



*Liberté
Égalité
Fraternité*



**CHANGER
D'ÉCHELLE**

EVALUATION ET CONNEXION DE REFERENCES ALTIMETRIQUES PAR NIVELLEMENT HYDRODYNAMIQUE POUR L'UNIFICATION DES REFERENCES VERTICALES TERRE-MER

Réunion CNIG-GEOPOS, 26 mars 2026

Jonathan Chenal, IGN/SGM

Systemes altimétriques ; cas de la France

- Equation de base des dénivelées :

$$H_M - H_A = \frac{\int_A^M g \, dn}{g_{conv}}$$

- Le choix de g_{conv} détermine le type d'altitude (orthométrique, normale) et le type de surface de référence (géoïde, quasi-géoïde).

- Besoin d'observations :

- g : gravimétrie
- dn : dénivelées élémentaires (nivellement géométrique)

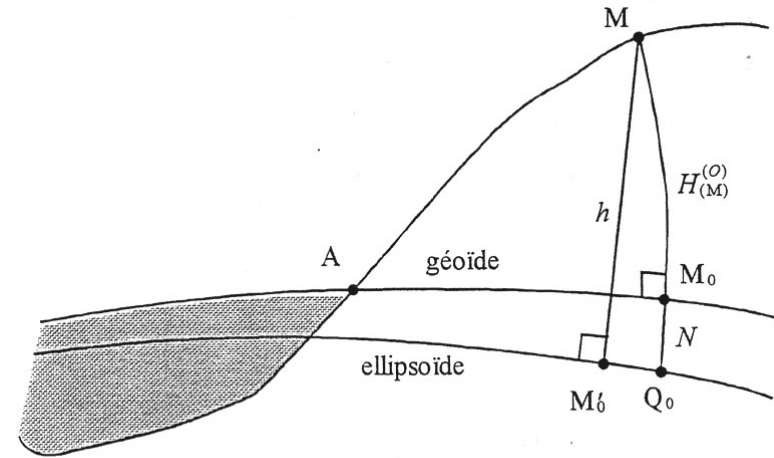


Figure 1: Hauteur du géoïde et altitude orthométrique.

H. Duquenne

IGN *Nivellement Général de la France*

Repère de nivellement

Matrice: **M.AC - 0-VIII** Système d'altitude: **NGF/IGN 699**
 Hauteur: **1,661 m**

Date de dernière altimétrie: 2023
 Repère mis en place en 2023

Type: **R RIVET**

Complément: **REPÈRE FONDAMENTAL LETTE F CLASSE - SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OcéANOGRAPHIQUE DE LA MARINE**

Coordonnées: **REPÈRE FONDAMENTAL LETTE F CLASSE - SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OcéANOGRAPHIQUE DE LA MARINE**

Longitude (WGS 84): **8° 21' 13.5" E** Latitude (WGS 84): **43° 10' 43.6" N**

Systeme: **REPÈRE FONDAMENTAL LETTE F CLASSE - SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OcéANOGRAPHIQUE DE LA MARINE**

Élévation: **0.00 m** Altitude: **6245.83**

Département: **BOUCHES DU RHÔNE** Numéro INSEE: **13207** Commune: **Marseille-9^e arrondissement**

Nom usuel: **PROMENADE KENNEDY**

Code: **00** Distance: **840** m du centre M.AC

Localisation: **AU MARÉGRAPHE DE MARSEILLE, AU NO 14 DE LA CORNISE DE PRÉSIDENT JOHN F. KENNEDY**

Support: **BÂTIMENT DE MARÉGRAPHE**

Partie support: **DALEE CYLINDRIQUE AU CENTRE DE LA CHAMBRE SOUTERRAINE**

Représentation: **AL CENTRE DE LA DALEE AU SOMMET**

Remarque: **Inaccessible par GPS.**

Ce repère appartient à un triplet.

Liste des repères du triplet: **M.AC, M.AC - 0-I, M.AC - 0-II, M.AC - 0-III, M.AC - 0-IV, M.AC - 0-V, M.AC - 0-VI, M.AC - 0-VII, M.AC - 0-VIII, M.AC - 0-IX, M.AC - 0-X**

Ce repère fait partie de groupe de repère: **MARSEILLE**.

Le repère est au centre de la photo

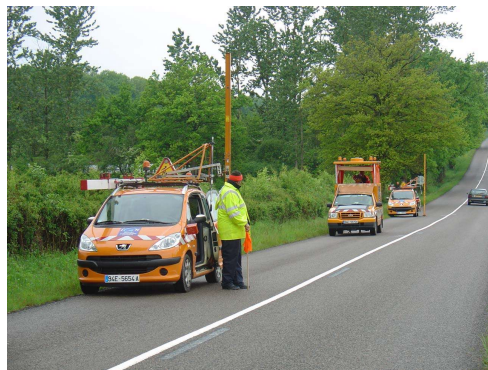
Carte: **3140 MARSEILLE**

© 2008 IGN - INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMAISON GÉOGRAPHIQUE ET STATISTIQUE
 73 Avenue de Paris 93585 SAINT MANDÉ CEDEX

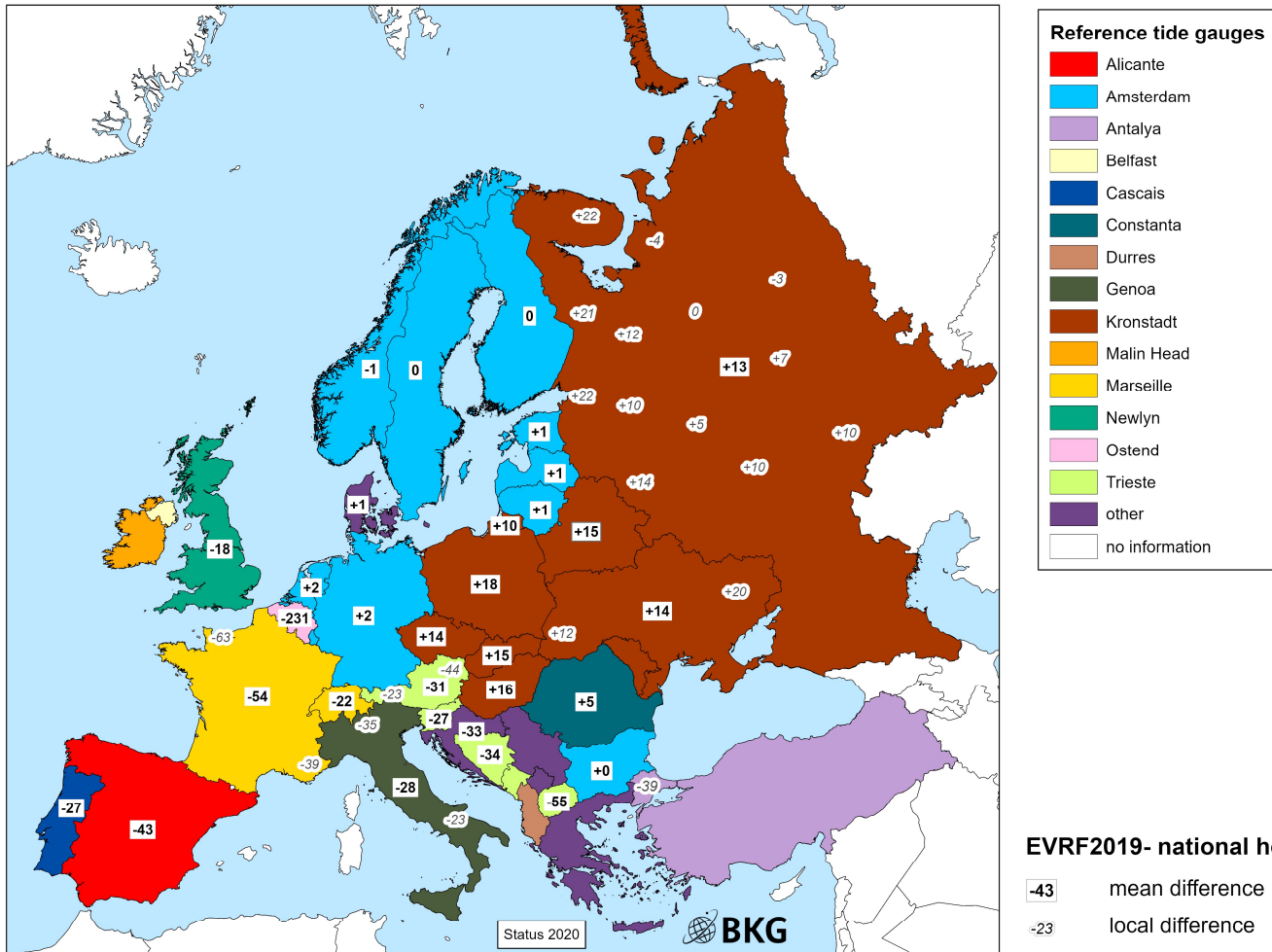
France continentale : NGF/IGN69
 Normal, origine au marégraphe de Marseille

Corse : NGF/IGN78
 Normal, origine au marégraphe d'Ajaccio

Et un système par territoire émergé en Outre-mer



Enjeux (1) : la connexion des systèmes altimétriques

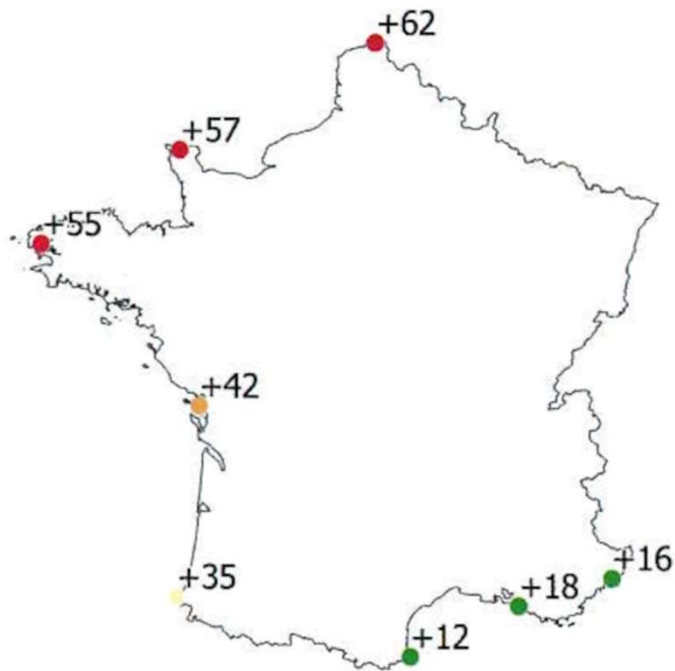


BKG

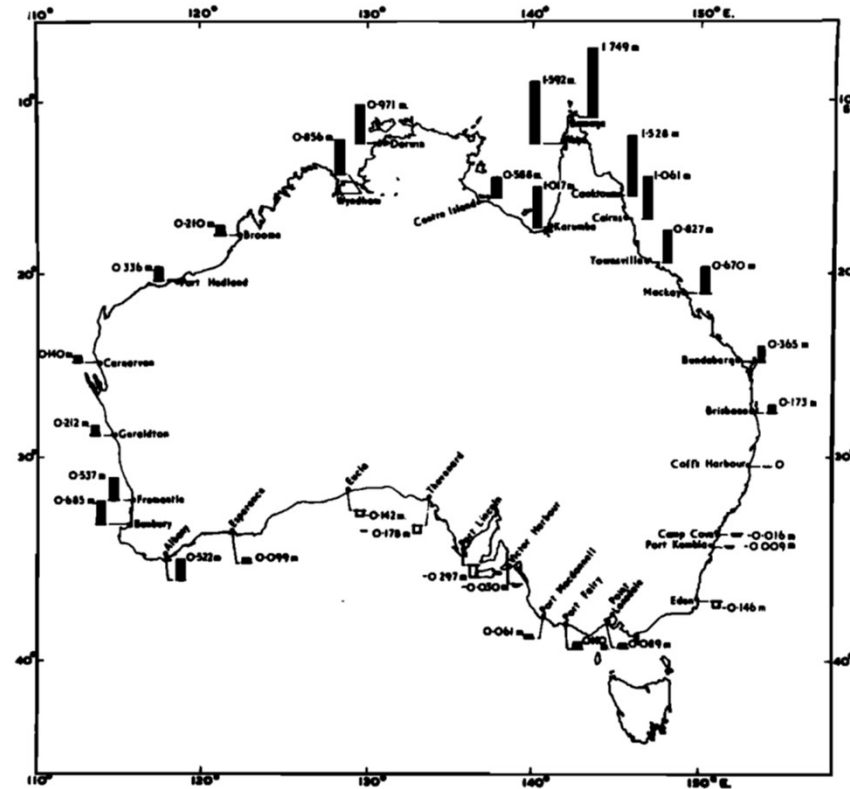
Enjeux (2) : l'évaluation des systèmes altimétriques

Autre problème spécifique du système IGN69 : la suspicion d'une pente sud-nord (Kasser 1989, Lavoué et Jamet 2023) : pente de **l'altitude du niveau moyen de la mer avec la latitude** (voir aussi (Levallois 1959) concernant le système NGF antérieur à l'IGN69, puis Levallois et Maillard 1970)

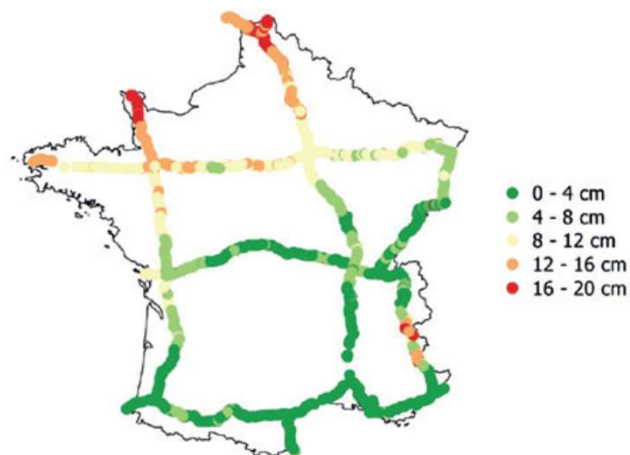
H(MSL) IGN69



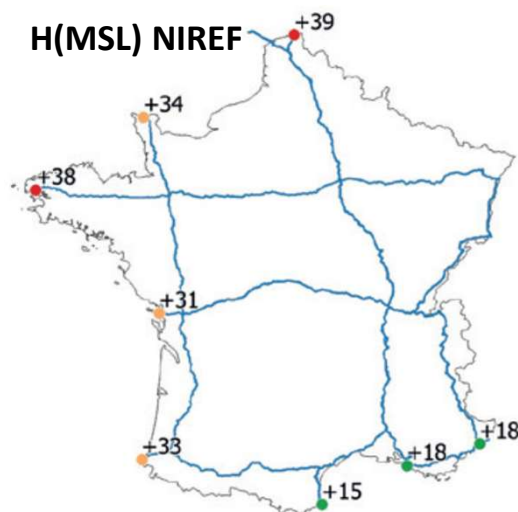
Problème similaire dans d'autres pays, par exemple en Australie (Hamon & Graig, 1972) résolu par nivellement hydrodynamique et utilisation de la **topographie dynamique de l'océan** (Featherstone et Filmer, 2012) ; voir aussi cas de la Grande-Bretagne (Penna et al 2013)



France : le système légal IGN69 et le système scientifique NIREF



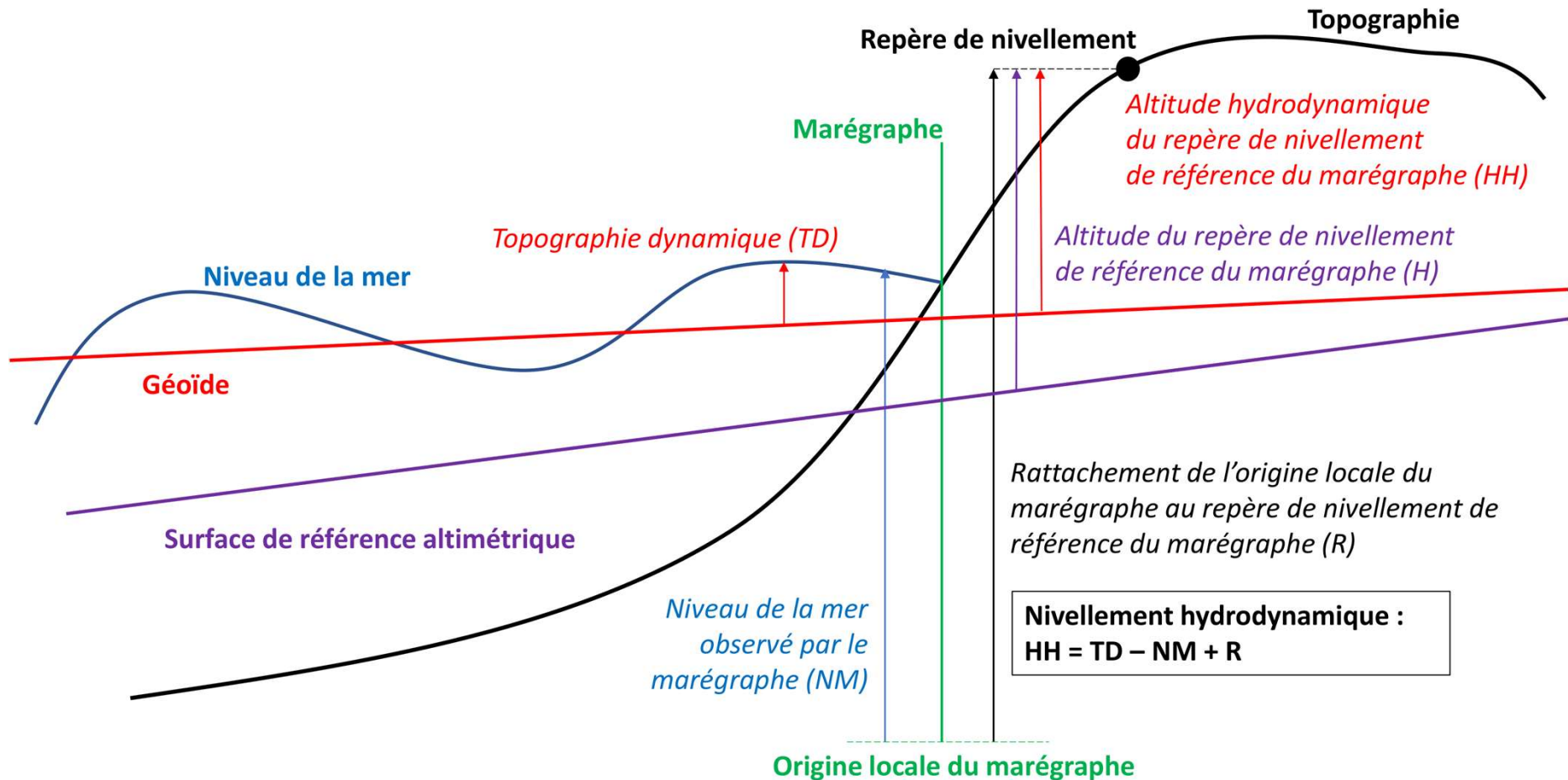
Ecart IGN69 vs NIREF



Questions scientifiques :

- Peut-on revisiter l'évaluation de l'IGN69 autrement que par nivellement géométrique ?
- Peut-on évaluer le NIREF lui-même ?
- Le niveau de la mer n'étant séparé du géoïde que par la topographie dynamique, peut-il servir à évaluer le NIREF si on connaît la topographie dynamique ?

Principes du nivellement hydrodynamique

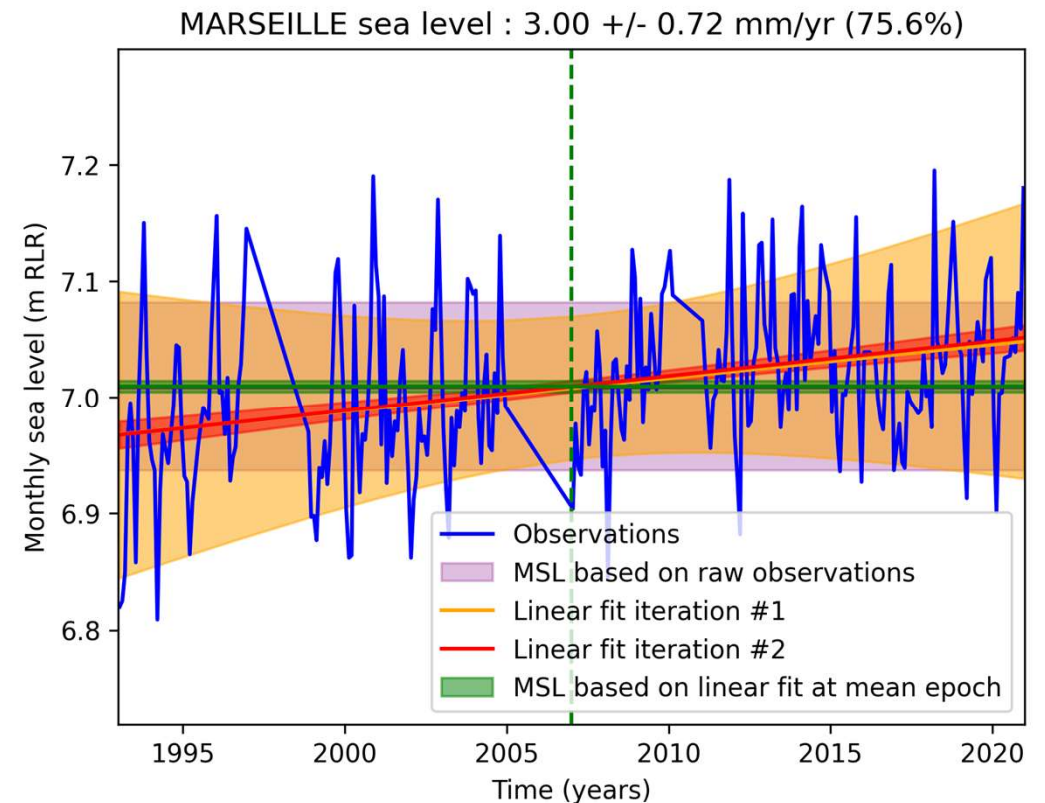


Idée : comparer les dénivelées issues du nivellement hydrodynamique HH et celles issues du nivellement géométrique H ⁶

Données

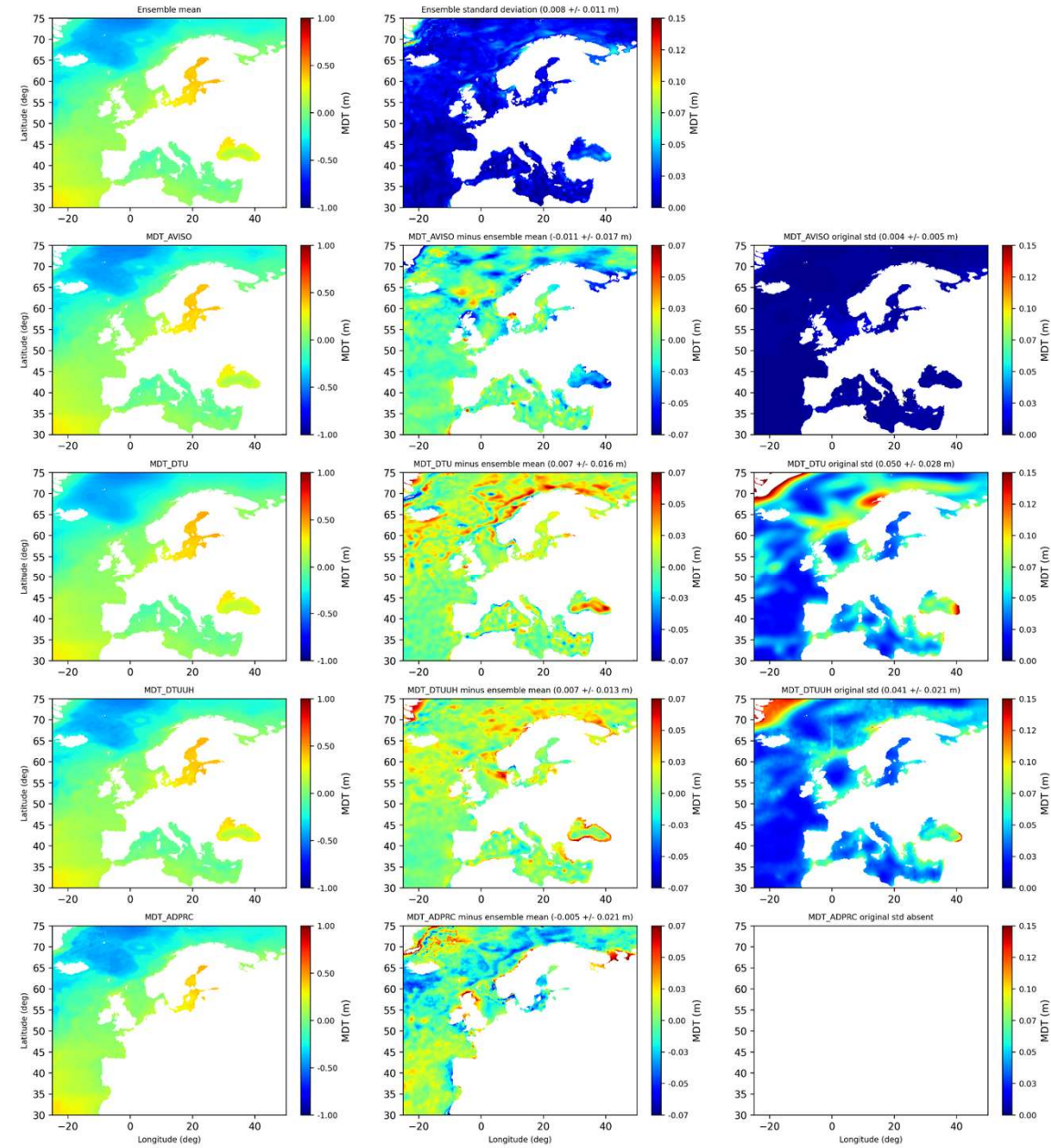
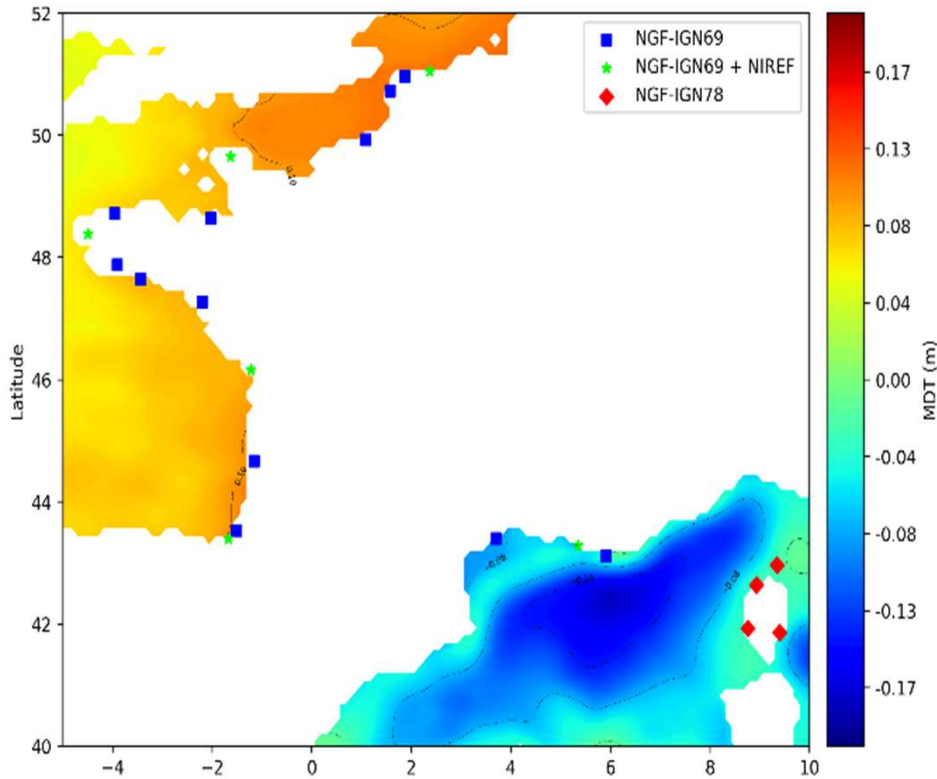
- Tous marégraphes rattachés à un système altimétrique :
 - France continentale IGN69 (18)
 - France continentale NIREF (5)
 - Corse IGN78 (4)
 - Grande Bretagne ODN (29)
 - Outre-Mers français (18)
(non présentés ici)

Niveau moyen de la mer calculé à partir de la régression linéaire des observations mensuelles (PSMSL, SONEL) et du calcul à l'époque moyenne de la MDT



Données

- MDT : CNES-CLS22 (Jousset et al 2023), DTU, DTUUH (Knudsen et al 2021), APDRC (Maximenko et al 2009) (Extrapolation linéaire aux coordonnées des marégraphes)
- Géoïde de CNES-CLS22 : GOCO06s (Kvas et al 2020)
- Afrasteh et al 2023 : modèles Nemo-Nordic et 3D DCSM-FM (Hordoir et al. 2015, 2019 ; Zijl et al. 2020, resp.)



Résultats (1a) : pente du système altimétrique français IGN69

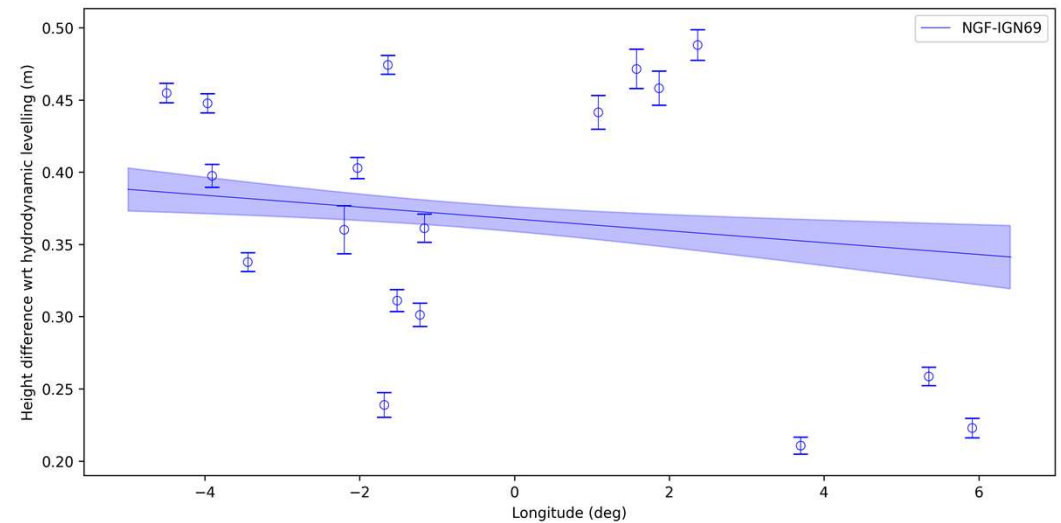
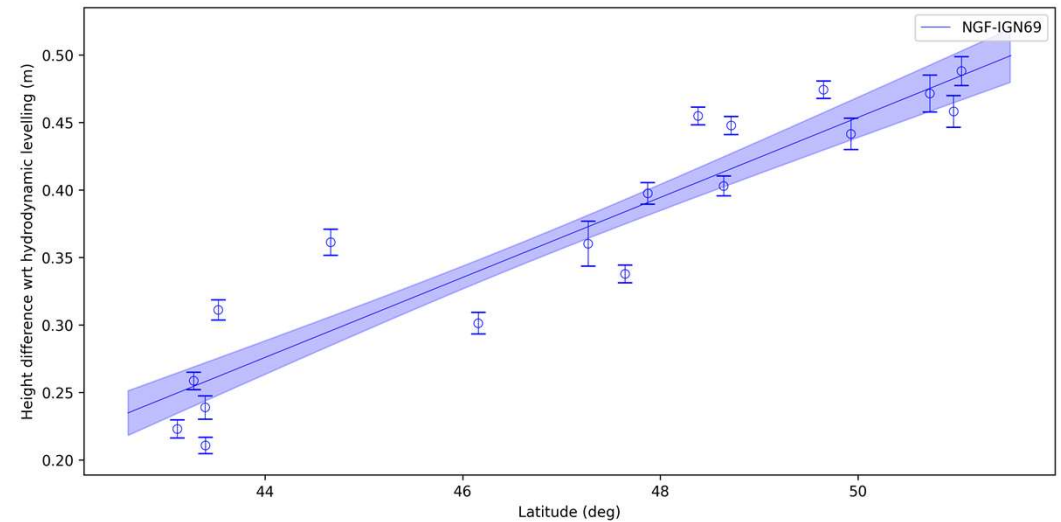
- Ajustement linéaire du basculement entre surface de référence de l'IGN69 et le géoïde de la MDT (CNES-CLS22 uniquement dans cette présentation)
- **$HH - HN = A + B (\text{lat} - \text{lat}0) + C (\text{lon} - \text{lon}0)$**

A : Biais 0.3690 ± 0.0085 m

B : Pente méridienne 0.0293 ± 0.0036 m/deg

C : Pente zonale -0.0043 ± 0.0029 m/deg

RMS = 0.088 m



Résultats (1b) : dénivelée Dunkerque-Marseille

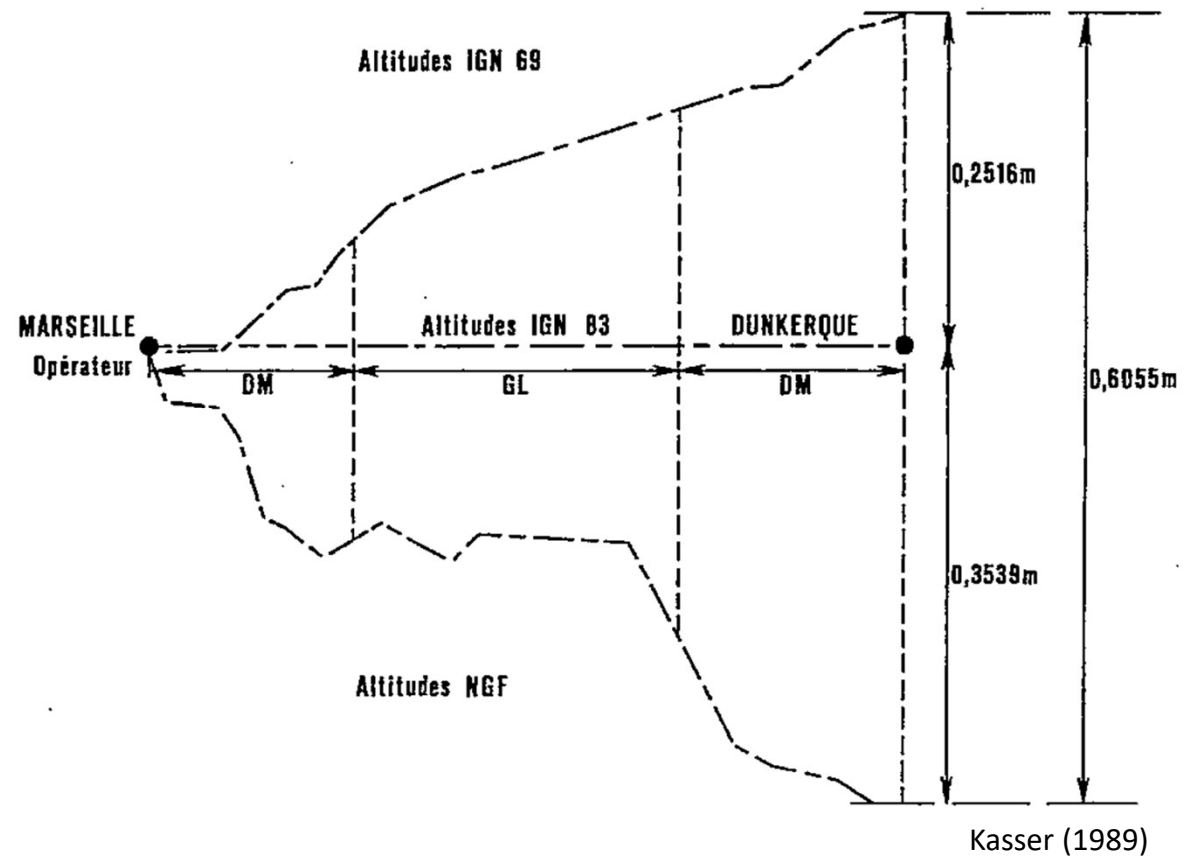
IGN69 : 5,150 m

Hydrodynamique : 4,920 +/- 0,013 m

⇒ Biais de **23 cm** qui confirme et précise avec des données totalement indépendantes la reprise de cette traverse en nivellement géométrique précis (NIREF) réalisée en 1983 :

⇒ 4,898 m, biais 25,2 cm (calcul de 1989)

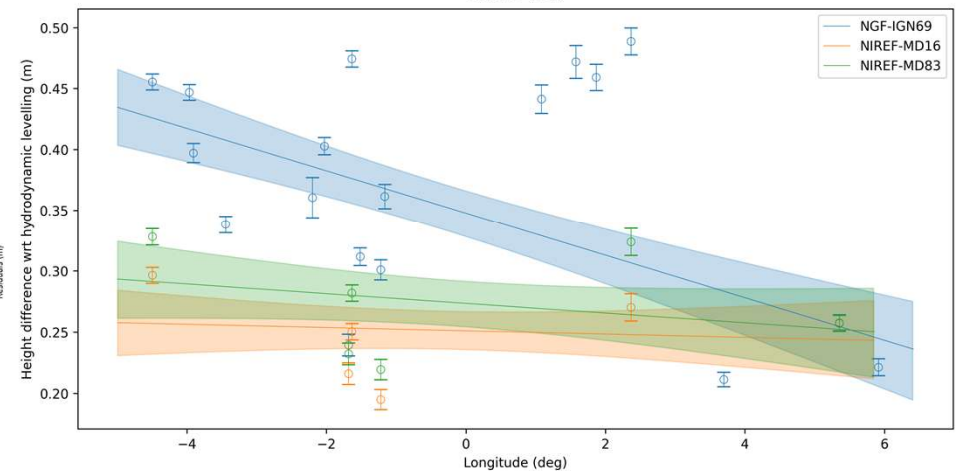
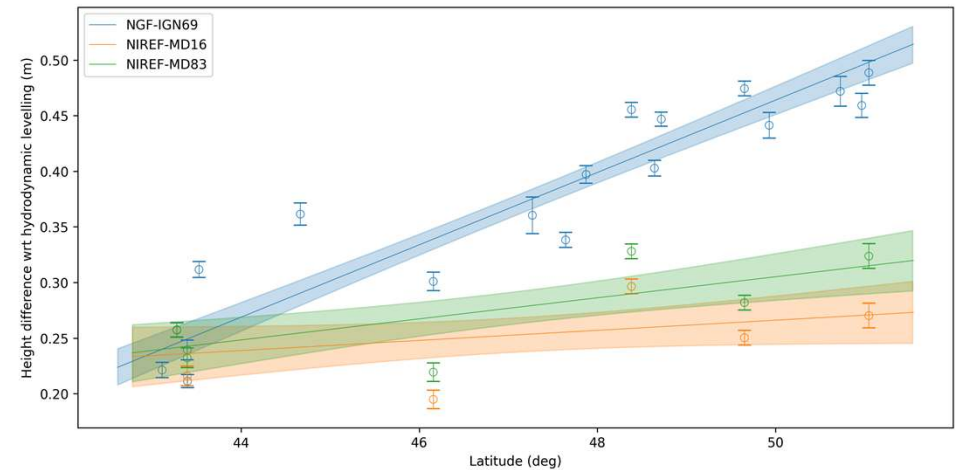
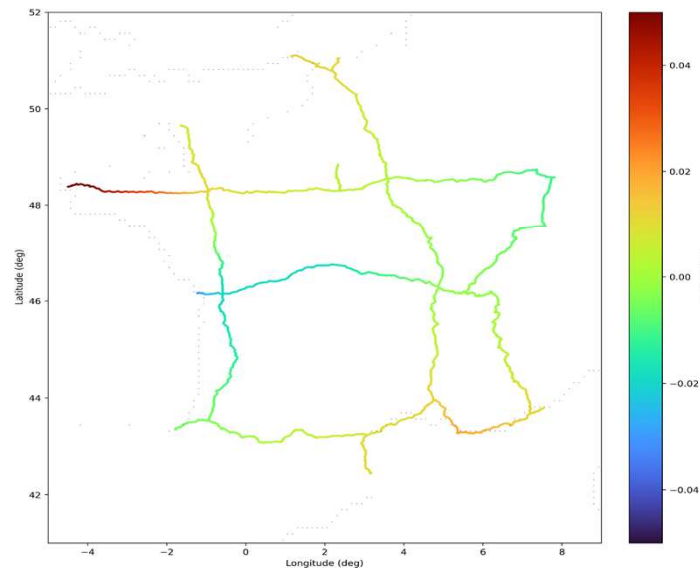
⇒ 4,933 m, biais 21,7 cm (calcul 2024)



Résultats (2) : évaluation du NIREF

NIREF : deux observations de la traverse Marseille-Dunkerque (1983 et 2013-2016)

- **La traverse récente est moins cohérente avec le nivellement hydrodynamique que la traverse de 1983** avec une pente méridienne de $9,5 \pm 6,9$ mm/deg $p_{val}=0,087$ (vs $5,1 \pm 7,3$ mm/deg $p_{val}=0,316$)
- Introduction des dénivelées hydrodynamiques comme équations d'observations de la compensation du NIREF



Résultats (3) : connexion altimétrique continent (IGN69) – Corse (IGN78)

Le système hydrodynamique devient le pivot de la connexion entre système qui n'ont pas de points en commun : les **territoires séparés par la mer**

$$H_{\text{IGN69}}(\text{Marseille}) - H_{\text{IGN78}}(\text{Ajaccio}) = 0,876 \text{ m}$$

Dénivelée hydrodynamique entre les origines (Marseille et Ajaccio) : 1,021 m

Biais entre les origines des systèmes : 14,5 cm

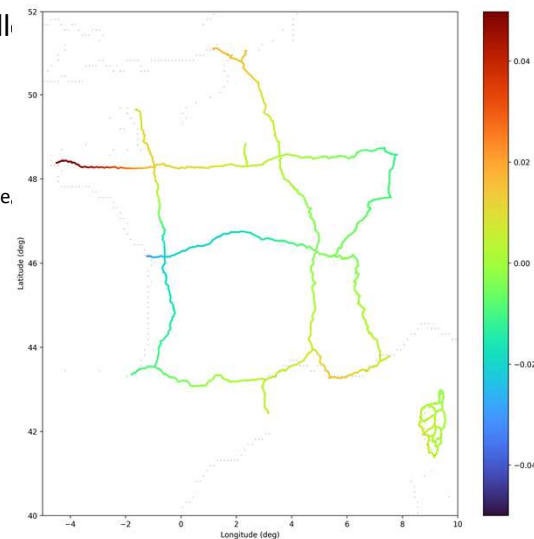
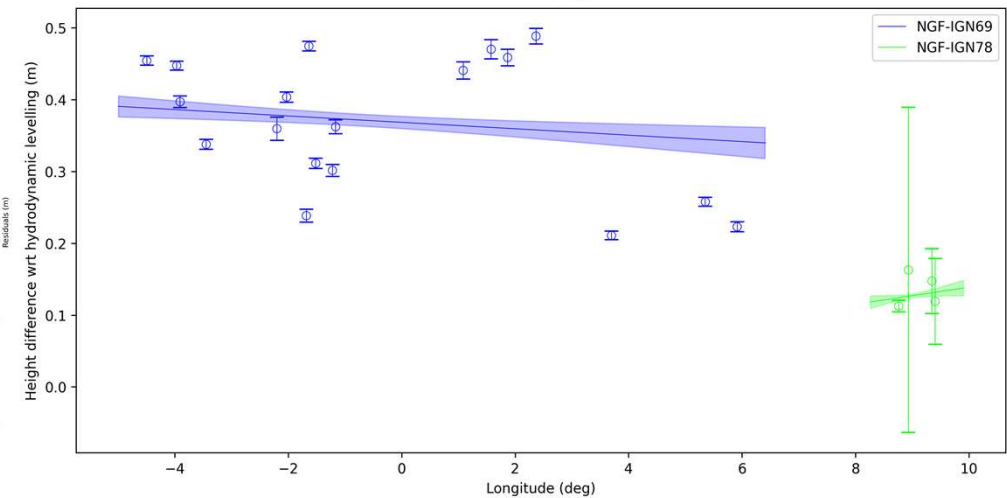
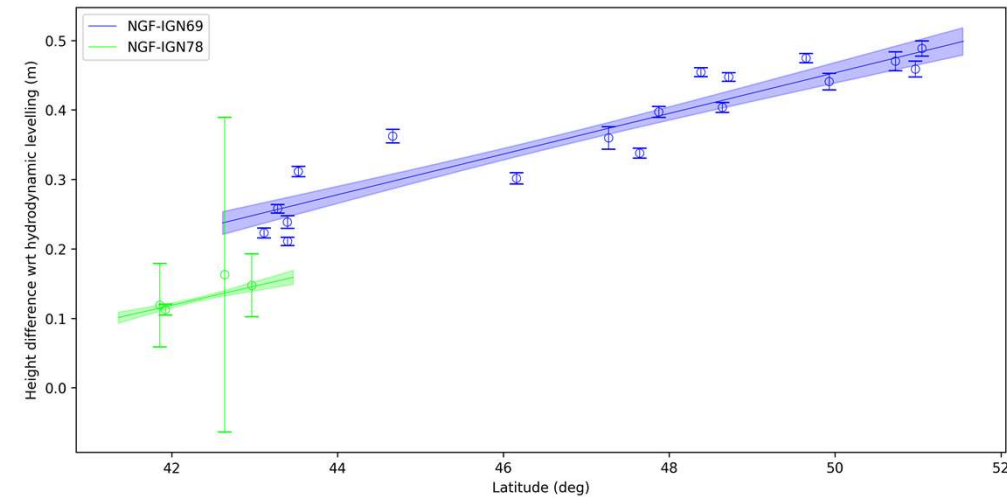
Pentes entre les deux systèmes :

Méridienne : $-0.003 \pm 0.007 \text{ m/deg}$ (quasi parall)

Zonale : $0.018 \pm 0.009 \text{ m/deg}$

Voir aussi Filmer et Featherstone (2012) sur la connexion Australie-Tasmanie, précision de 11 mm avec modèle océanique CARS2006, un ordre de grandeur plus bas qu'une approche purement géodésique

Première (?) compensation verticale continent + Corse !

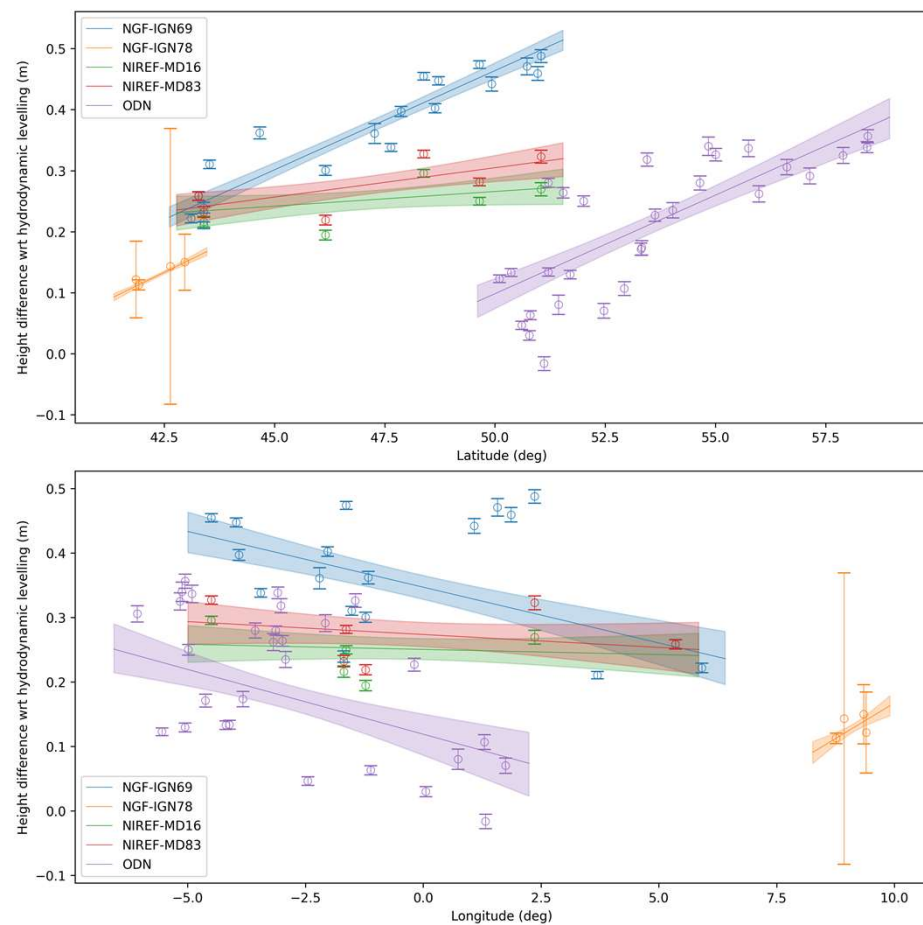


Résultats (4) : connexion altimétrique continent (IGN69) – Angleterre (ODN)

Système ODN :

Pente méridienne : 3,09 +/- 0,52 cm/deg

Pente zonale : -1,68 +/- 0,59 cm/deg

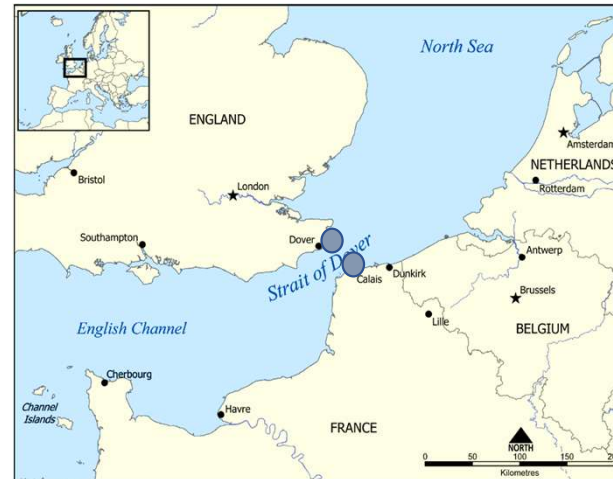


- Calais – Douvres

Hydro : 1,338 +/- 0,015 m

Nivellement géométrique via le tunnel sous la Manche :

- IGN : 1,337 m
- Ordnance Survey : 1,300 m



- Newlyn – Marseille

Hydro : 3,225 +/- 0,009 m

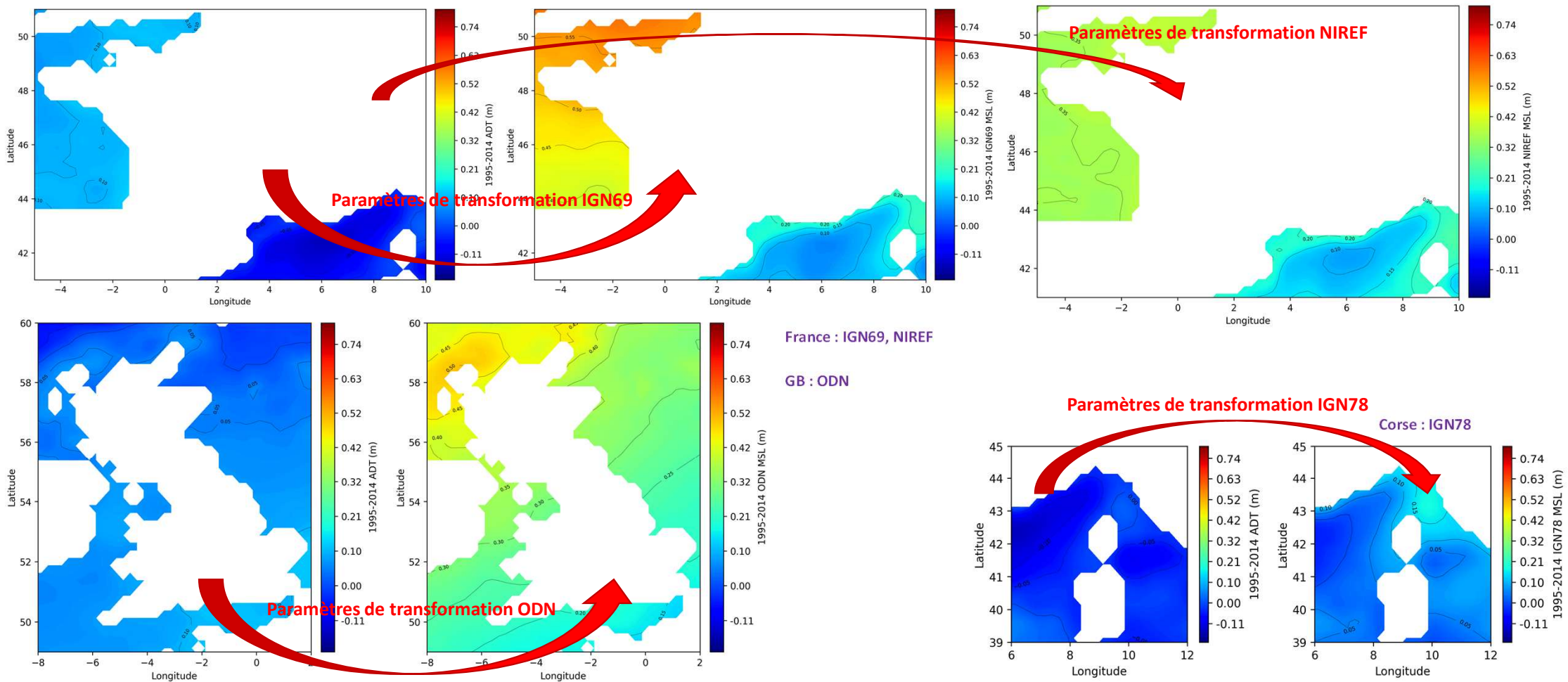
$H_{ODN}(N) - H_{IGN69}(M) = 3,090 \text{ m}$

⇒ Biais des systèmes 13,5 cm



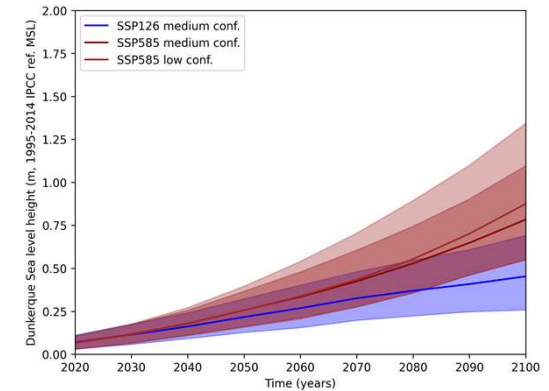
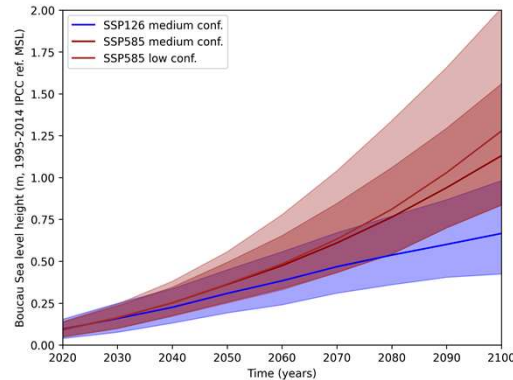
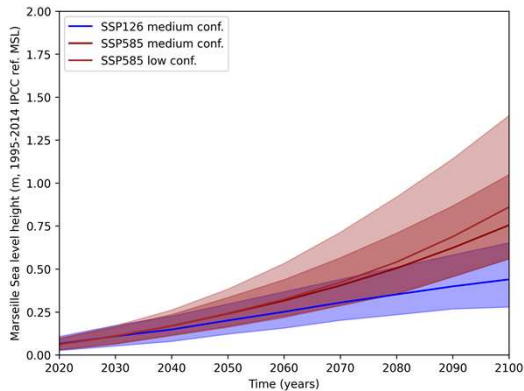
Résultats (5) : expression de l'altimétrie spatiale dans les systèmes altimétriques locaux

En appliquant les paramètres de transformations issus du nivellement hydrodynamique aux grilles ADT(t)=MDT+SLA(t), et en prenant le niveau moyen 1995-2014 (référence GIEC pour le niveau de la mer) => référence pour les projections climatiques

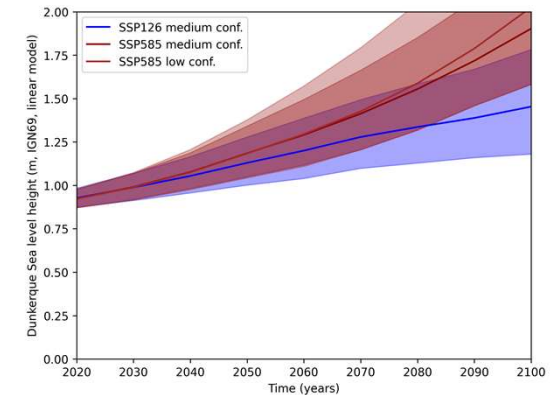
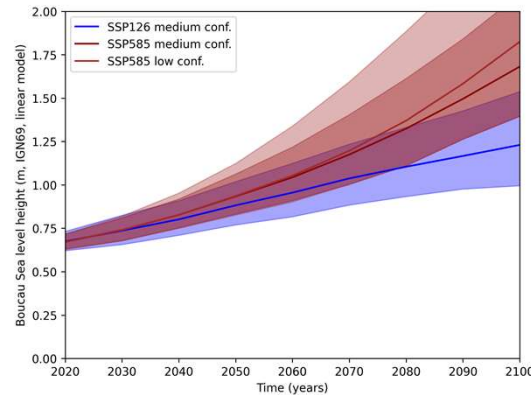
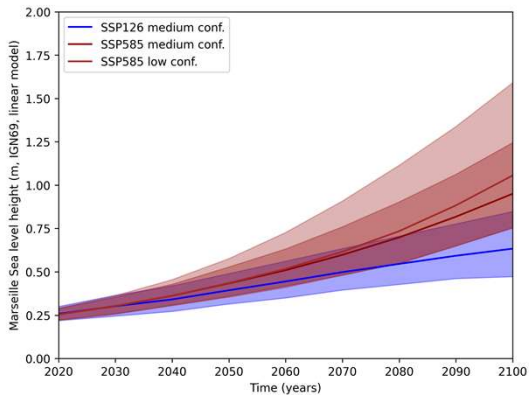


Résultats (6) : expression des projections du GIEC dans la référence nationale IGN69

- Simulations GIEC natives (Marseille, Boucau, Dunkerque)



- Après reconstruction de la référence GIEC 1995-2014 par l'altimétrie et application de la transformation geode vs IGN69 sur le geode de l'altimétrie



Effets conjugués de : différence de périodes de référence (1885-1896 vs 1995-2014), différence de niveau Méditerranée-Atlantique, pente de l'IGN69, imprécisions de la référence GIEC, résolution horizontale grille GIEC, etc

Conclusions et perspectives

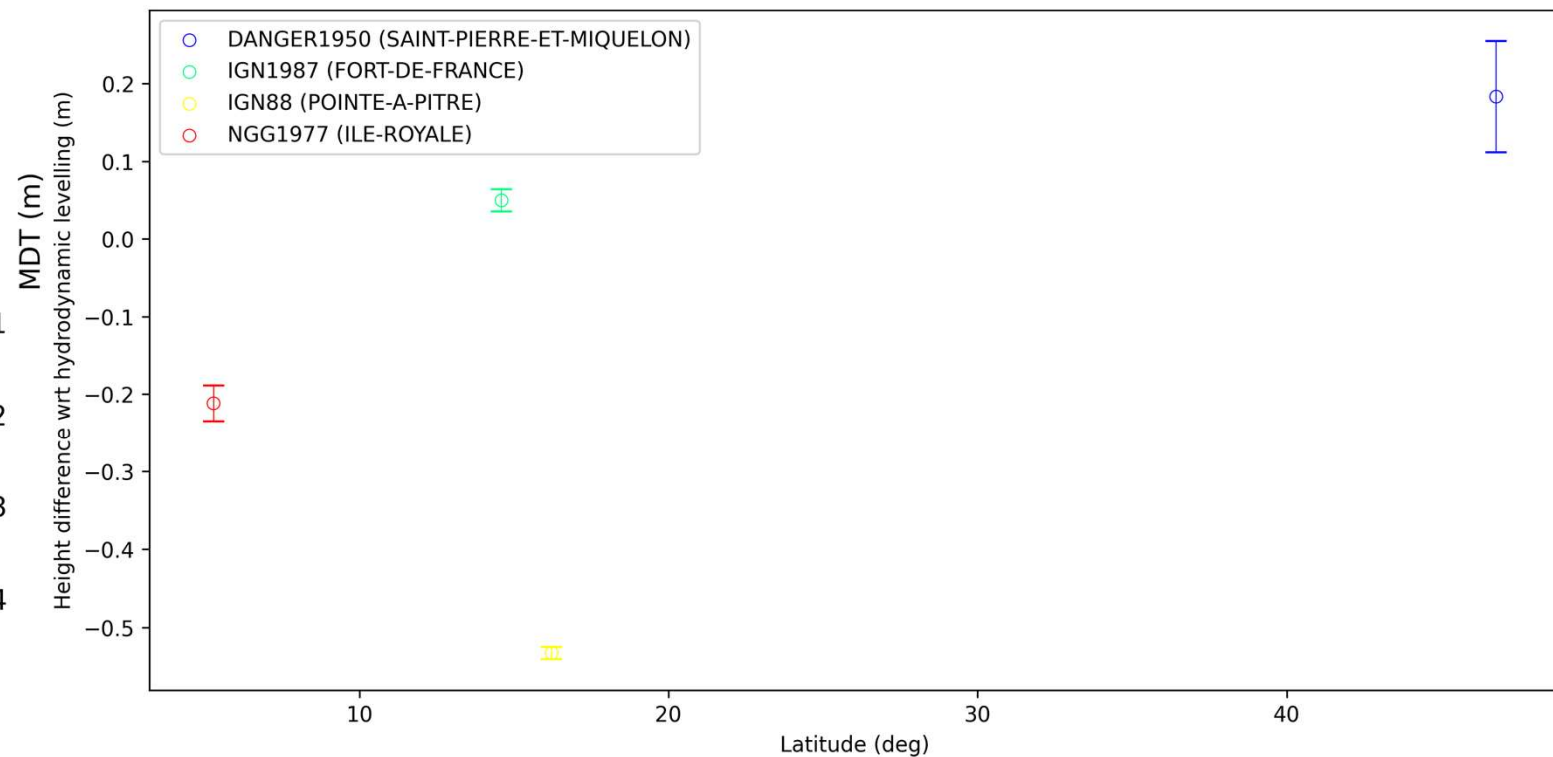
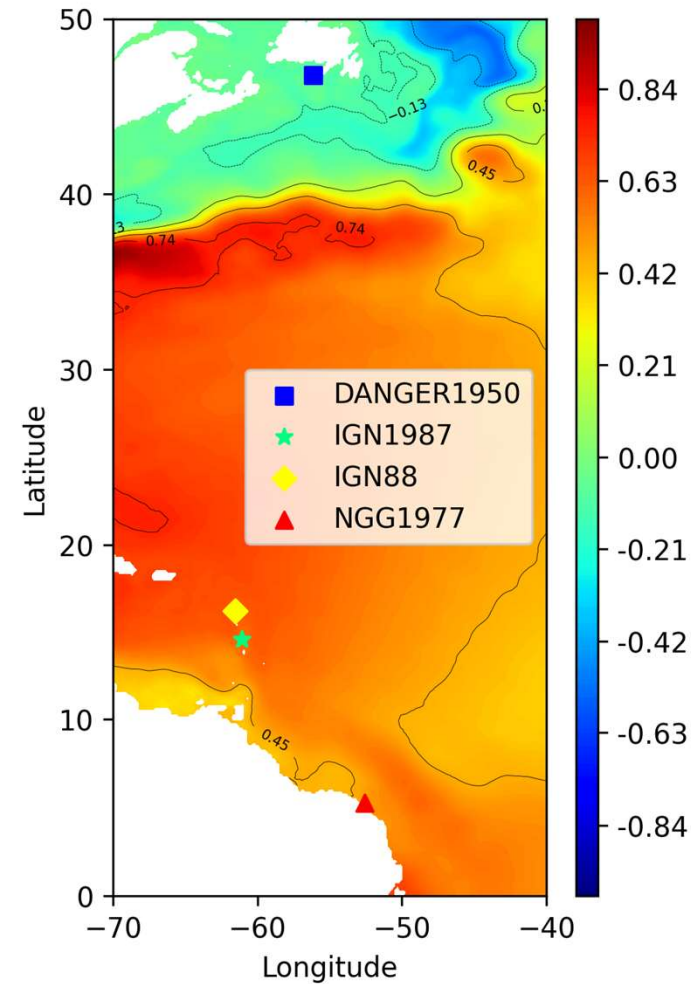
- **Le nivellement hydrodynamique permet une évaluation des systèmes altimétriques en testant leur parallélisme à une surface de niveau de référence : le géoïde**
- **La MDT et les marégraphes sont les pivots de la méthode**
- Originalité de notre approche : basée uniquement sur des produits dérivés des **observations**
- IGN69 : évaluation indépendante de la pente nord-sud (3 cm/deg) et est-ouest (-4 mm/deg) des biais des altitudes
- Dénivelées hydrodynamiques comme possibles contraintes pour le **calcul du futur système altimétrique français**
- Programmation de rattachements de marégraphes au NIREF
- Travail en cours d'évaluation EVRF2019 : importance de l'époque (GIA !)
- **Connexion entre les systèmes altimétriques des territoires séparés par la mer :**
 - Potentiel pour l'unification verticale archipels
 - Contribution possible à l'unification verticale européenne et internationale
 - (voir Afrasteh et al (2023) pour l'introduction des dénivelées hydrodynamiques sur le calcul du réseau européen, mais façade atlantique uniquement)
- Premier pas de **mise en cohérence des références géodésiques entre la terre et la mer**
- **Expression rigoureuse des produits dérivés de l'altimétrie dans les systèmes altimétriques dans lesquels sont exprimées les altitudes => indispensable pour caractériser les risques associés à l'élévation du niveau de la mer** (sujet parfois maltraité, même dans Nature, cf Seeger & Minderhoud 2026)

Merci de votre attention

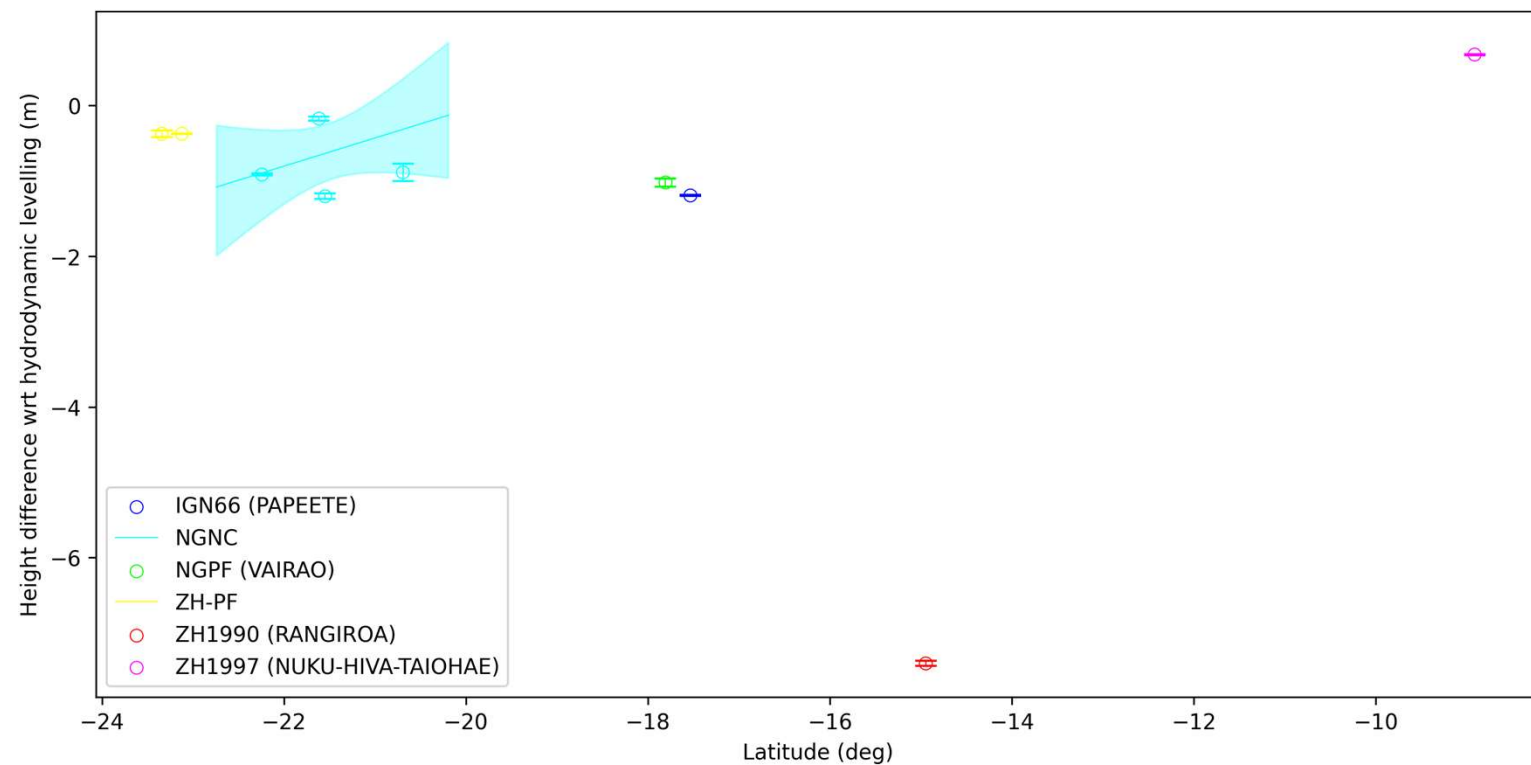
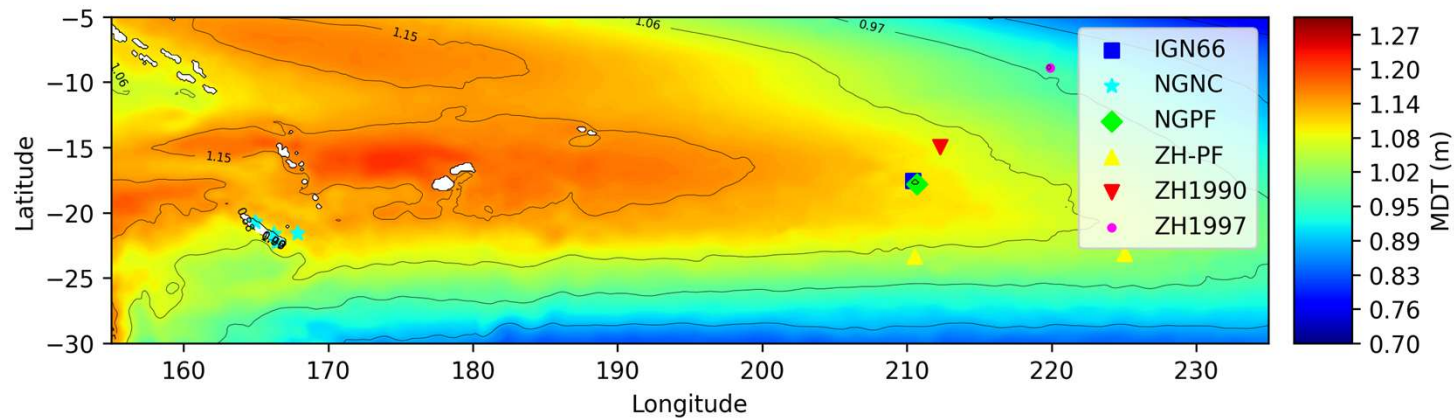
Contact : jonathan.chenal@ign.fr

Annexes : Outre-mers français

Différences entre les références altimétriques en Outre-Mer => Atlantique



Différences entre
les références
altimétriques en
Outre-Mer
=> Pacifique



Différences entre les références altimétriques en Outre-Mer => Indien

