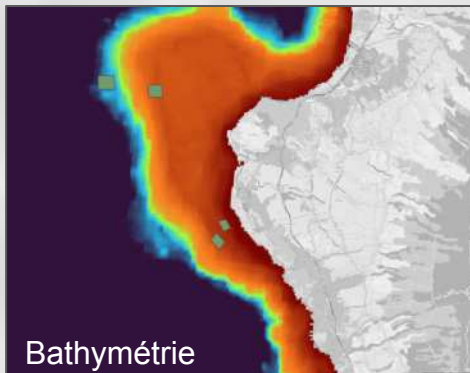
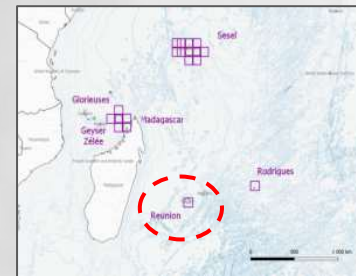


Image des fonds hyperspectrale

## Analyse des résultats #2

# Quelle est la profondeur maximale atteignable ?

- DEM HOMONIM (Shom) 100m de résolution spatiale
- Réunion - 40KCB - 20/10/2015 - 03/08/2022 (253 images)



Méthode de Bootstrapping :

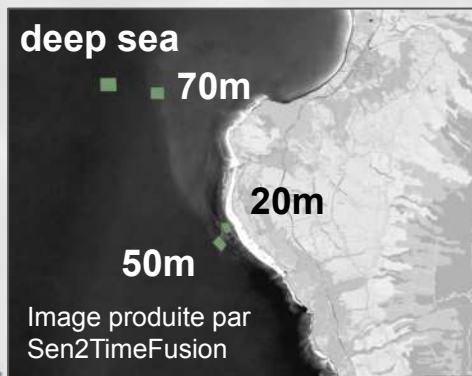
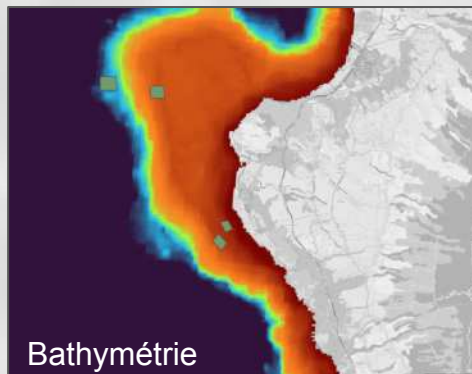
- 200 tirages d'images aléatoires
- pour un nombre croissant entre 1 et 200 images

Analyse du rapport signal sur bruit  
Signal to Noise Ratio (SNR)  
sur des zones **hétérogènes** de  
de **profondeurs croissantes**  
(20m, 50m, 70m, deep sea)

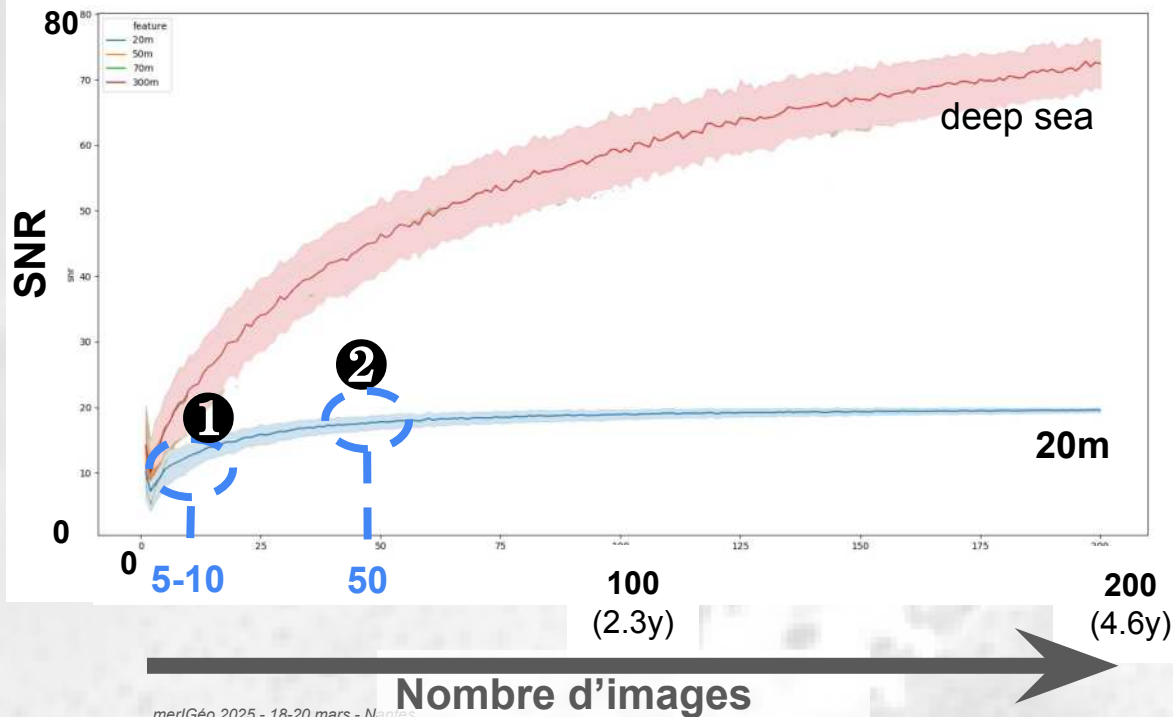
$$= \frac{\text{Mean}}{\text{SD}}$$

## Analyse des résultats #2

Quelle est la profondeur maximale atteignable ?

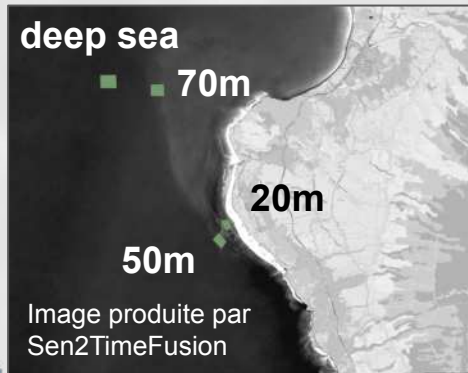
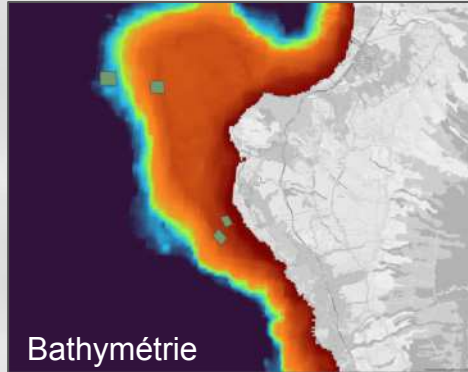


- 1 A 20 m profondeur,  $\approx$  5-10 images nécessaires pour discriminer un fond hétérogène par rapport à la mer profonde
- 2 Qualité donnée  $\Rightarrow$  Le SNR se stabilise à partir de  $\approx$  50 images (1 an de données)

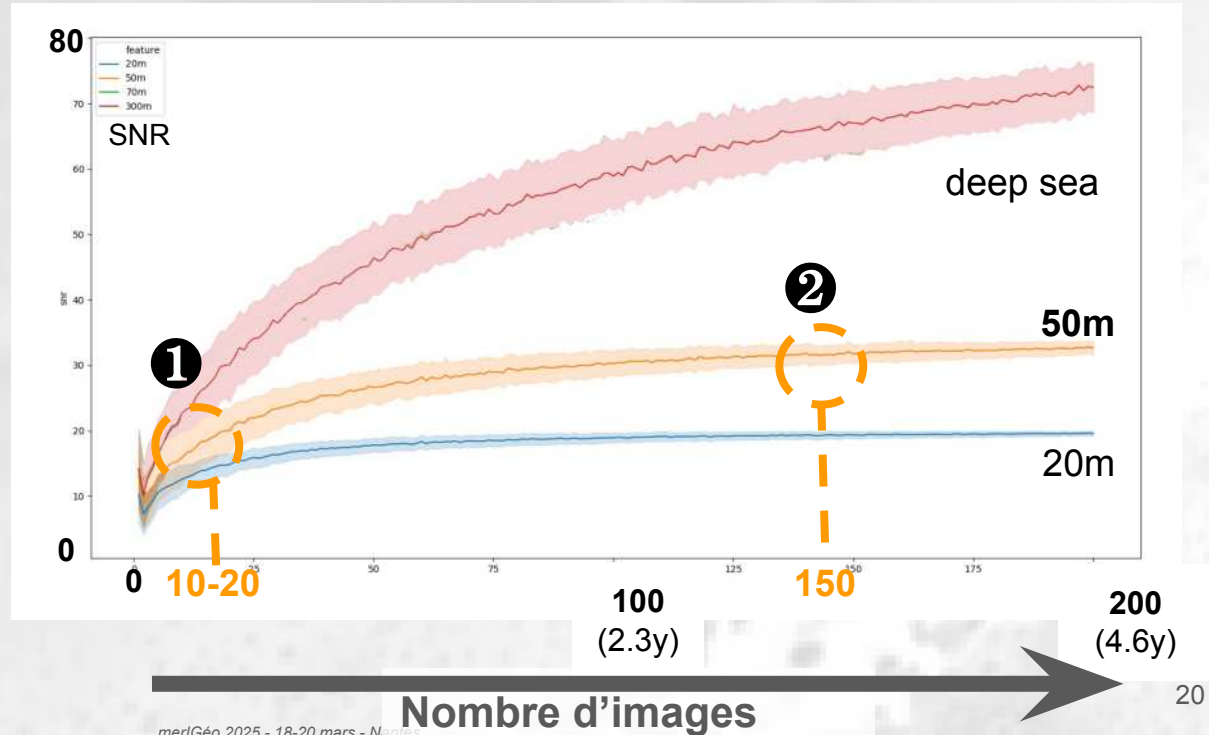


## Analyse des résultats #2

### Quelle est la profondeur maximale atteignable ?



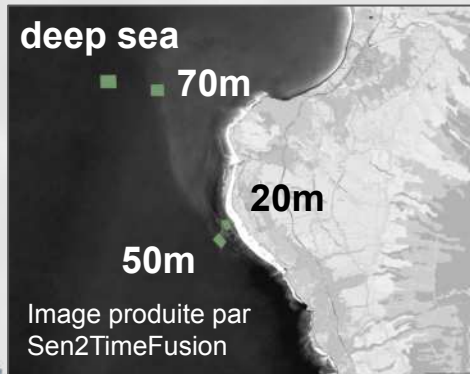
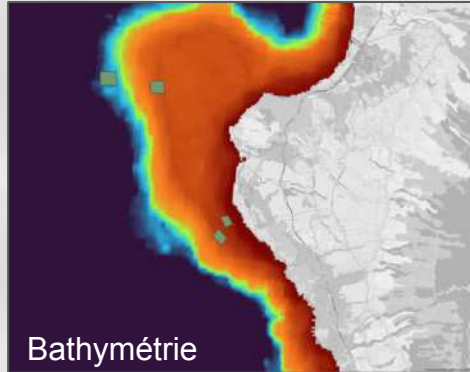
- 1 A 50 m profondeur,  $\approx$  10-20 images nécessaires pour différencier la zone de fond hétérogène de la mer profonde
- 2 Qualité donnée  $\Rightarrow$  Le SNR ne se stabilise pas avant  $\approx$  150 images (+3 ans d'acquisition)



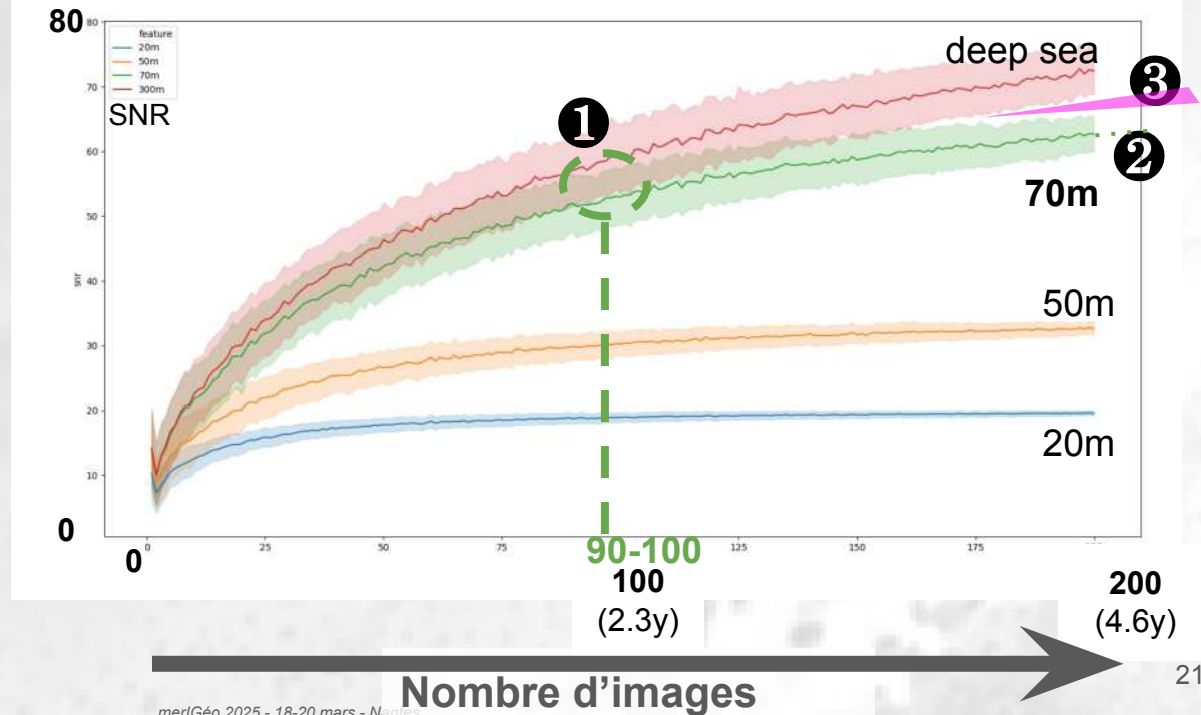


## Analyse des résultats #2

### Quelle est la profondeur maximale atteignable ?



- 1 A 70 m profondeur,  $\approx 100$  images nécessaires pour distinguer la zone de fond hétérogène de la mer profonde
- 2 La qualité de l'image continue de s'améliorer après +200 images ( $\approx 5$  ans d'acquisition), plateau non atteint
- 3 Il y a encore de la place pour aller plus profond ?!



## Analyse des résultats #3

Nombre minimum d'images et temps nécessaires pour atteindre la qualité d'image du fond optimale en fonction de la profondeur et la zone géographique

### Régions moins nuageuses

Profondeur	Nb images		Sesel 40MCV	Réunion 40KCB	Glorieuses 38LQN	Rodrigues 41KNU
		% images (< 25% cld cover)	56%	60 %	66%	72%
5 m	40	Images	71	67	61	56
		Time (months)	12	11	10	9
15 m	60	Images	107	100	91	83
		Time (months)	18	11	15	13.5
30 m	90	Images	161	150	136	125
		Time (years)	2.2	2	1.9	1.7
40 m	130	Images	232	217	197	180
		Time (years)	3.2	3	2.7	2.5
50 m	> 170	Images	304	283	258	236
		Time (years)	4.2	3.9	3.5	3.2
Deep sea	> 200	Images	357	333	303	278
		Time (years)	4.9	4.6	4.2	3.8

# Cartographie des habitats récifaux dans le SWIO

Exemples d'exploitation des **images optiques des fonds marins en profondeur** (> 20m bathymétrie), pour la **cartographie des zones récifales** dans le sud-ouest de l'océan Indien (notamment données issues **campagnes Litto3d / hyperspectrales** 2009-2010)

### ❖ La Réunion

- Cartographie des **habitats des récifs coralliens** de La Réunion (*Nicet et al., 2016*)
- Première carte et atlas de la **géomorphologie sous marine côtière** (0-30m) de l'île de La Réunion (*Nicet & Mouquet, 2019 ; Nicet et al. 2022*)
- Prédiction de la **distribution des tortues marines** (*Chambault et al., 2021*)
- Détection de **changement sur l'état des récifs coralliens** (Bajjouk et al., 2019)
- Impact des anomalies du niveau marin sur les récifs coralliens (Hoarau et al., 2023)

### ❖ îles Eparses

- Cartes de la **géomorphologie marine** des zones récifales de Bassas da India, Juan de Nova, Tromelin (Nicet & Mouquet, 2023 ; 2024)
- Conservation des **herbiers de phanérogames marines** du Parc naturel marin des Glorieuses (Ballorain et al., 2019 )
- Étude des **Peuplements Ichtyologiques** et des CommUnautés RécifalEs des bancs du Geyser, de la Zélée, et Iris (Roos et al., 2017)

### ❖ Mayotte

- Cartographie des **habitats marins** de Mayotte (Dupont et al., 2020)

## Application #1

# Cartographie des habitats

Algueraies profondes d'*Halimeda* sp., 30-45m, Banc du Geyser

Algues vertes calcaires ("Sable d'*Halimeda*")

⇒ Contribution positive au bilan des carbonates du récif

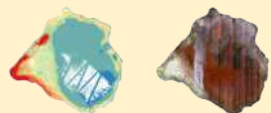


*Halimeda* sp., Glorieuses, 2009.  
Litto3D / Spectrhabent-OI



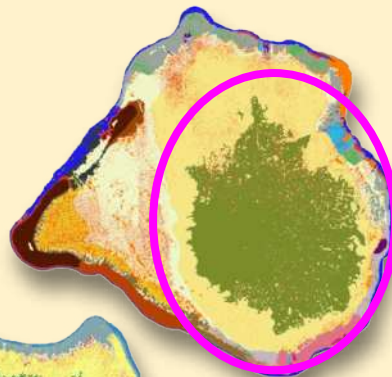
Roos D. et al. (2017). *Projet EPICURE*

<https://doi.org/10.13155/54549>



- *RS Data* (2009)
  - *HS sea bottom images*
  - *Lidar bathymetry*

- *In situ data* (2014)
  - *Diving*
  - *Video*



Dupont, P. et al. (2016). *Cartographie des habitats des récifs coralliens des bancs du Geyser, de la Zélée (couche Sextant)*

<https://doi.org/10.12770/21232c12-e409-4136-a24a-78c346518cfa>

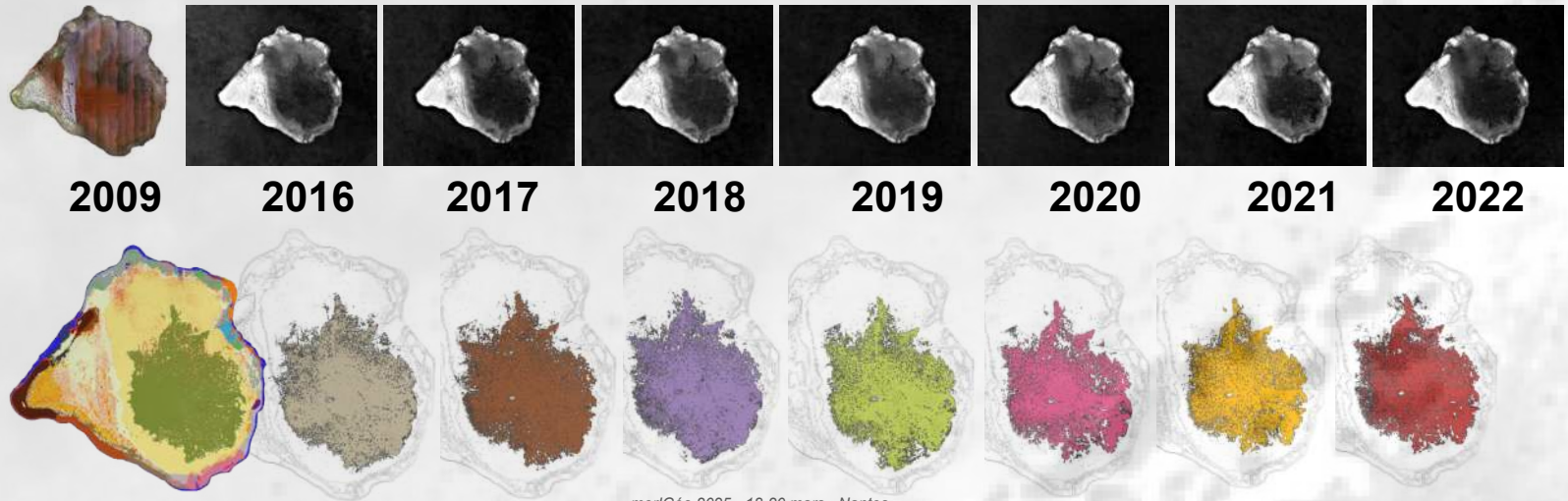


# Cartographie des habitats et suivi temporel

➤ Calcul des images Sen2Timefusion sur 7 années (2016 - 2022) :

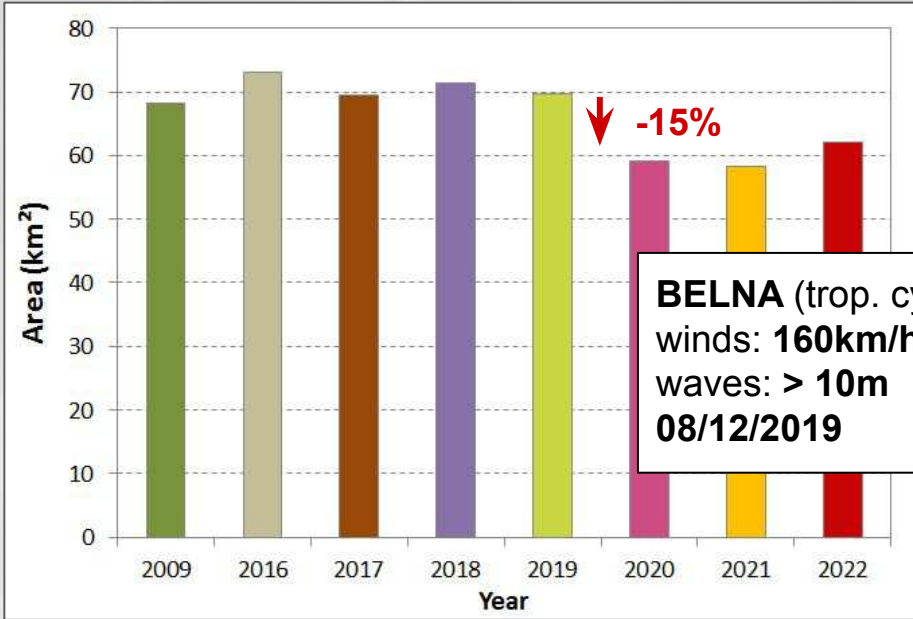
- ❖ 525 dates
- 2016 - 48 dates
  - 2017 - 65 dates
  - 2018 - 91 dates
  - 2019 - 88 dates
  - 2020 - 99 dates
  - 2021 - 93 dates
  - 2022 - 41 dates

⇒ Cartographie des algues *Halimeda*



# Cartographie des habitats et suivi temporel

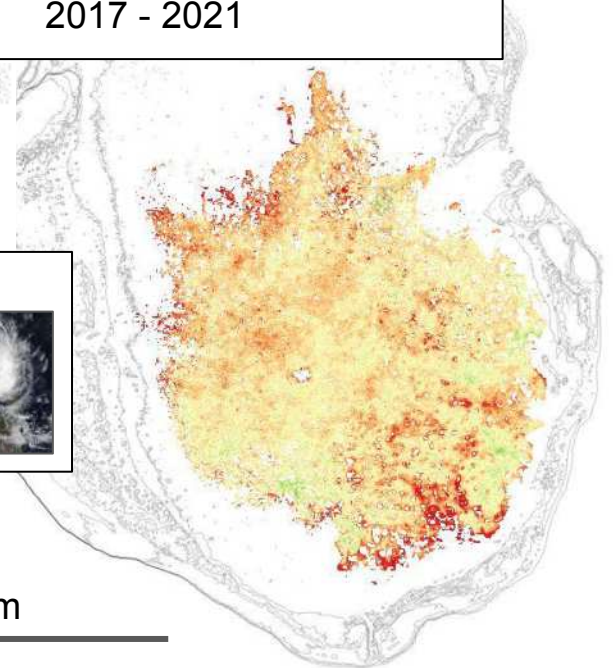
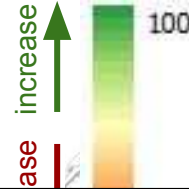
Estimation et suivi des surfaces dans le temps



**BELNA** (trop. cyclone cat. 2)  
winds: **160km/h**  
waves: **> 10m**  
**08/12/2019**



Localisation des changements de couverture algale 2017 - 2021



# Estimation de la bathymétrie (SDB)



## Données utilisées :

- DEM HOMONIM (Shom) 100m résolution spatiale
- Image Sen2TimeFusion Réunion - 40KCB  
20/10/2015 - 30/01/2025 (355 images)
  - 4 bandes spectrales :
    - B1 (deep blue) - 60 m - 194 img
    - B2 (bleu) - 10 m - 355 img
    - B3 (vert) - 10 m - 355 img
    - B4 (rouge) - 10 m - 355 img
  - 6 rapports bandes :
    - B2/B1 B3/B1 B4/B1
    - B3/B2 B4/B2
    - B4/B3

Méthode d'estimation de la bathy :

Random Forest regression model ([Scikit-learn](#) Python)

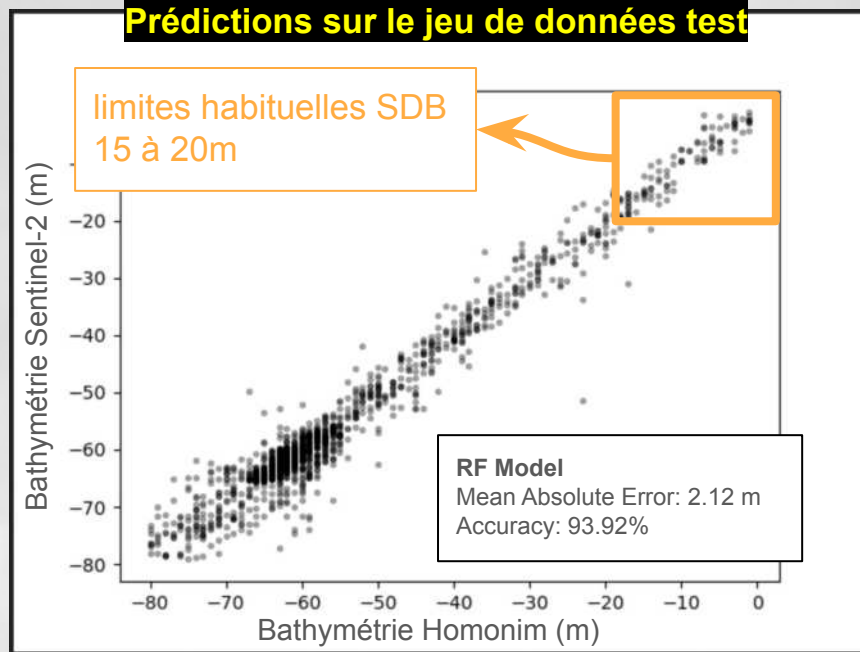
Données 75% entraînement / 25% test

Limite est. bathy -80m

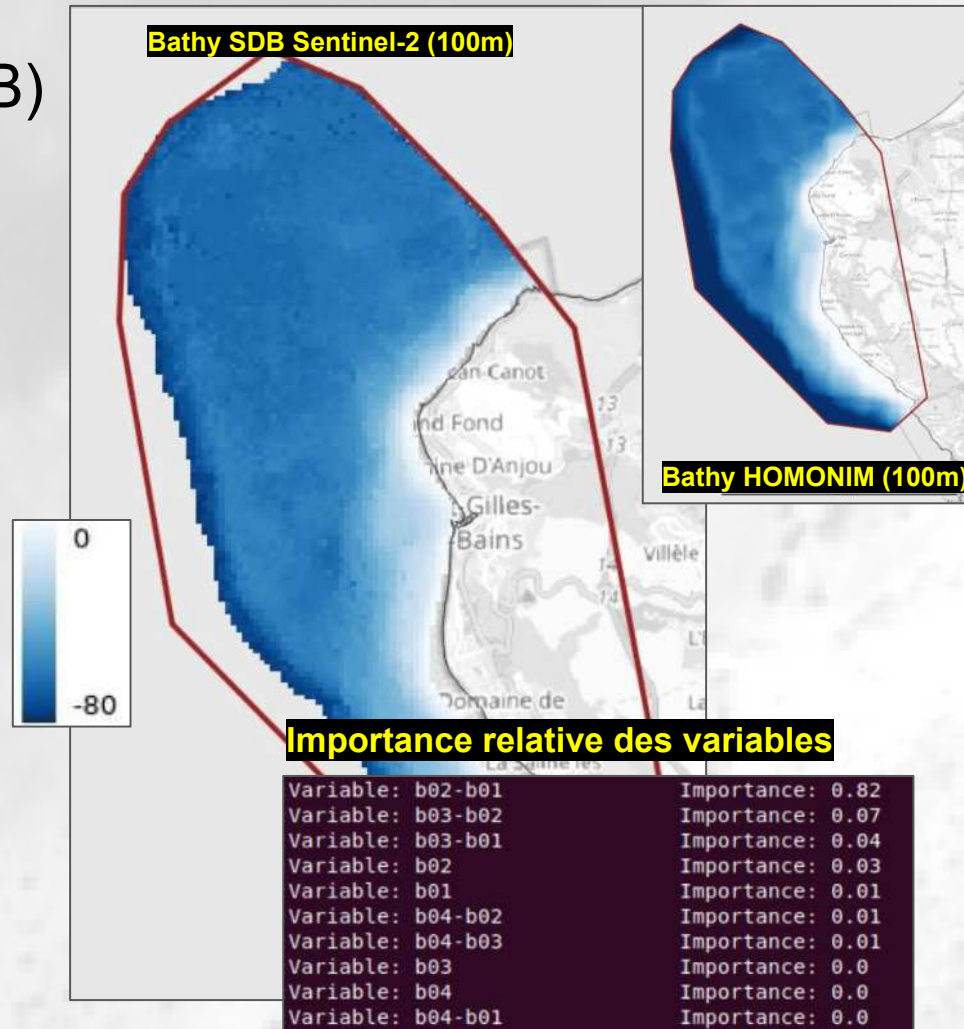


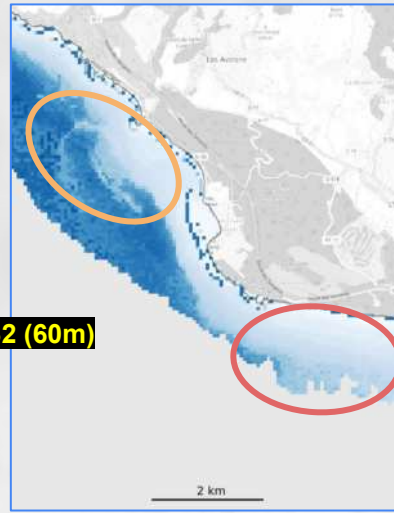
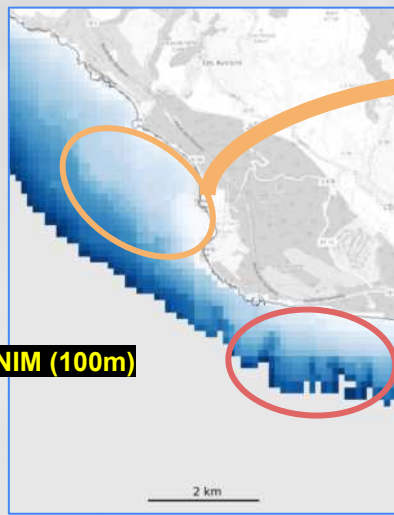
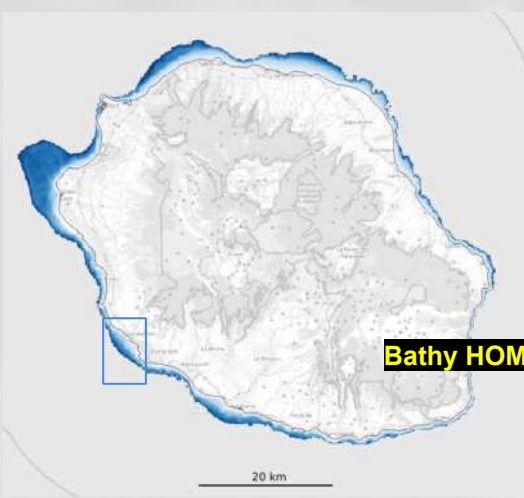
# Estimation de la bathymétrie (SDB)

## Prédictions sur le jeu de données test



## Bathy SDB Sentinel-2 (100m)





Application du modèle 100 m  
à différentes résolutions S2  
60 m / 10 m



# Conclusions & perspectives

## ➤ **Sen2TimeFusion:**

### **Production de nouvelles images et données sur les fonds marins**

- Indépendantes des conditions d'acquisition (mer, météo, etc.)
- **Au delà de -20m, jusqu'à -70m (+?)** de hauteur d'eau (upper mesophotic zone)
- **Nombre d'images** nécessaires dépend des objectifs (**profondeur cible**)
- **Bande bleue** offre la meilleure pénétration pour les images des fonds (mais autres bandes indispensables pour estimation de bathy ou autres paramètres)
- Possibilité d'aggrégations des images sur différentes **périodes temporelles** (année, saison, etc.) pour **détecter les changements**

⇒ Amélioration des connaissances sur les fonds marins récifaux à large échelle

- ## ➤ Données de base intégrées dans des projets / outils permettant des **suivis opérationnels** / détection de changement / systèmes d'alerte (Projet BioEOS, BRIDGES ?)



# Conclusions & perspectives

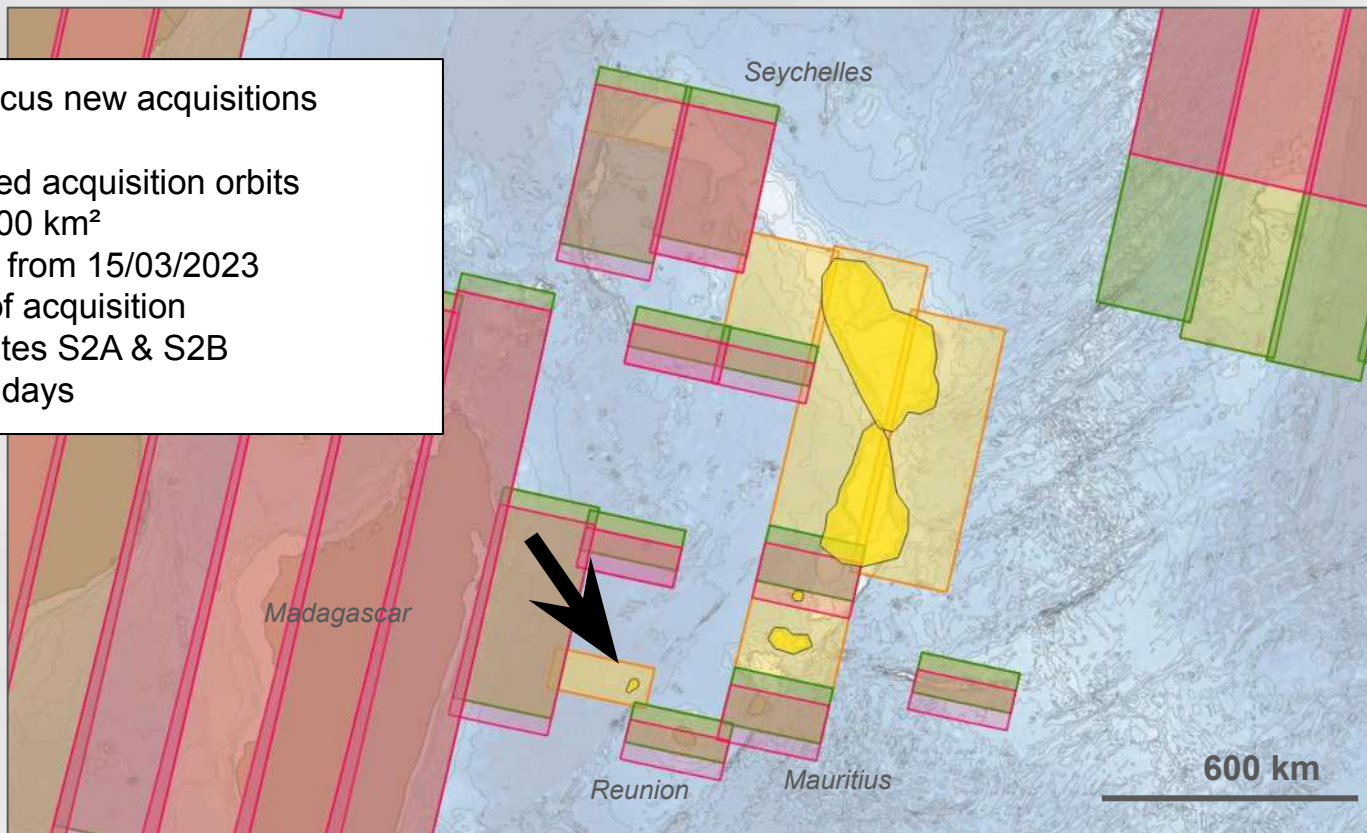
- Algorithmes toujours en cours de développement & améliorations (détection turbidité / bathy / etc.)
  - Ouverture plateforme GIT et mise à disposition des codes Python
  - **Automatisation et production opérationnelle** à large échelle dans le SWIO
  - **Bancarisation** en contexte de production opérationnelle de volumes importants de données / métadonnées (Data Terra / Odatis)
- ⇒ **Mise à disposition outils et des données traitées dans le SWIO et +**

## Bonus #1

# Updated Sentinel-2 acquisition plan in SWIO

### ESA / Copernicus new acquisitions

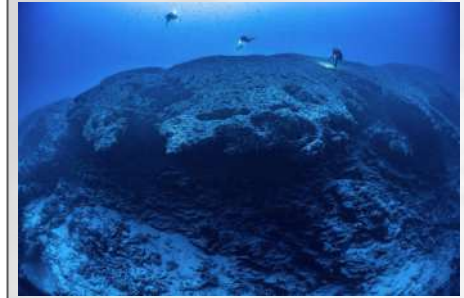
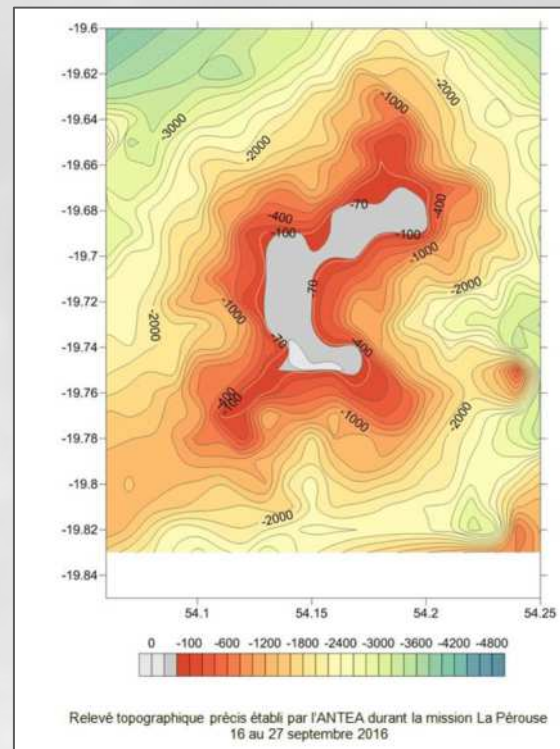
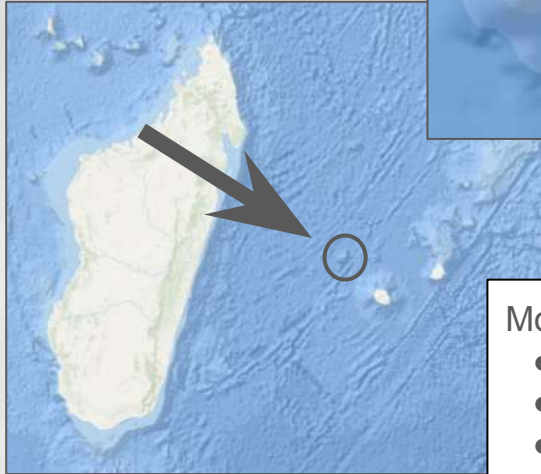
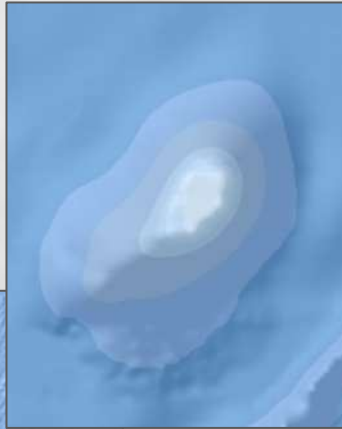
- 4 updated acquisition orbits
- + 690,000 km<sup>2</sup>
- Starting from 15/03/2023
- 1 year of acquisition
- 2 Satellites S2A & S2B
- every 5 days



## Bonus #1

# Mont La Pérouse (-58m)

Données  
bathymétriques  
ESRI / GEBCO



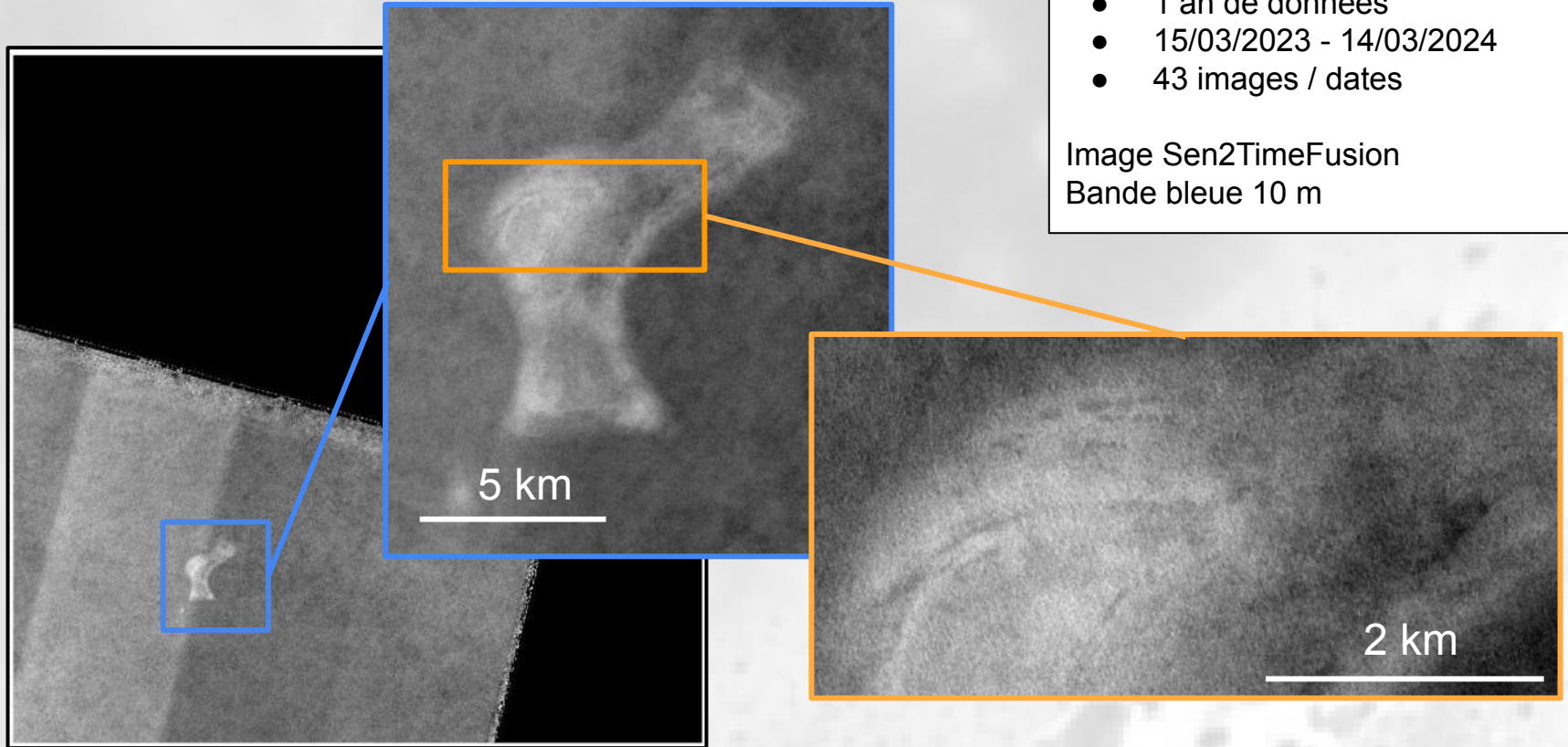
L. Ballesta (2019)

### Mont La Perouse

- 180 km NO Réunion
- Plaine abyssale à plus de 4000m de profondeur
- Plateforme 13 km x 2.7 km
- Le point le plus élevé -58,1 m sous la surface



# Mont La Pérouse (-58m)



# Application en Méditerranée (Hyères - Porquerolles)



## Image Google Earth

- LandSat
- Pleiades
- Maxar

# Application en Méditerranée (Hyères - Porquerolles)

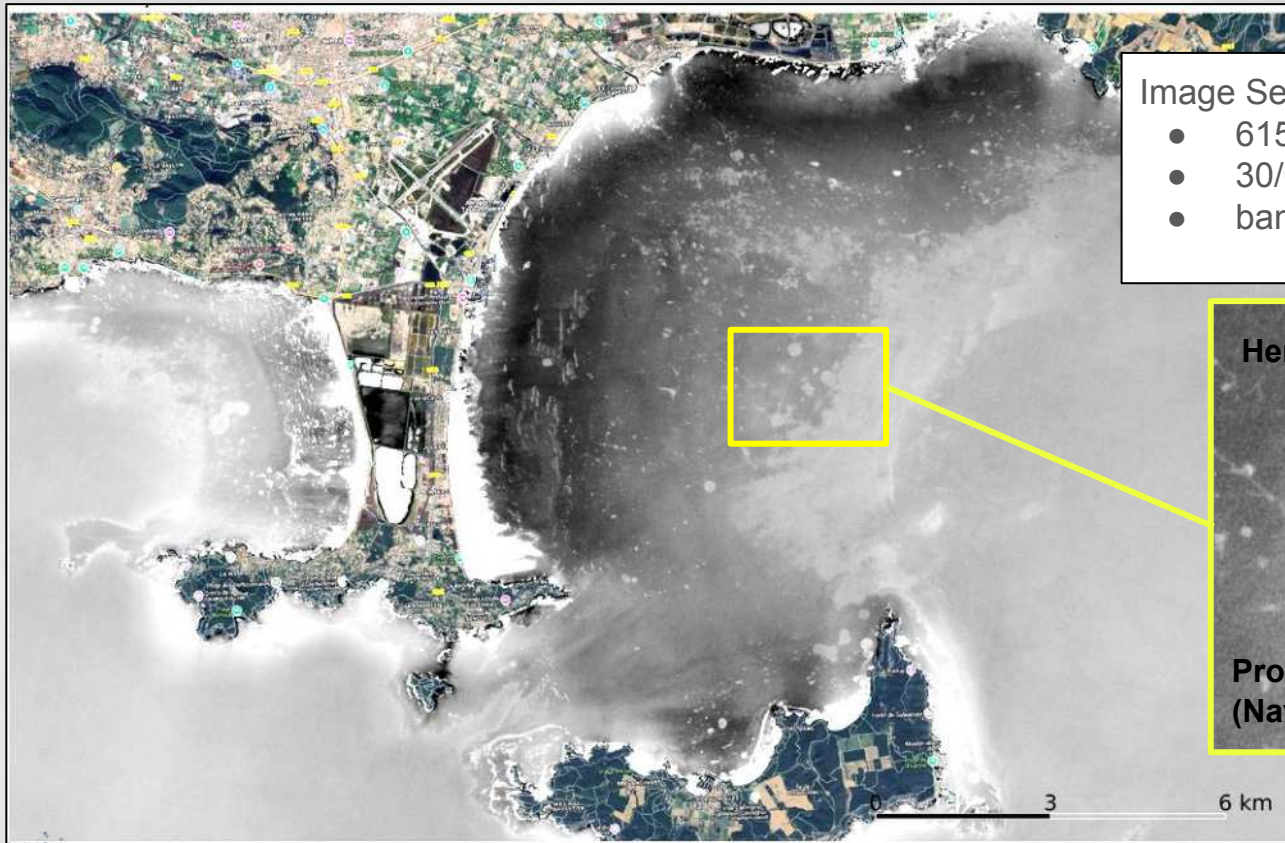



Image Sen2TimeFusion

- 615 images Sentinel-2
- 30/07/2015 et 16/11/2024)
- bande bleue

**Herbier à Posidonies**

**Profondeur moyenne : 25 - 30 m**  
(Navionics / Garmin)





Le Constant Bank  
Seychelles  
Bathymetry: -40m/-20m

**Merci pour votre attention**  
**Questions ?**

[pascal.mouquet@ird.fr](mailto:pascal.mouquet@ird.fr)

2km

37