ASTROLABE EXPEDITIONS

ENSTA IP PARIS

Observer l'environnement marin avec un GPS

Comment des instruments simples et maintenant peu coûteux nous aident à mieux comprendre l'environnement marin ?

Café océan

Mardi 31 mars 2026
Atelier des Capucins

LES ATELIERS DES CAPUCINS BREST melting place

Pierre BOSSER
Clémence CHUPIN

Odilon Joel HOUNDEGNONTO
Gaétan de KAT



Votre équipage pour ce soir...

Pierre Bosser

Enseignant-chercheur en géodésie et positionnement - spécialiste en GNSS et télédétection





Clémence Chupin

Enseignante-chercheuse en métrologie marine - spécialiste en altimétrie, métrologie et traitement GNSS

Odilon Joel Houndegnonto

Docteur en océanographie physique et environnement - Post-doctorant spécialiste du GNSS-IR







Gaétan de Kat

Ingénieur hydrographe-océanographe - spécialisé en océanographie côtière



Au programme…

Océan & environnement marin

Qu’est-ce que le GNSS ?

Le GNSS pour l’observation de l’océan

1. Suivre le niveau de la mer et valider les observations satellites
2. Suivre la vapeur d'eau atmosphérique
3. Observer la surface marine avec les signaux réfléchis

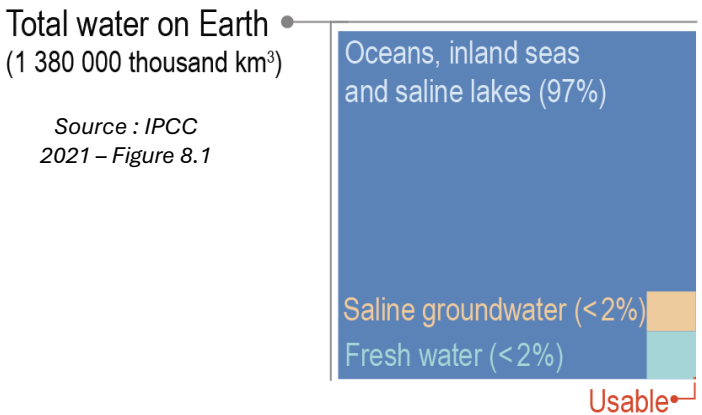
Bilan & temps d’échange



Océan & environnement marin

Une planète bleue

Les océans couvrent 71% de la planète et contiennent 97% de l'eau sur Terre.



Source : IPCC 2021 – Figure 8.1



Biodiversité
Régulation du climat

Alimentation, santé, énergie et matières premières (pétrole, gaz, etc.), transport maritime, etc.

~ 11 % de la population mondiale vit dans des zones côtières de faible altitude (< 10 m)
[Merkens et al., 2016]

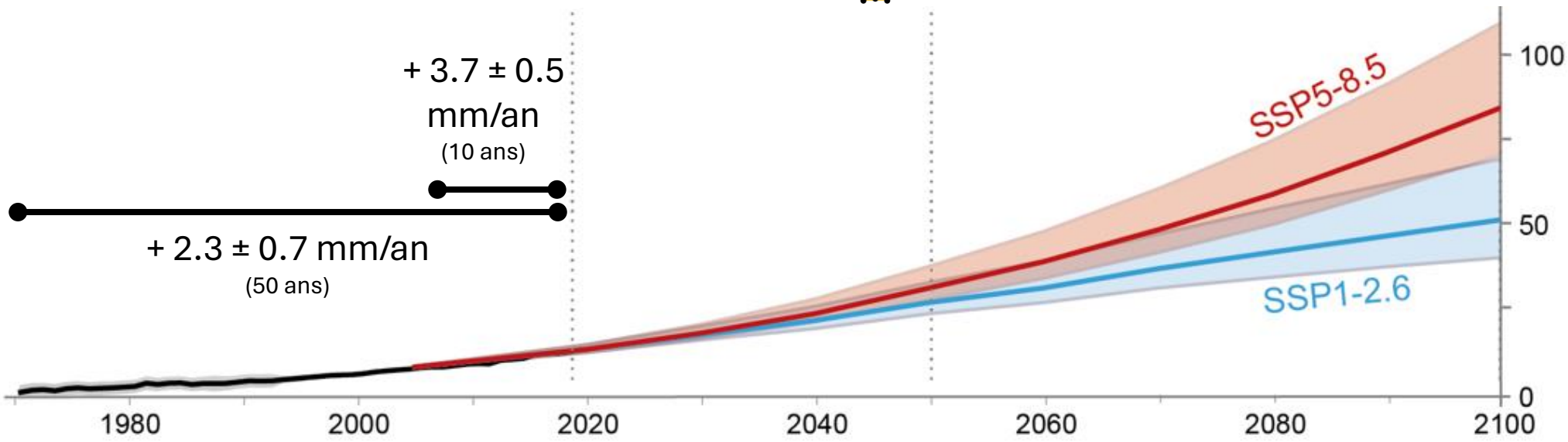
Augmentation du niveau moyen des océans [IPCC, 2021]

Accélération

+ 3.7 ± 0.5 mm/an (10 ans)

+ 2.3 ± 0.7 mm/an (50 ans)

Plusieurs scénarios possibles…



SSP5-8.5

+ 15-20 mm/an

SSP1-2.6

+ 3-8 mm/an

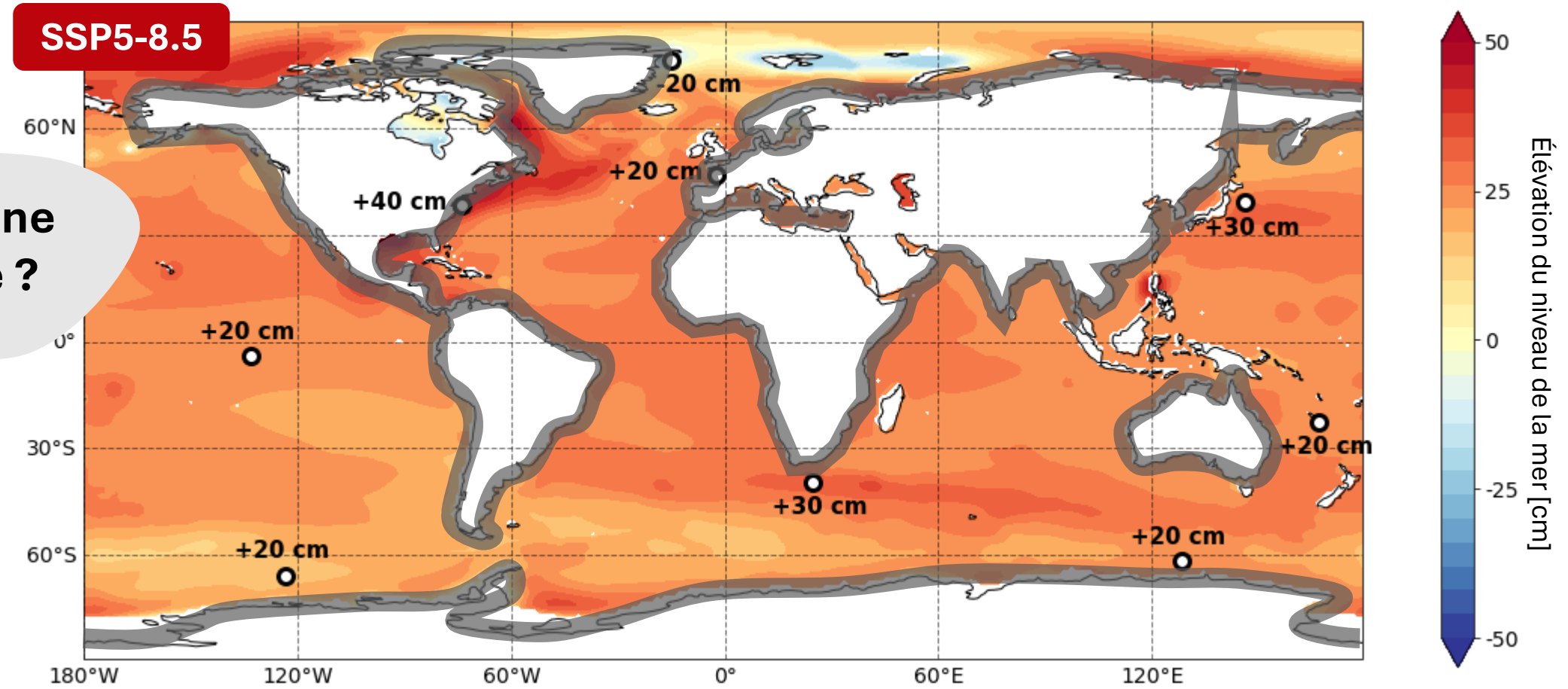
Variation du niveau moyen global des océans par rapport à l'année 1971

Source : IPCC 2021 – The Physical Science Basis – FAQ 9.1

Augmentation du niveau moyen des océans [IPCC, 2021]

↪ **Variabilité régionale +/- 20 % par rapport au niveau global**

Et en zone côtière ?



Elévation du niveau global des océans selon le scénario SSP5-8.5 pour la période [2041-2060] par rapport à la période [1995-2014]

Source : IPCC 2021 – InteractiveAltas – Dataset CMIP6

Augmentation du niveau moyen des océans [IPCC, 2021]

↪ Multitude de processus impactant les variations du niveau de la mer

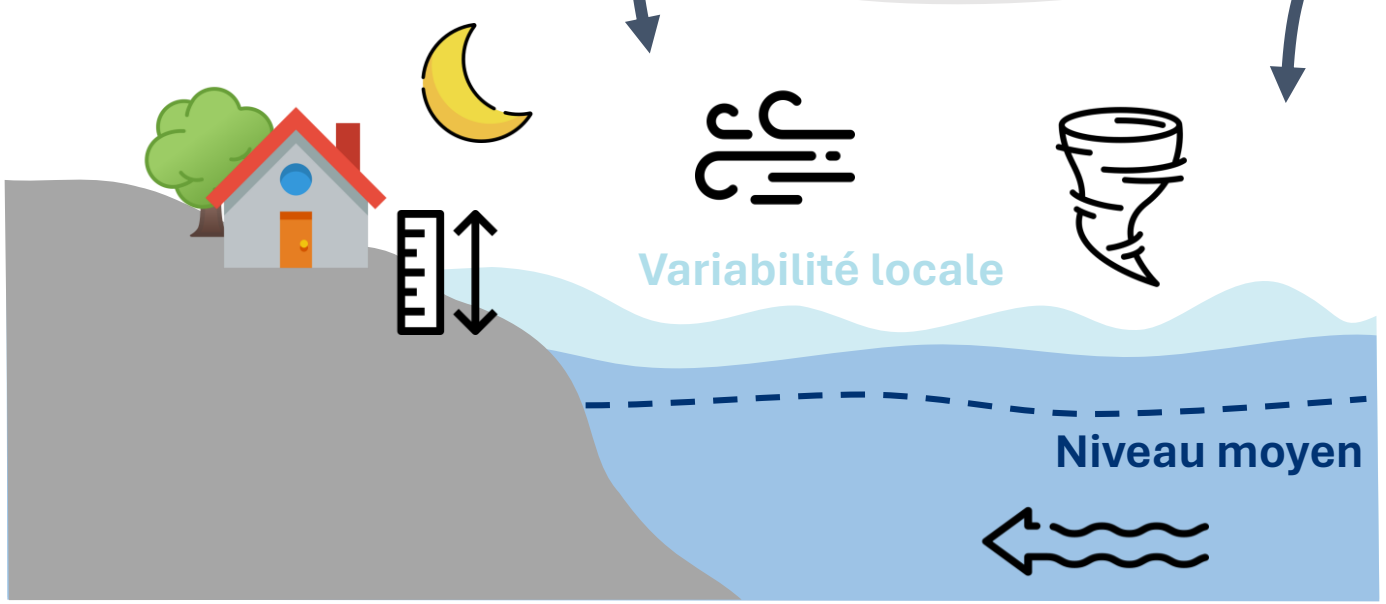
Processus locaux

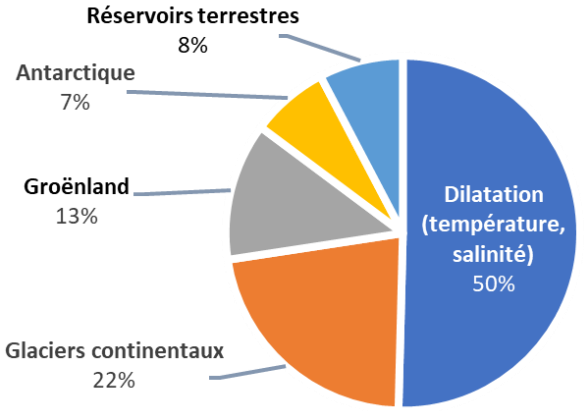
Marée
Pression atmosphérique
Tempête
Vent
Vagues
Subsidences locales
...

Processus régionaux

Changement des dynamiques océaniques et atmosphériques (courants, vents...), ...

Processus globaux





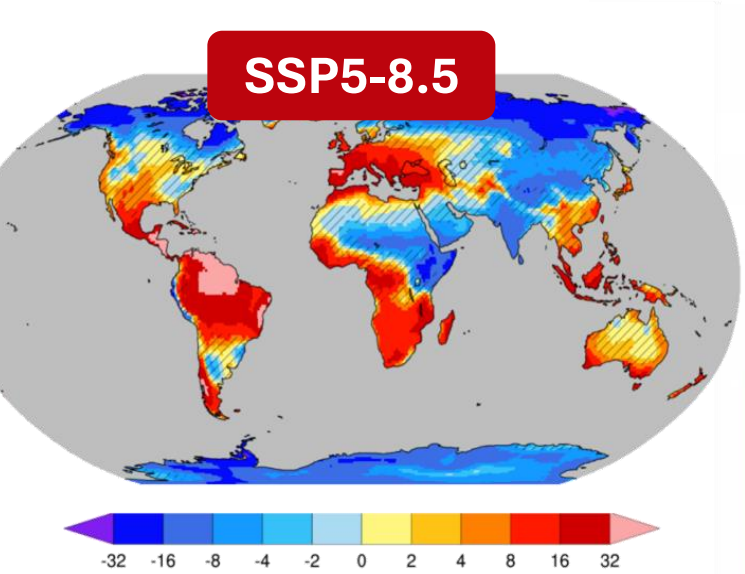
Principales contributions à l'élévation du niveau global des océans sur la période [1971-2018]

[IPCC, 2021]

Modifications du cycle de l'eau [IPCC, 2021]

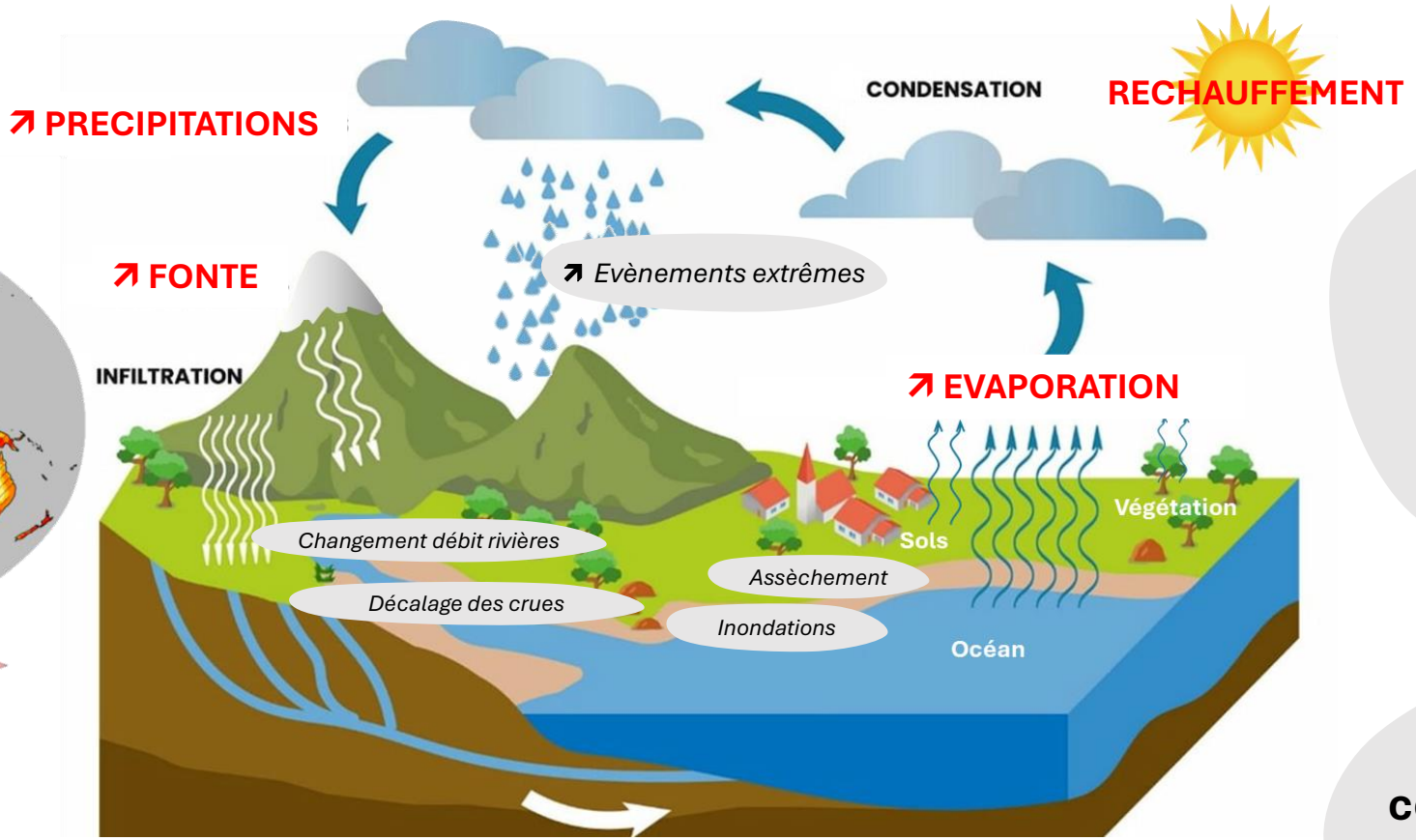
↪ Changement climatique perturbe le cycle de l'eau en l'intensifiant

Pluies plus intenses mais mal réparties



Evolution du nombre de jour de pluie / an

Hachure = modèles moins en accords
Source : IPCC 2021 – The Physical Science Basis – Figure 8.15



Un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau

+7% humidité / degré
Relation de Clausius-Clapeyron

Impacts complexes et interconnectés

Pourquoi observer l'océan ?

Observations globales et locales précises → Évaluer et séparer les processus océaniques et atmosphériques → Comprendre leurs interactions → Modéliser leur évolution → Prendre des mesures

<u>Exemple :</u>
Adapter les mesures de protection sur le littoral



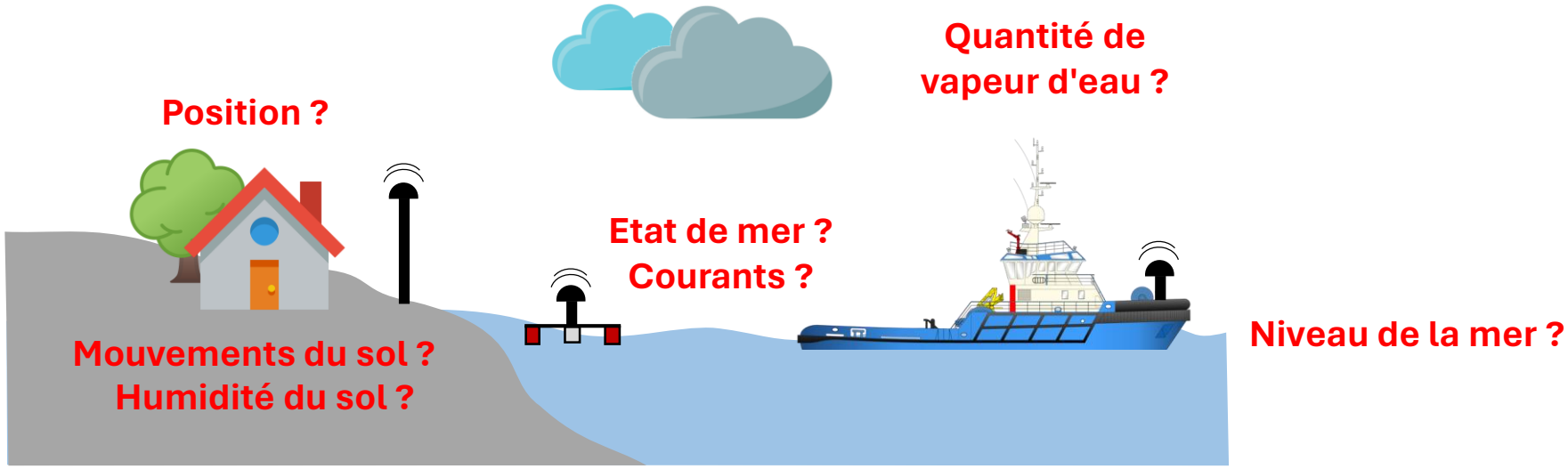
Pourquoi observer l'océan ?

Observations globales et locales précises

Évaluer et séparer les processus océaniques et atmosphériques → Comprendre leurs interactions → Modéliser leur évolution → Prendre des mesures

Exemple :
Adapter les mesures de protection sur le littoral

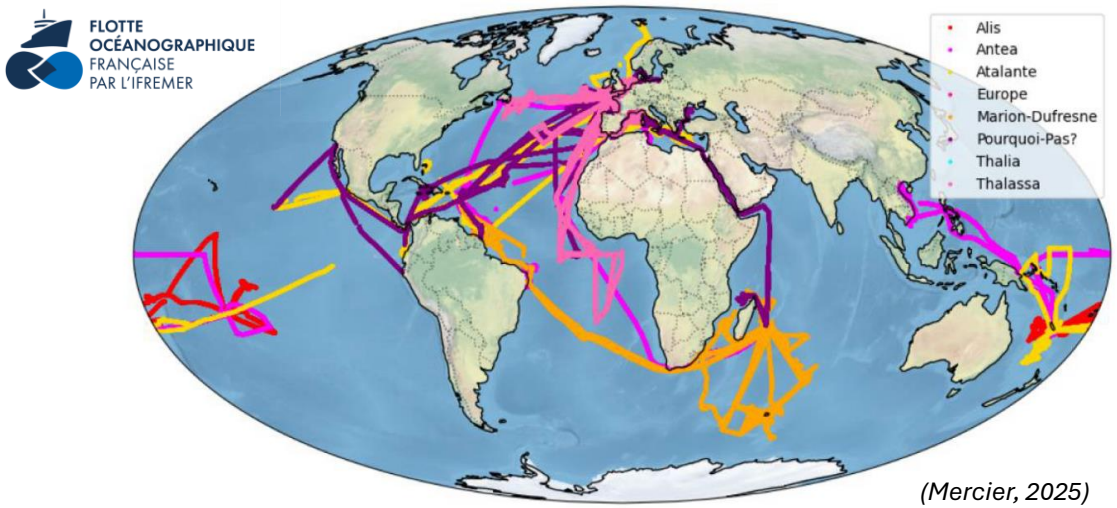
Systèmes GNSS



Vers des systèmes d'observation frugaux

Mesures d'opportunité

Couverture spatiale des données GNSS issues des navires FOF [2015 –2024]



(Mercier, 2025)



Antenne GNSS sur le Marion-Dufresne

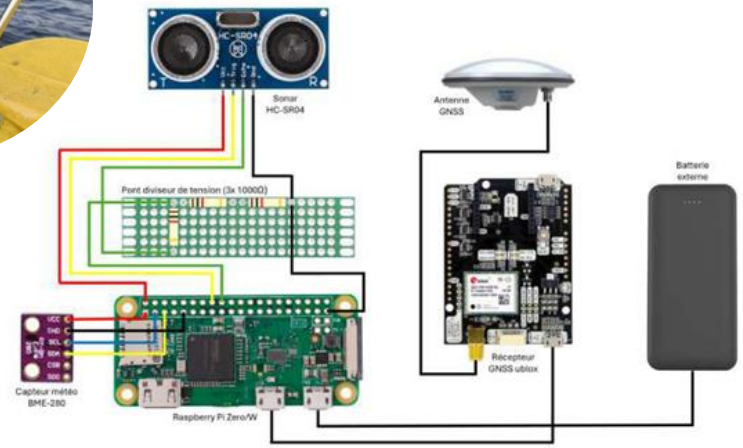
- ✓ Matériel simple à installer et/ou déjà à bord
- ✓ Optimisation des campagnes en mer en retraitant des observations existantes
- ✓ Couverture de zones moins accessibles

Low cost



Systèmes GNSS & altimètre acoustique développé à l'ENSTA lors des projets Guerlédan

Architecture matérielle du système



Credits : S. Ridel

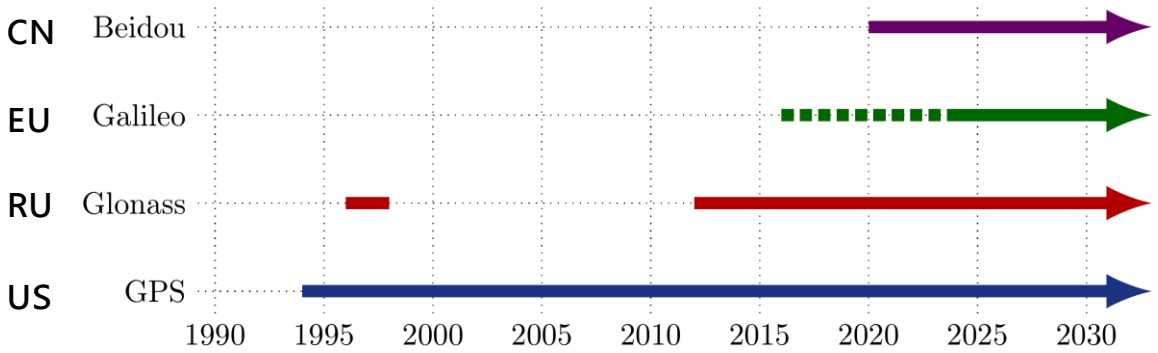
- ✓ Peu coûteux
- ✓ Systèmes simple, réparables et réplicables
- ✓ Augmente les possibilités de déploiement dans des zones ayant peu de moyens d'observation



Qu’est ce que le GNSS ?

Principes de base du positionnement GNSS

↪ **GNSS (Global Navigation Satellite System)** : ensemble des constellations de satellites permettant un positionnement n'importe où sur la planète

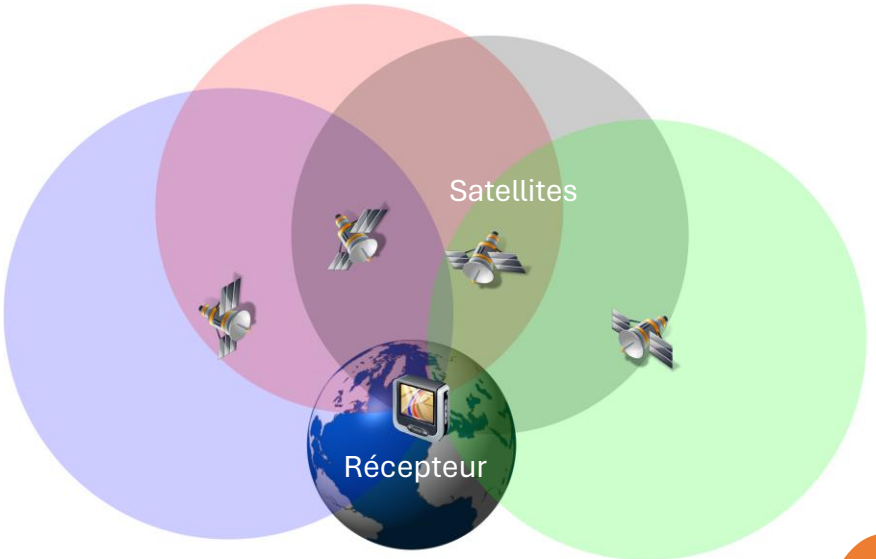


- Environ 120 satellites GNSS à 20 000 km au-dessus de la Terre
- Près de 20 satellites sont visibles depuis n'importe quel point
- Chaque satellite embarque plusieurs horloges atomiques (en redondance) pour émettre des signaux datés et précis à une fréquence de 1.5 GHz

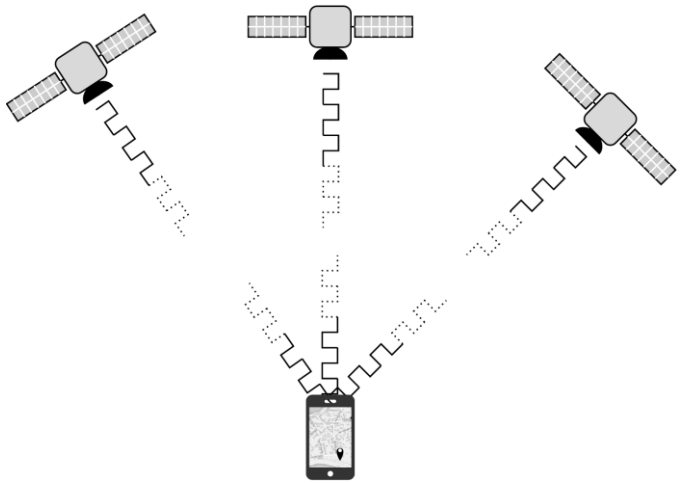
Comment un GNSS trouve sa position (*x, y, z*) ?

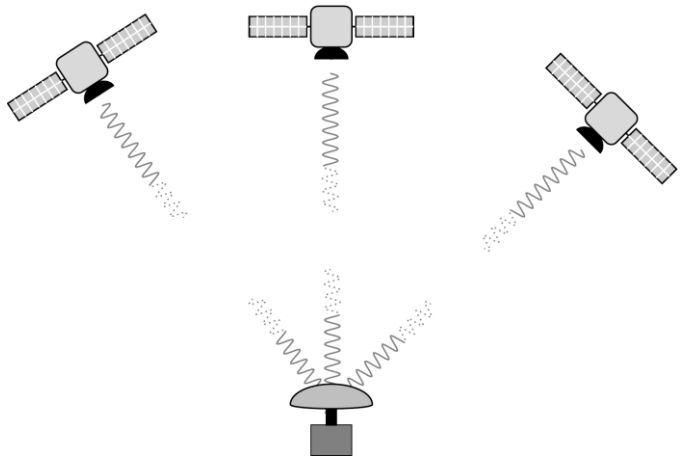
- Les satellites émettent des signaux mesurés par le récepteur
- Le récepteur mesure le temps de trajet du signal
- La distance à chaque satellite est déduite via la vitesse de la lumière
- Mais, le récepteur n'a pas une horloge parfaite : désynchronisation

Il faut **au moins 4 satellites**, pour trouver la position (x, y, z) et l'erreur d'horloge (Δt)



Comment mesurer le temps de propagation du signal?





Code de synchronisation

- Mesure native des GNSS, simple, robuste et efficace !
- Distances déduites avec une incertitude de quelques mètres
- Position avec une **incertitude métrique**
- C'est ce que fait votre smartphone ou votre "GPS" auto !

Phase du signal

- Mesure détournée du signal, précise mais plus sensible !
- Distances déduites avec une incertitude de quelques millimètres
- Position avec une **incertitude centimétrique / millimétrique**
- Utilisation pour l'aménagement, les sciences de la Terre, etc.

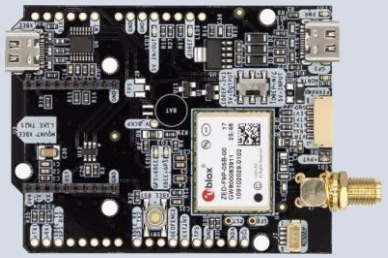
Quel matériel GNSS pour une détermination précise de la position ?

Un récepteur pour les analyser

- 150 à 15 000 €
- Doit fonctionner en continu pour assurer la qualité des mesures de phase
- Permet l'archivage des données, la diffusion en temps réel, le calcul de positions







Une antenne pour capter les signaux

- 50 à 15 000 €
- À déployer dans un environnement dégagé pour voir le maximum de satellites
- Passive, sensible aux perturbations













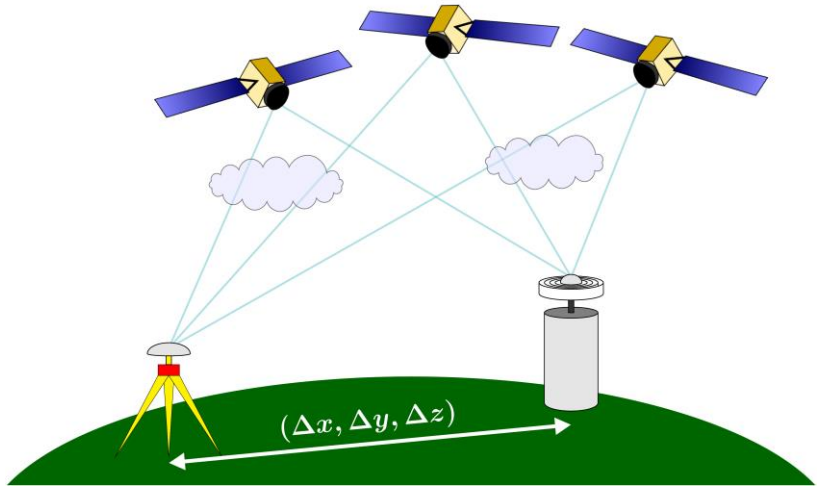


Quelles stratégies de mesure pour un positionnement précis ?

Positionnement relatif (ex. : RTK)

→ Utilisation d'antennes fixes (réseau de référence)
→ Comparaison aux mesures de l'antenne mobile, pour éliminer les erreurs communes

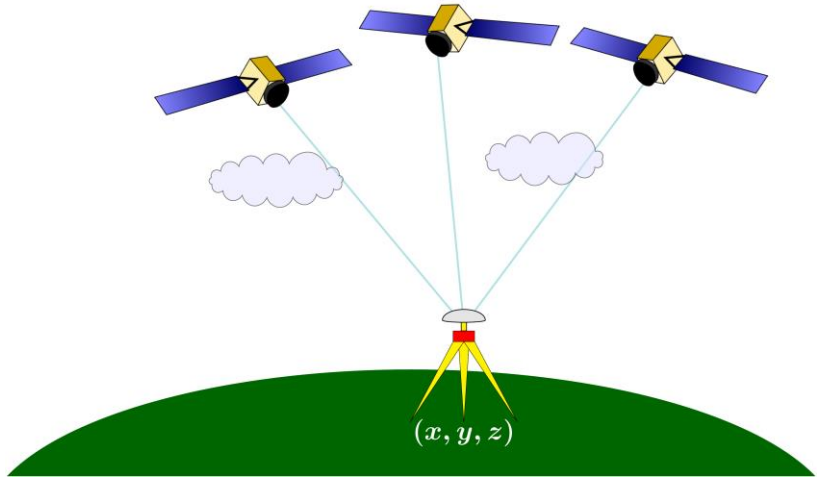
😊 Méthode **fiable**, rapide et **très précise** (mm – cm)
😟 Nécessite des antennes permanentes proches



Positionnement absolu (ex. : PPP)

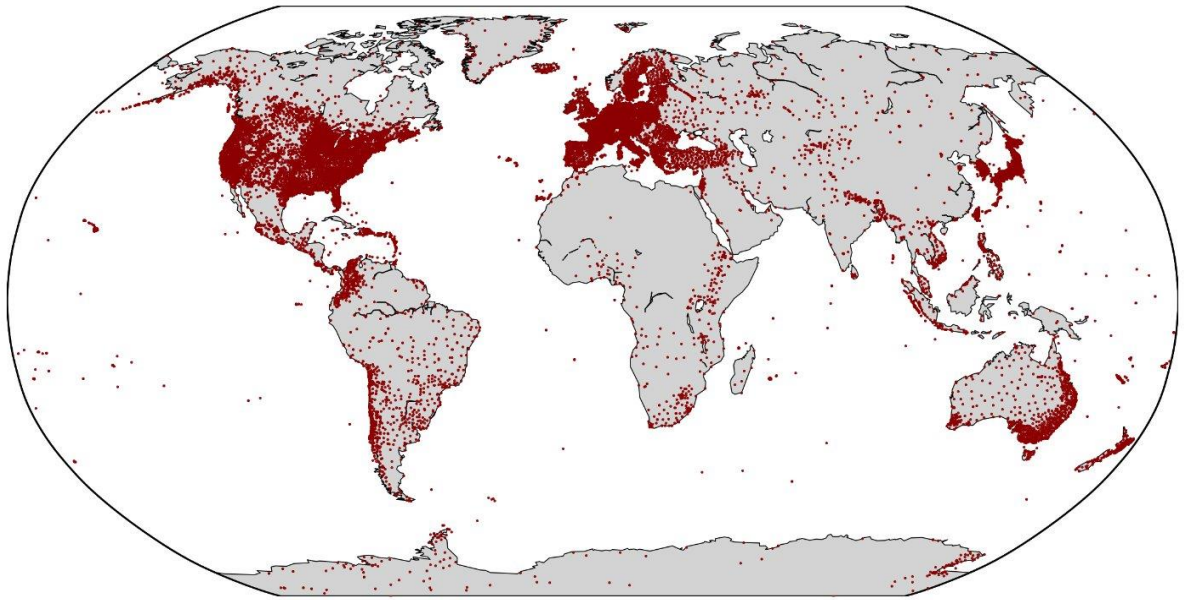
→ Calcul de la position directement par rapport aux satellites

😟 Méthode plus **complexe**, surtout en temps réel, nécessitant de connaitre précisément la position des satellites
😊 Méthode précise si tout est bien modélisé (mm – dm), plus adaptée pour les **antennes isolées**

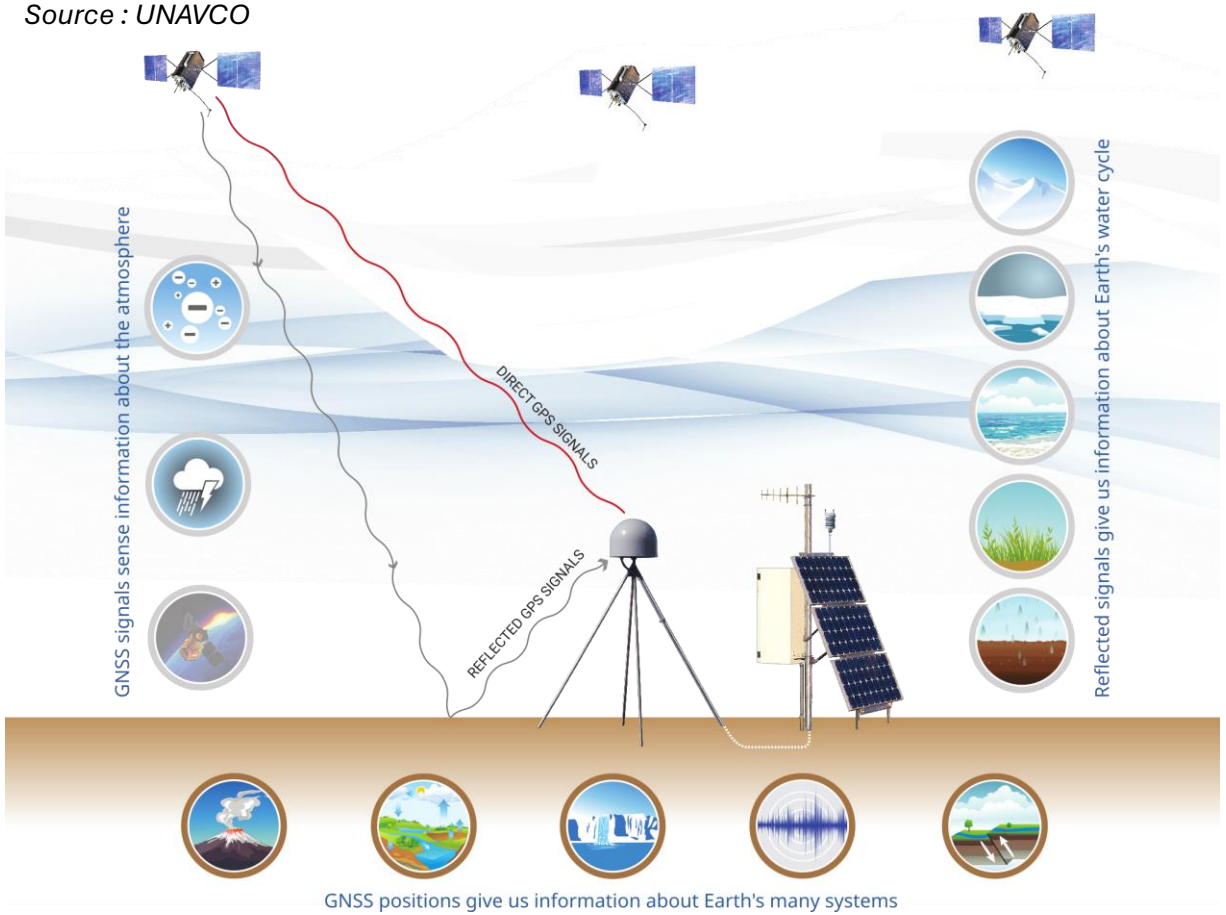


Quelles applications ?

↪ Développement de **réseaux d'antennes permanentes** pour des applications professionnelles et scientifiques, avec une large variété d'utilisations en géosciences depuis les années 1990.



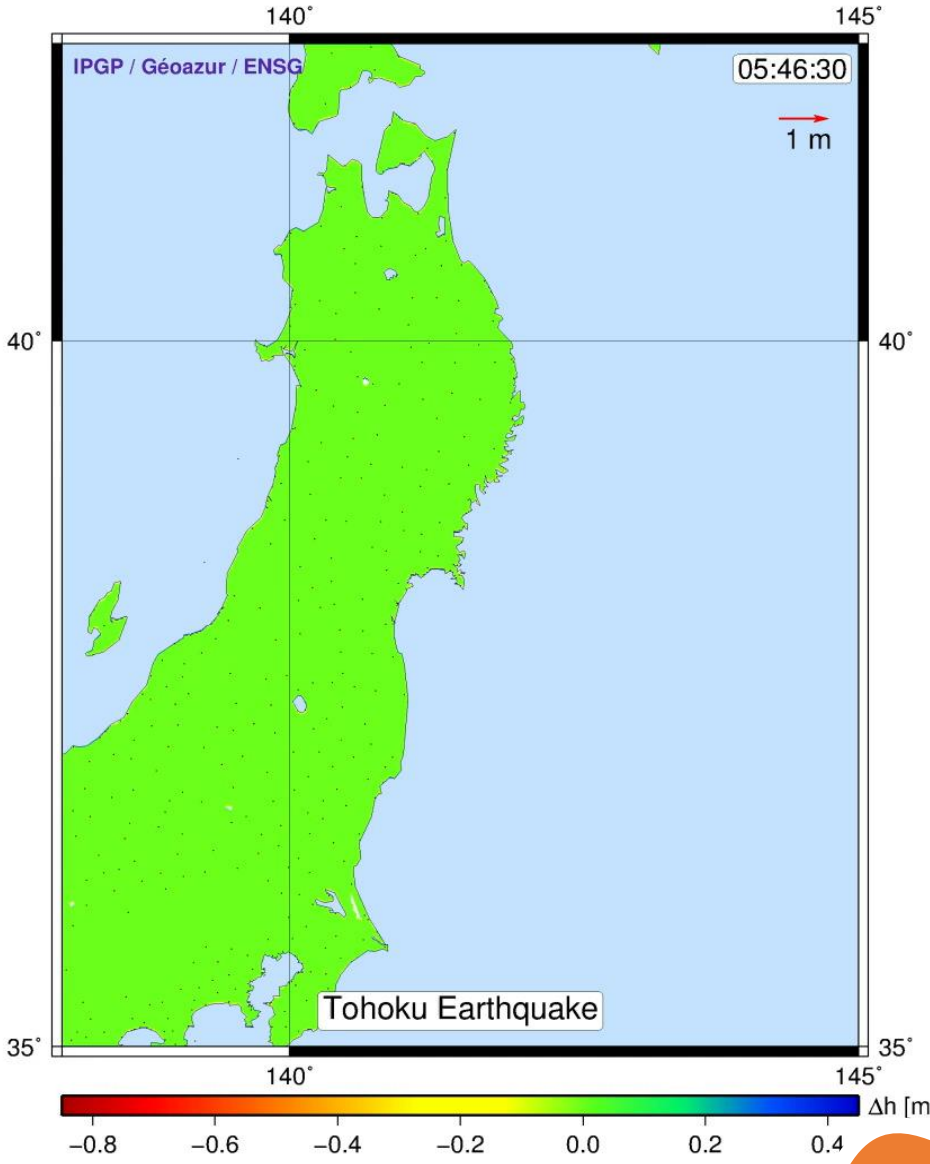
Source : UNAVCO



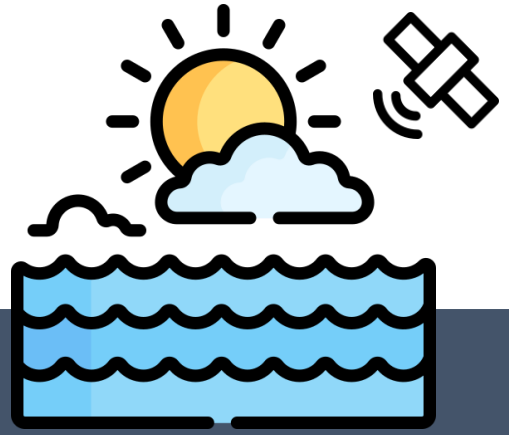
Quelles applications ?



... Au suivi des déformations dues à un séisme majeur



(Rolland et Bosser, 2013)



Le GNSS pour l’observation de l’océan



Suivre le niveau de la mer et valider les observations satellites



Suivre la vapeur d'eau atmosphérique

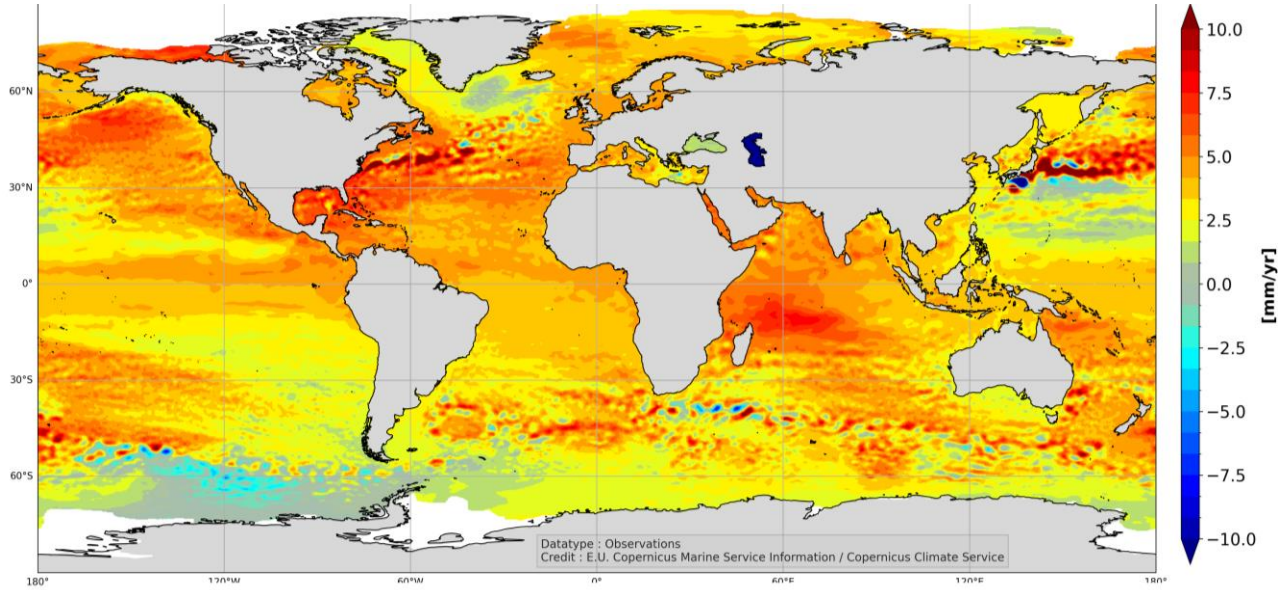


server la surface marine avec les signaux réfléchis

Suivre le niveau de la mer et valider les observations satellites



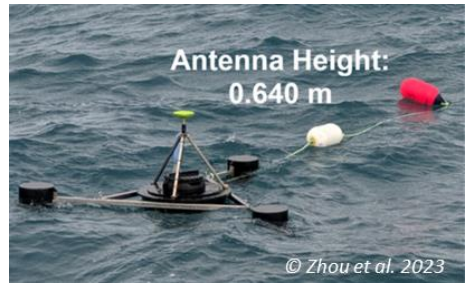
Les satellites radar suivent le niveau des océans depuis + 30 ans.



Evolution du niveau moyen des mers (mm/an) mesurée par altimétrie sur la période [1999-2024]

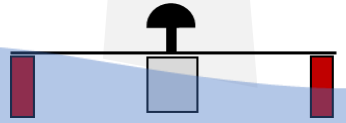
Source : Copernicus Marine Service / Copernicus Climate Service







Qu'est-ce qu'on mesure ? Quelles performances ?



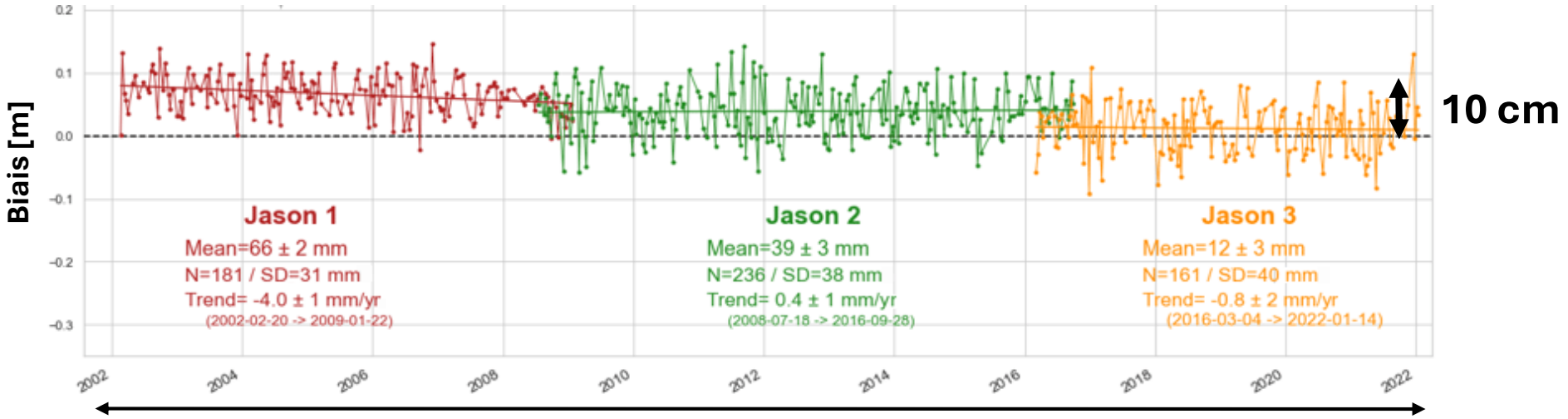
- Besoin d'observations *in situ* : techniques de calibration/validation
- Des sites instrumentés pérennes ou des campagnes dédiées
- **Bouées GNSS** : Mesure de la surface de la mer avec une précision ~cm

Validation long-terme en Nouvelle Calédonie (GEOCEAN-NC)





Biais altimétrique = Mesures satellite – Mesures *in situ*



Marégraphe permanent de Nouméa



Bouée GNSS



Marégraphe à pression



☑ Une méthodologie pour valider 20 ans de données satellites avec une campagne de 3 semaines

☑ Des biais altimétriques cohérents avec ceux de sites de cal/val historiques

(Chupin et al. 2023)

Validation spatiale en Méditerranée (WEMSWOT-CSWOT)

↪ **Mission satellite SWOT** (*Surface Water and Ocean Topography*) : observations 2D des océans, des lacs et rivières grâce à l'instrument KaRIn (= *radar interférométrique large fauchée*)

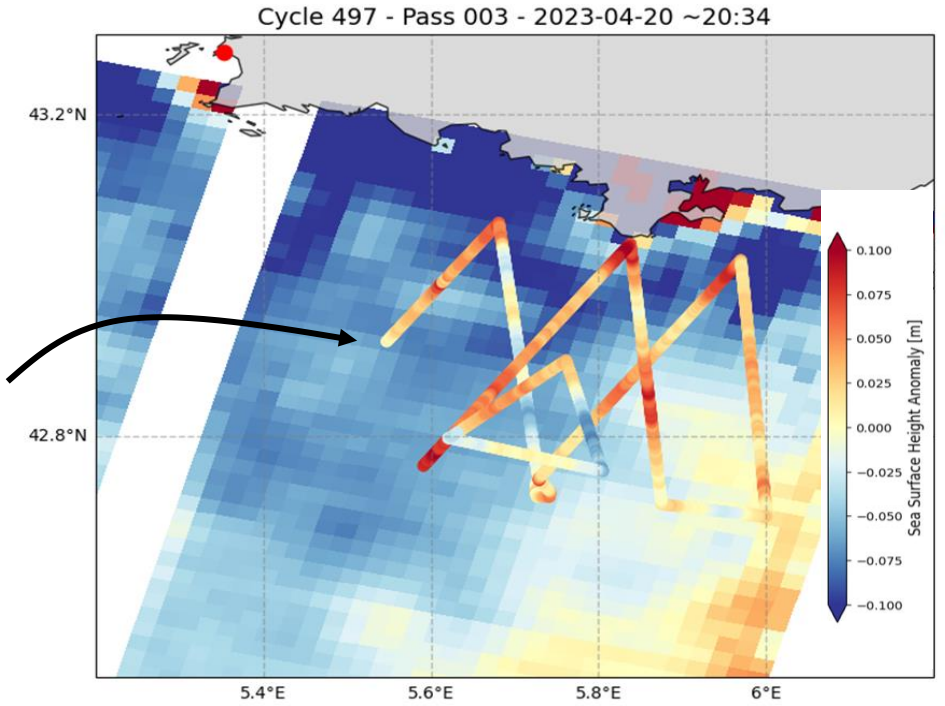
Comment valider des données 2D ?

Plateformes mobiles (drone de surface, navires, ...)

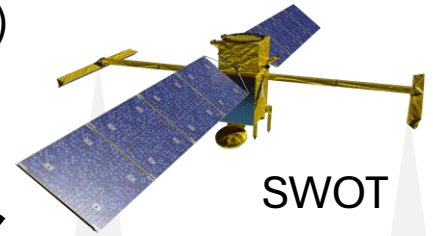
Positionnement GNSS et méthode de correction des mouvements du drone pour avoir le niveau de l'eau.
(Ducarme, 2023)

DriX

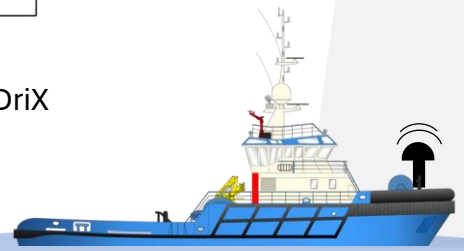




Anomalie du niveau de la mer (m) mesuré par SWOT et le DriX (20 avril 2023, Méditerranée) (Chupin et al., 2024)



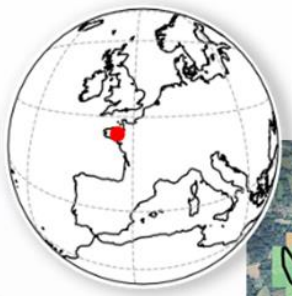
La suite : exploiter les données GNSS des navires durant la campagne (Post-doc Aurélie Panetier, Stage Louise Hinard)

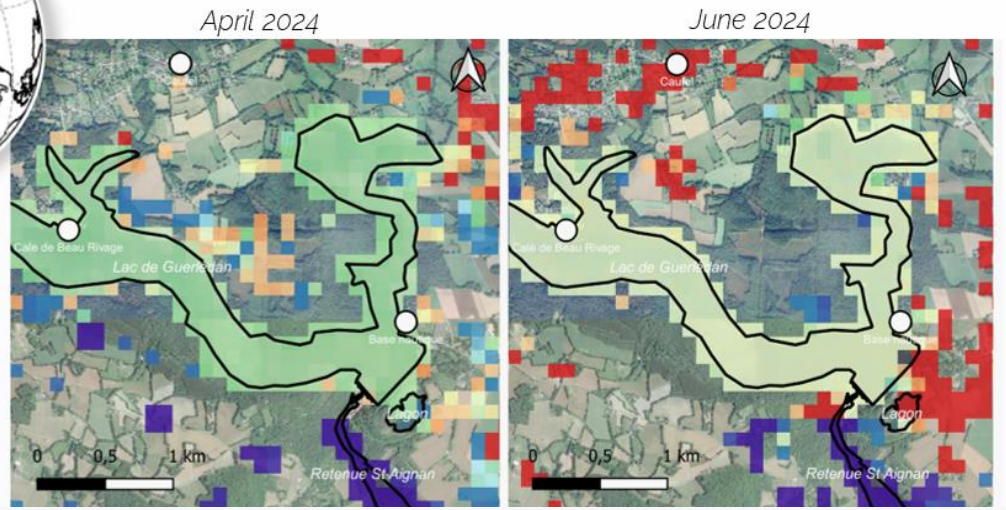


~50 km

Validation sur un lac (Projets ENSTA "*nivodo*")

↪ **Le lac de Guerlédan** : un terrain de jeu pour les étudiants et une configuration unique pour la cal/val





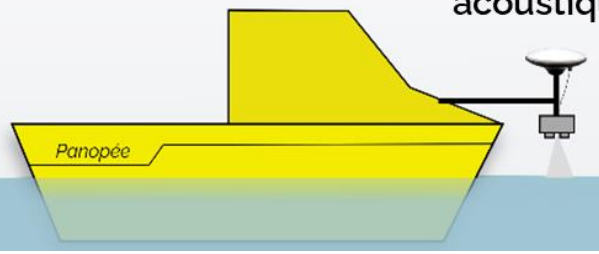
Elevation de la surface de l'eau mesurée par SWOT (données raster, résolution 100m)



Vos questions à Gaétan !



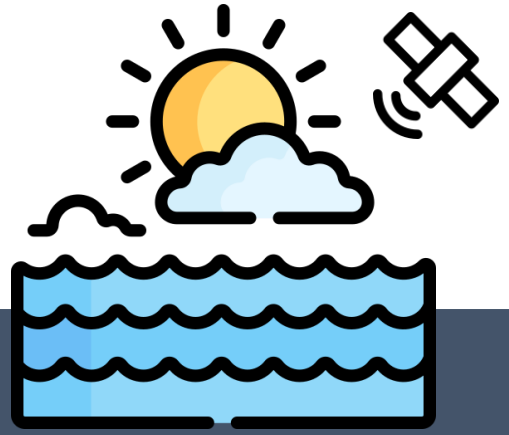








La suite : instrumenter le lac de manière pérenne pour la cal/val à l'échelle européenne (projet ESA/St3ART - GLASIC)



Le GNSS pour l’observation de l’océan

Suivre la vapeur
d'eau atmosphérique

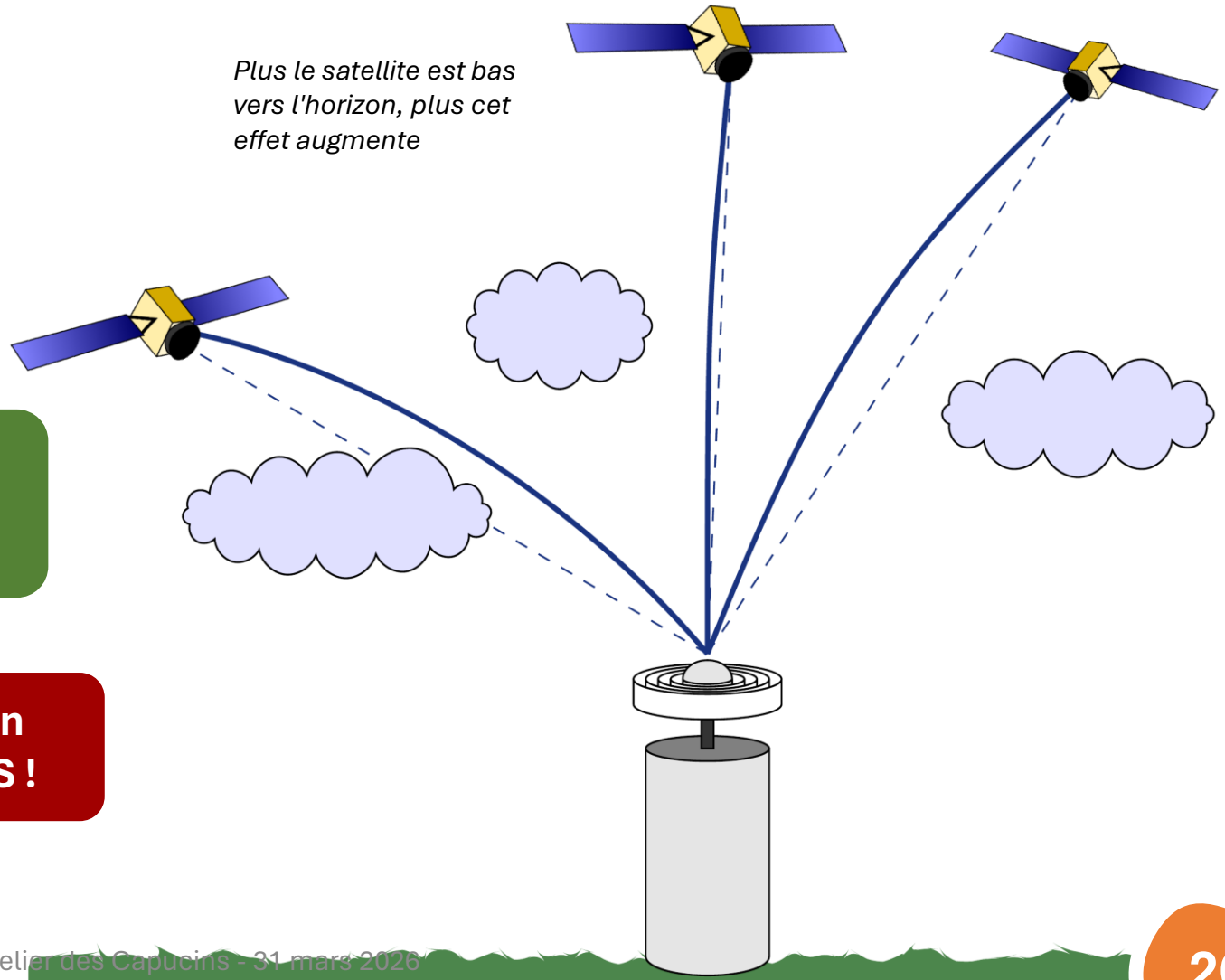
Suivre la vapeur d'eau atmosphérique (GNSS-MET)

- En raison de sa composition (air sec et vapeur d'eau), la basse atmosphère modifie la propagation des signaux GNSS

Pour un positionnement précis de l'antenne, il est essentiel de calculer simultanément cet effet appelé **retard troposphérique**

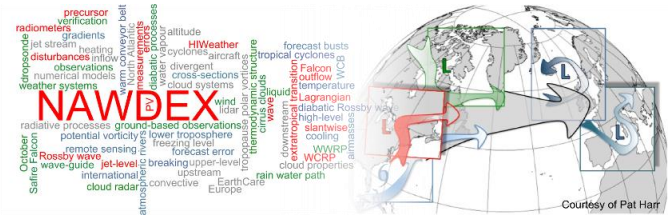
Ce retard est séparé en deux parties:
- l'une liée à **l'air sec** (retard hydrostatique)
- l'autre à la **vapeur d'eau** (retard humide)

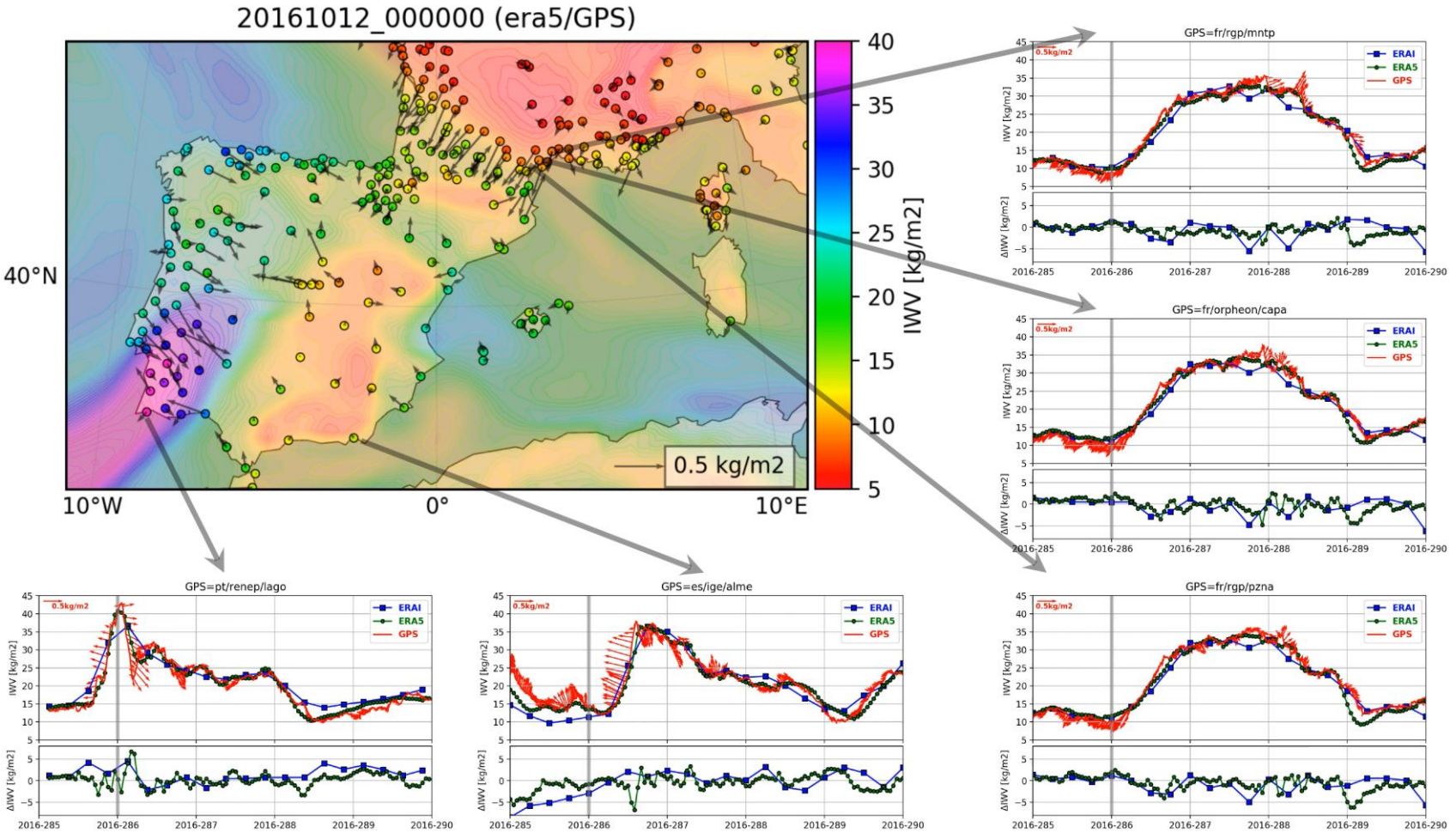
Il est ainsi possible de mesurer la teneur en vapeur d'eau au-dessus de l'antenne GNSS !



Suivre la vapeur d'eau atmosphérique (GNSS-MET)

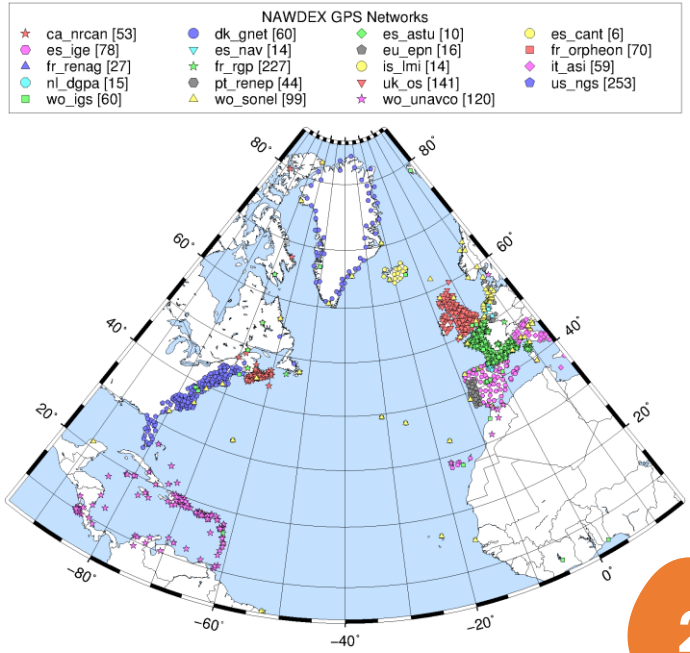
↪ Suivi d'un front humide à partir d'un réseau d'antennes GNSS professionnelles





Cut-Off Sanchez (Binder et al., 2021)

Distribution spatio-temporelle de la vapeur d'eau atmosphérique à partir d'antennes GNSS issues de réseaux permanents



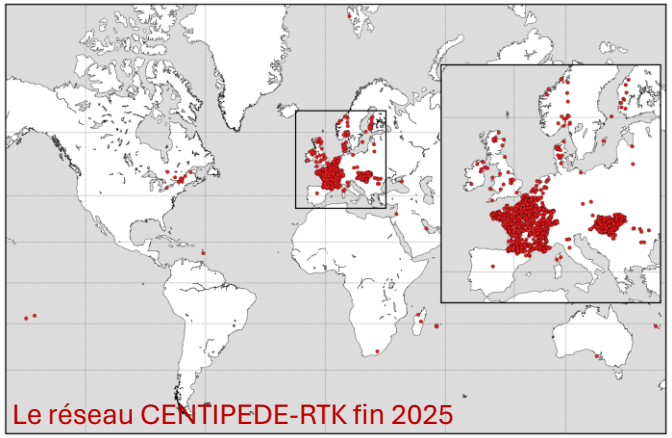
Suivre la vapeur d'eau atmosphérique (GNSS-MET)

↪ Suivi d'un front humide à partir d'un réseau d'antennes GNSS à bas cout

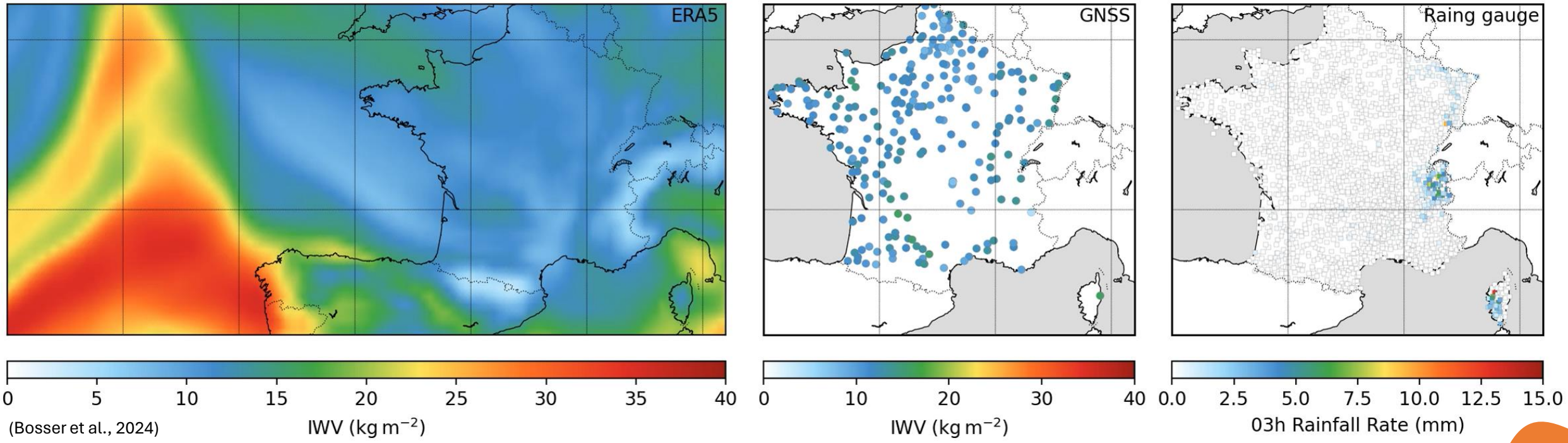
Centipede-RTK est un réseau GNSS permanent **collaboratif**, équipé de **dispositifs low-cost,** permettant un positionnement relatif centimétrique temps réel







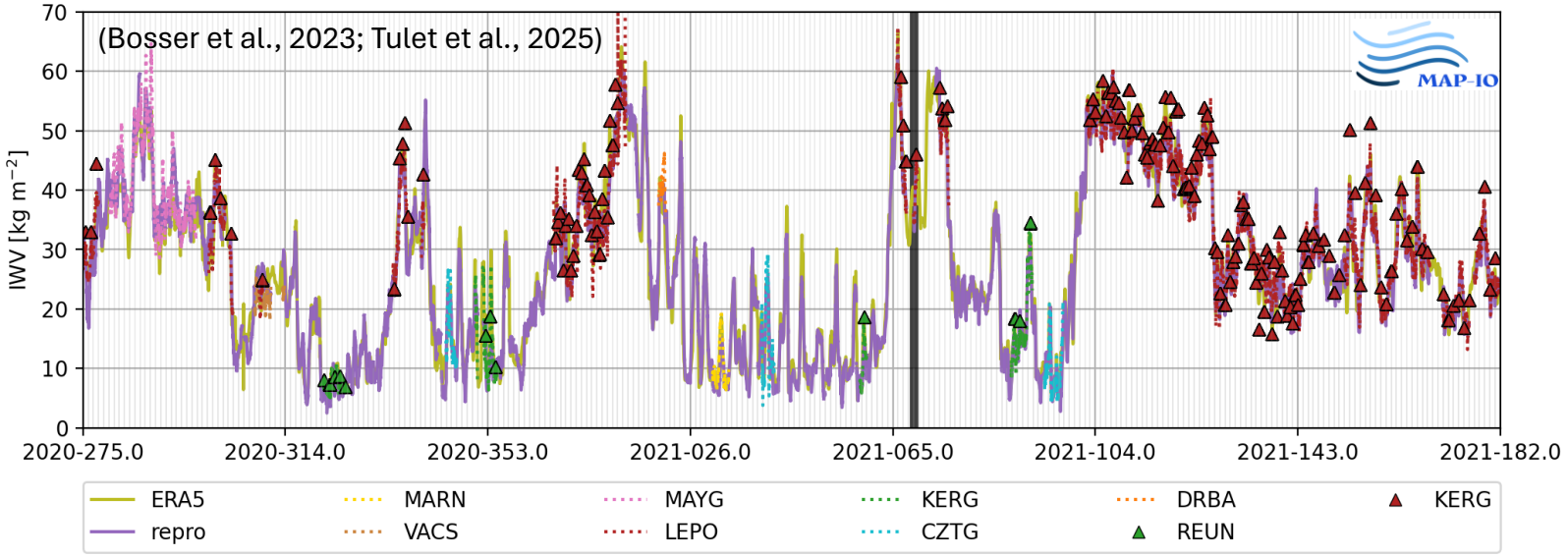
2023-12-10 00:00:00



(Bosser et al., 2024)

Suivre la vapeur d'eau atmosphérique au-dessus des mers (GNSS-MET)

↪ La vapeur d'eau atmosphérique peut aussi être observée depuis une antenne GNSS mobile sur un navire !



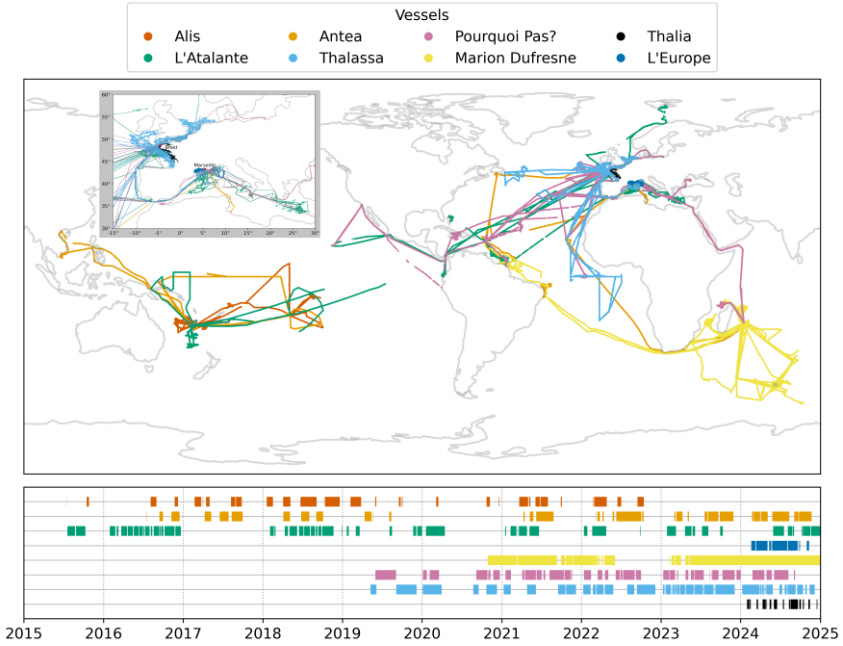
Instrument National MAP-IO

Équipement du Marion Dufresne pour l'observation des Océans Indien et Austral (climat, prévision numérique du temps, etc.)



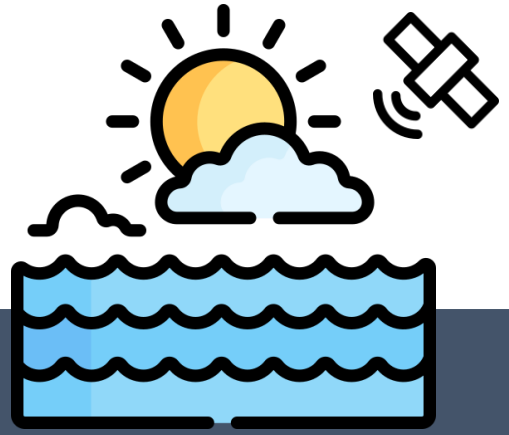
Projets GEMMOC et WAVES-G

Documentation de la variabilité spatio-temporelle de la vapeur d'eau océanique à partir des mesures GNSS réalisées depuis les navires de la Flotte Océanographique Française.
(suivi climatique, calibration d'instruments satellitaires, etc.)



(Panetier et al., 2026)

La suite : observation participative à partir de système low-cost embarqués sur les navires (projets WAVES-G, Skywater avec Astrolabe Expedition)



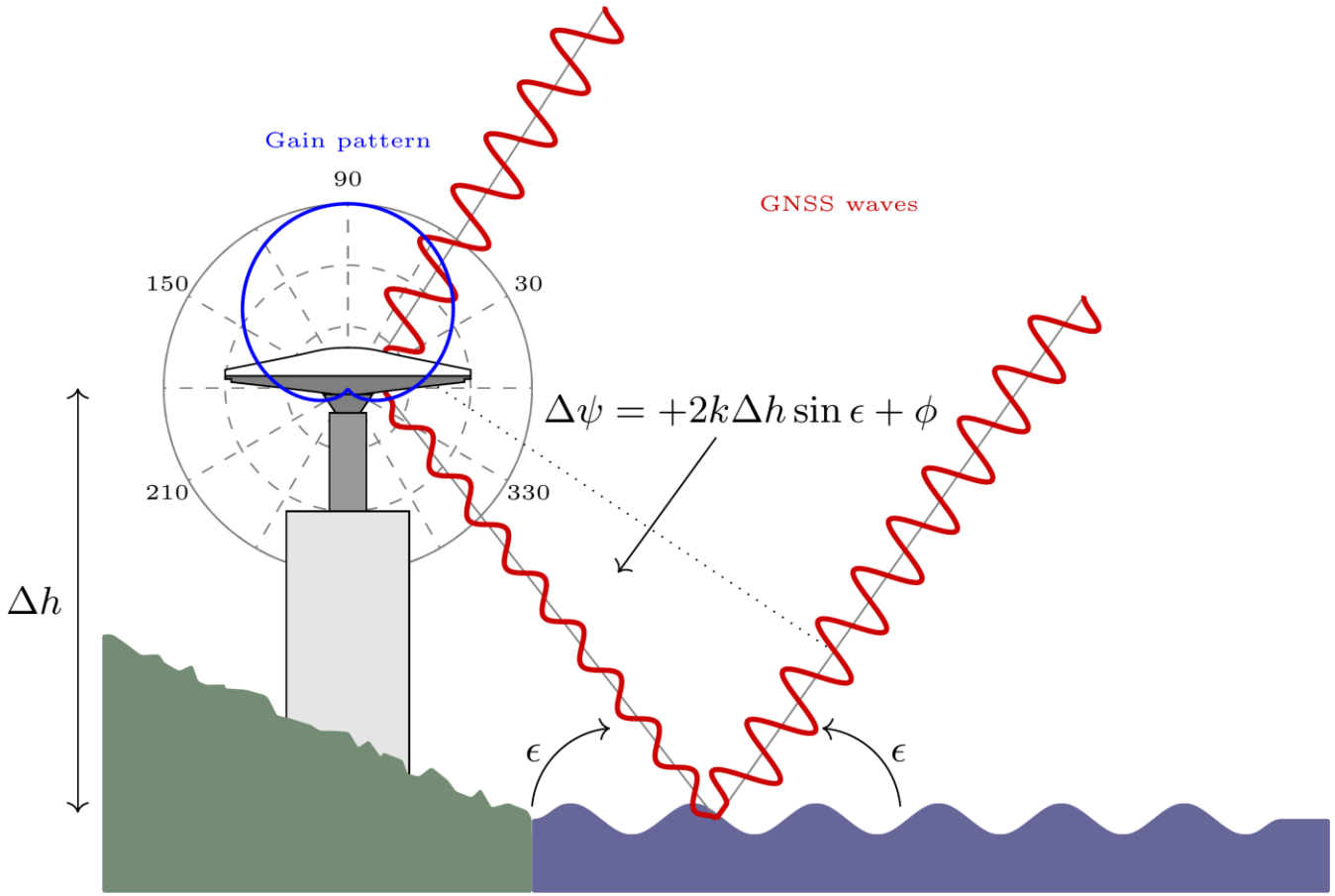
Le GNSS pour l’observation de l’océan

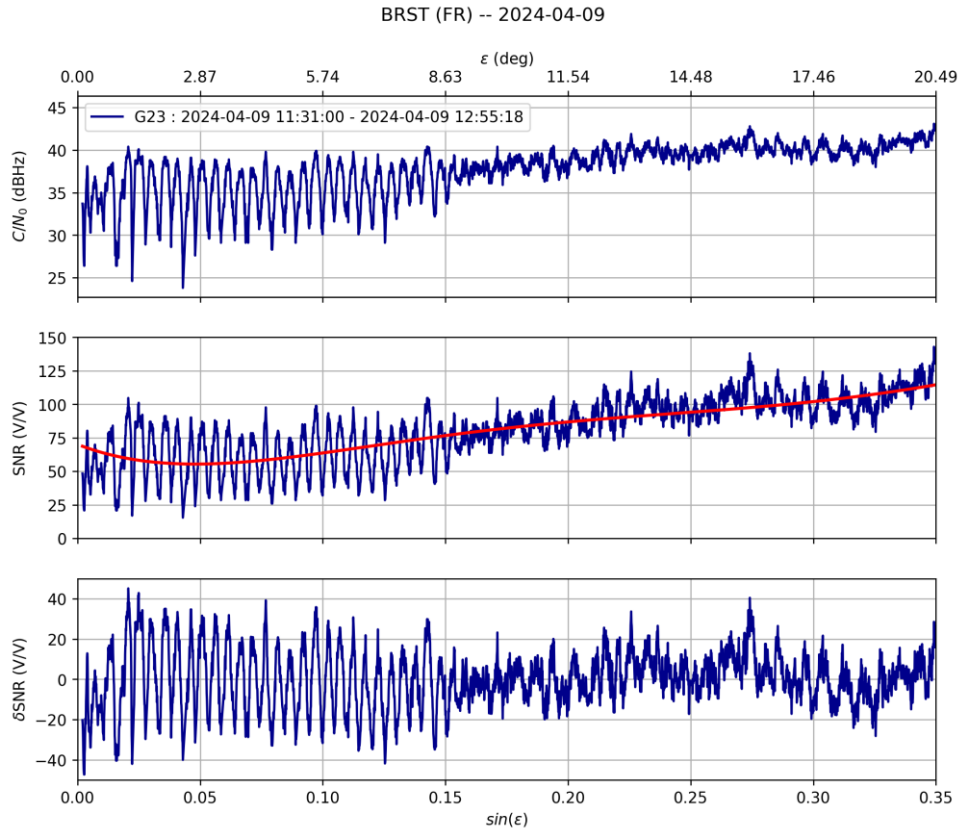


server la surface marine
avec les
signaux réfléchis

Observer la surface marine avec les signaux réfléchis (GNSS-IR)

- La **réflectométrie interférométrique GNSS** permet de déterminer la distance séparant une antenne d'une surface environnante réfléchissant les signaux





- ✓ **La puissance du signal** mesuré par une antenne présente des oscillations dues à la réflexion du signal.
- ✓ **La fréquence** de ces oscillations dépend de la hauteur de l'antenne au-dessus de la surface réfléchissante.

Observer la surface marine avec les signaux réfléchis (GNSS-IR)

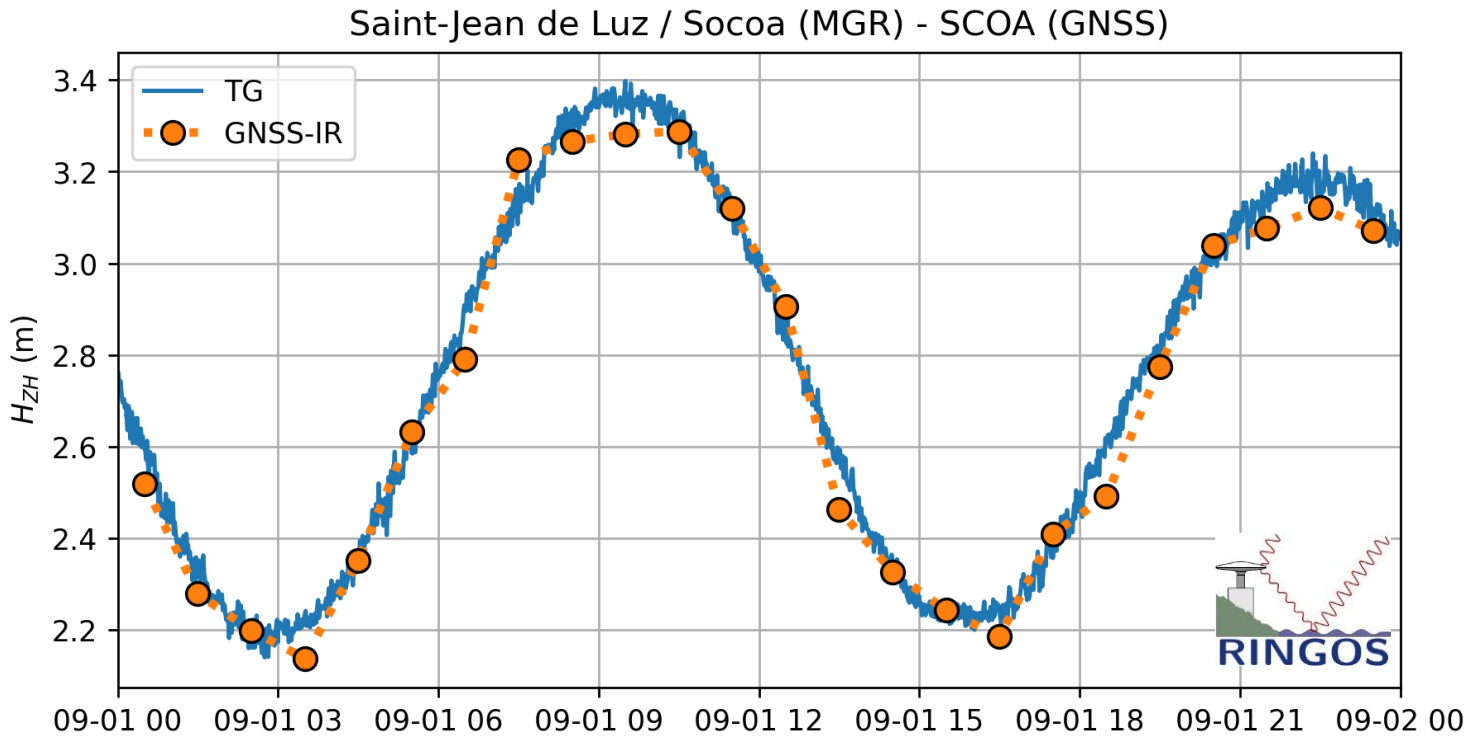




L'analyse de la puissance des signaux GNSS mesurés permet d'estimer **la hauteur entre l'antenne et la surface de l'eau**, et donc la marée

Vos questions à Odilon !





(Faguet, 2025)



Pour conclure...

Pour conclure

↪ Pour mieux comprendre et surveiller les océans, il est essentiel de disposer de systèmes d'observation fiables et précis.

Le GNSS est une solution parmi d'autres, avec de nombreux avantages.



- ✓ **Versatilité** : plusieurs modes d'exploitation adaptés aux différentes applications (altimétrie, réflectométrie, positionnement…)
- ✓ **Systèmes passifs** : peu énergivores et faciles à déployer
- ✓ **Accessibilité croissante** : développement rapide de solutions **low-cost performantes**
- ✓ **Mesures d'opportunité** : exploitation de capteurs déjà présents sur les **côtes, navires, drones, bouées…**





👉 Le GNSS ouvre la voie à une observation des océans **plus flexible** en complément des systèmes traditionnels.



Travaux réalisés avec le soutien de l'ANR (DIP-NAWDEX), du LEFE (GEMMOC), du PNTS (WAVES-G), de l'IP Paris / CIMO / AID (RINGOS), IsBlue, CNES (TOSCA), ESA (GLASIC), Lab-STICC, …

ASTROLABE EXPEDITIONS

ENSTA IP PARIS

Observer l'environnement marin avec un GPS

Comment des instruments simples et maintenant peu coûteux nous aident à mieux comprendre l'environnement marin ?

Café océan

Mardi 31 mars 2026
Atelier des Capucins

LES ATELIERS DES CAPUCINS BREST melting place

Pierre BOSSER
Clémence CHUPIN

Odilon Joel HOUNDEGNONTO
Gaétan de KAT



Merci de votre attention !

Bibliographie

[Binder et al., 2021] H. Binder et al., “Dynamics of forecast-error growth along cut-off Sanchez and its consequence for the prediction of a high-impact weather event over southern France,” Quart J Royal Meteoro Soc, 2021, doi: 10.1002/qj.4127.

[Bosser et al., 2024] P.Bosser, J. Ancelin, M. Métois, L. Rolland, M. Vidal. "Evaluation of tropospheric estimates from CentipedeRTK, a collaborative network of low-cost GNSS stations", GPS Solutions, 2024, https://doi.org/10.1007/s10291-024-01699-3

[Bosser et al., 2024] P. Bosser, P. Tulet, A. Panetier, "Le programme MAP-IO et son volet GNSS pour l’observation de la vapeur d’eau sur les Océans Austral et Indien", presented at Colloque G2 - Géodésie marine, sous-marine et côtière, La Rochelle, 2024. Available: https://hal.science/hal-04515186v1/file/pbosser_g2_mapio.pdf

[Chupin et al., 2023] C. Chupin, V. Ballu, L. Testut, Y.-T. Tranchant, and J. Aucan, “Nouméa: a new multi-mission calibration and validation site for past and future altimetry missions?”, Ocean Science, 2023, doi: 10.5194/os-19-1277-2023.

[Chupin, 2024] C. Chupin, “Cartographie du niveau de la mer par systèmes GNSS pour la validation des données SWOT”, presented at Colloque G2 - Géodésie marine, sous-marine et côtière, La Rochelle, 2024. Available: https://apps.univ-lr.fr/cgi-bin/WebObjects/Colloque.woa/wa/menu?code=3601&idMenu=14208&lang=fr

[Ducarme, 2023] A. Ducarme, “Mesure de la hauteur d’eau océanique par GNSS embarqué sur un drone marin de surface,” ESGT/ ENSTA, Mémoire de fin d’étude, 2023.

[Faguet, 2025] J. Faguet, "Caractérisation de la surface marine par réflectométrie interférométrique GNSS", ENSG/ENSTA, Mémoire de fin d’étude, 2025

[IPCC, 2021] IPCC. « Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». Cambridge University Press. IPCC, 2021.

[Mercier, 2025] F. Mercier, "Extraction et qualification de contenu intégré en vapeur d'eau à partir de données GNSS de navires océanographiques pour la climatologie", ENSG/ENSTA, Mémoire de fin d’étude, 2025

[Merkens et al., 2016] J.-L. Merkens, L. Reimann, J. Hinkel, et A. T. Vafeidis. "Gridded Population Projections for the Coastal Zone under the Shared Socioeconomic Pathways". Global and Planetary Change, 2016), https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.08.009.

[Panetier et al., 2026] A. Panetier, P. Bosser, F. Mercier, "Integrated Water Vapor contents from GNSS observations collected onboard research vessels of the French Oceanographic Fleet", Earth System Science Data, 2026, *under review*

[Tulet et al., 2025] P. Tulet, J. van Baelen, P. Bosser, J. Brioude, A. Colomb, et al.. MAP-IO: an atmospheric and marine observatory program on board Marion Dufresne over the Southern Ocean. 13th Session of the Ship Observations Team, Apr 2025, Plouzané (29280), France. 2025.