

PROJECTIONS RÉGIONALES DU NIVEAU DE LA MER RELATIF EN MÉDITERRANÉE DANS UN SCÉNARIO À FORTES ÉMISSIONS

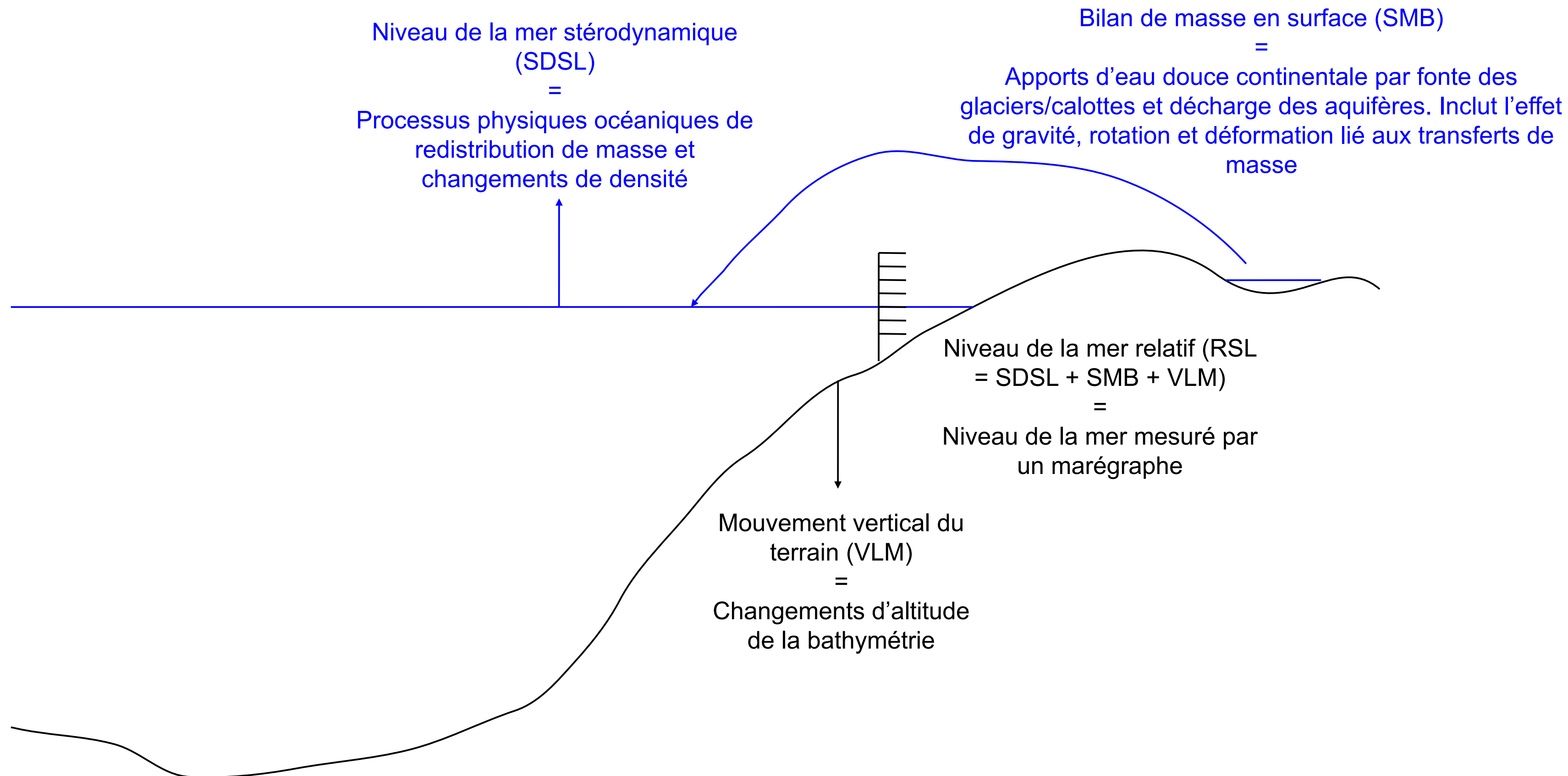
Robin WALDMAN¹, Ivan PARRAS-BERROCAL¹, Nicolas M. GONZALEZ², Samuel SOMOT¹

¹ Centre national de recherches météorologiques (CNRM), Météo-France/CNRS, Toulouse, France

² Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), Bologne, Italie

PROJECTIONS RÉGIONALES DU NIVEAU DE LA MER RELATIF EN MÉDITERRANÉE DANS UN SCÉNARIO À FORTES ÉMISSIONS

Niveau de la mer relatif : définitions



Littérature sur les projections en mer Méditerranée

References	Model type	Emission scenario	Projection	Sea level components	Mean sea level rise	Regional patterns
Tsimplis et al. (2008)	Coupled RCM	A2	2100	Steric	+13 cm	Steric sea level
Carrillo et al. (2012)	Coupled RCM	A1B	2050	Steric	+7 cm	-
Gualdi et al. (2013)	Ensemble of RCMs	A1B	2050	Steric	+7 cm to +12 cm	-
Adloff et al. (2015)	Ocean RCM	A1B, A2, B1	2100	Thermosteric	+34 to +49 cm	-
Jordà and Gomis (2013)	Coupled RCM	A2	2100	Steric + salt mass	+49.7 cm	-
Sannino et al. (2022)	Ocean RCM	RCP8.5	2100	Relative Sea Level	+67 cm	Sterodynamic sea level
Jabnoun and Harzallah (2024)	Ensemble of Ocean RCM	RCP4.5, RCP8.5, SSP5-8.5	2100	Relative Sea Level	+50 to +80 cm	Dynamic sea level
Melet et al. (2024)	Ensemble of GCMs	SSP2-4.5 SSP5-8.5	2100	Relative Sea Level	+57 cm +79 cm	Coastal relative sea level
Anav et al. (2024)	Fully-coupled RCM	SSP1-2.6 SSP2-4.5 SSP5-8.5	2100	Relative Sea Level	+41 cm +53 cm +65 cm	Dynamic sea level

✓ Etudes d'une seule composante du RSL avec un seul modèle

✓ Analyses multi-modèles de la composante stérique dans les scénarios CMIP3

✓ Projections du RSL avec un ensemble de modèles de climat globaux (GCMs)

✗ Approche multi-modèles pour caractériser le RSL avec les modèles de climat régionaux (RCSMs)

✗ Carte détaillée du RSL projeté en Méditerranée

✗ Interprétation mécanistique des changements de SDSL

Objectifs

- Reconstruire les tendances projetées du niveau de la mer relatif (RSL) moyen et leur distribution spatiale avec une approche ensembliste régionale.
- Evaluer les rôles respectifs de la physique océanique (SDSL), du bilan de masse continentale (SMB) et des mouvements verticaux du terrain (VLM).
- Interpréter les tendances projetées du niveau de la mer stérique et dynamique (SDSL).

Niveau de la mer stérodynamique

- Analyse des scénarios produits par l'ensemble de modèles climatiques régionaux (RCSM) méditerranéens MED-CORDEX (www.medcordex.eu) et leurs modèles globaux forceurs (GCMs)

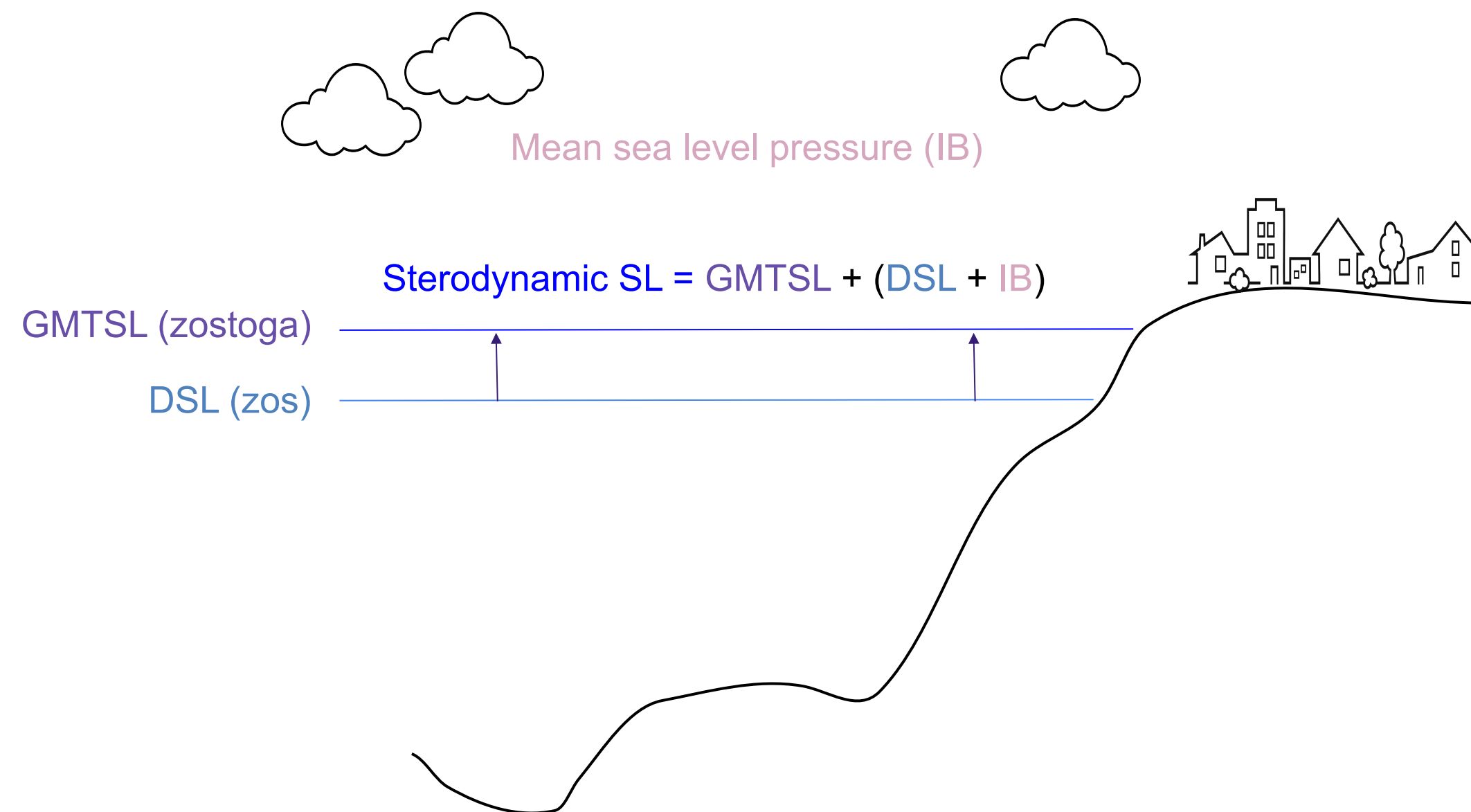
3 paires de modèles (RCSM | GCM) → Historiques & scénario fort en émissions SSP5-8.5

CNRM-RCSM6 | CNRM-ESM2-1

ENEA-REG2 | MPI-ESM1-2-HR

CCLM5-0-9-NEMOMED12-3-6 | EC-EARTH3-Veg

- Analyse des mécanismes du niveau de la mer stérodynamique (SDSL) dans le modèle régional CNRM-RCSM6

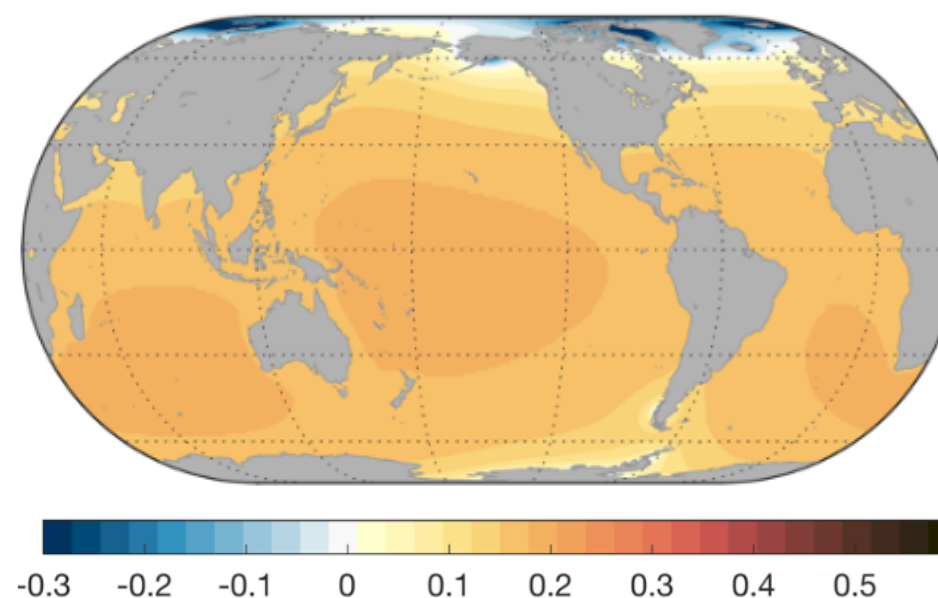


Bilan de masse en surface

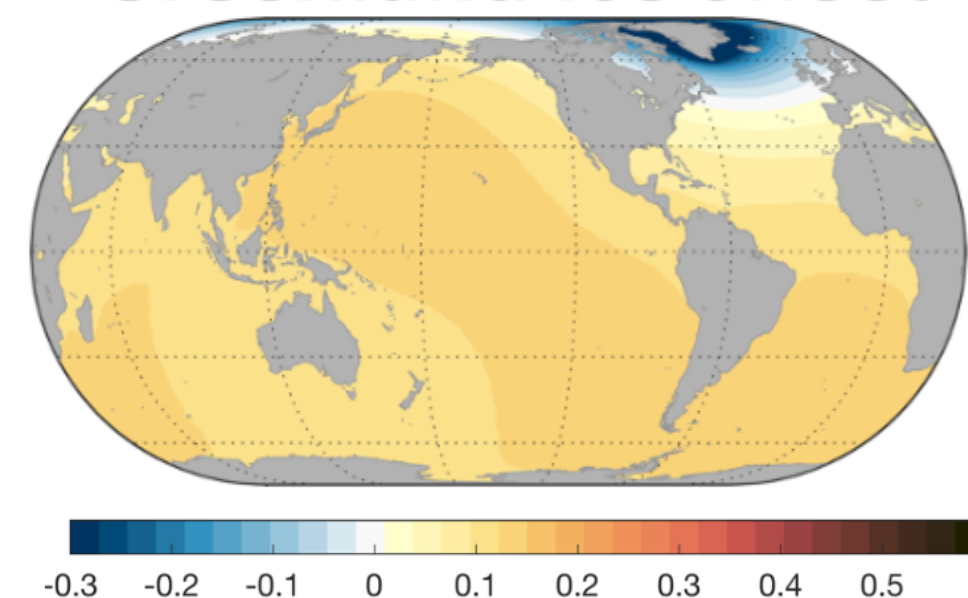
- Combinaison des séries temporelles probabilistes de l'exercice FACTS (Kopp et al 2023) et les distributions spatiales issues du 6ème rapport du GIEC (Fox-Kemper et al 2021)

Bilan de masse en surface par
composante (Fox-Kemper et al 2021)

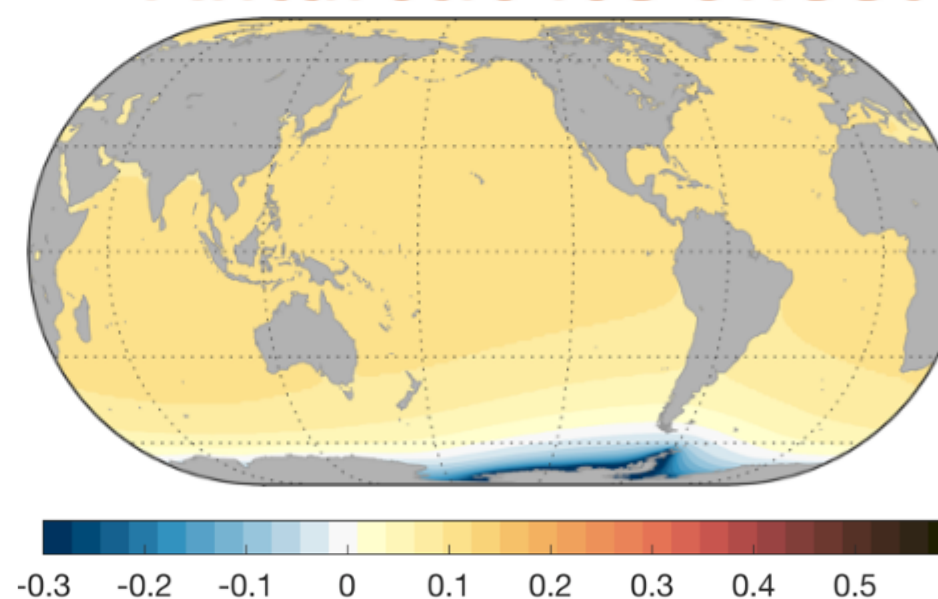
Glaciers



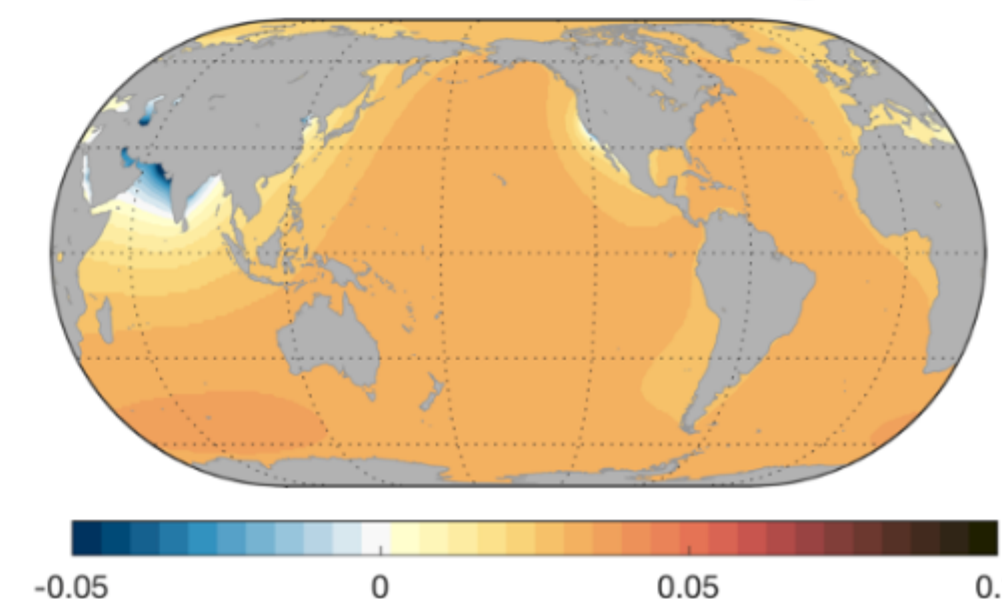
Greenland Ice Sheet



Antarctic Ice Sheet



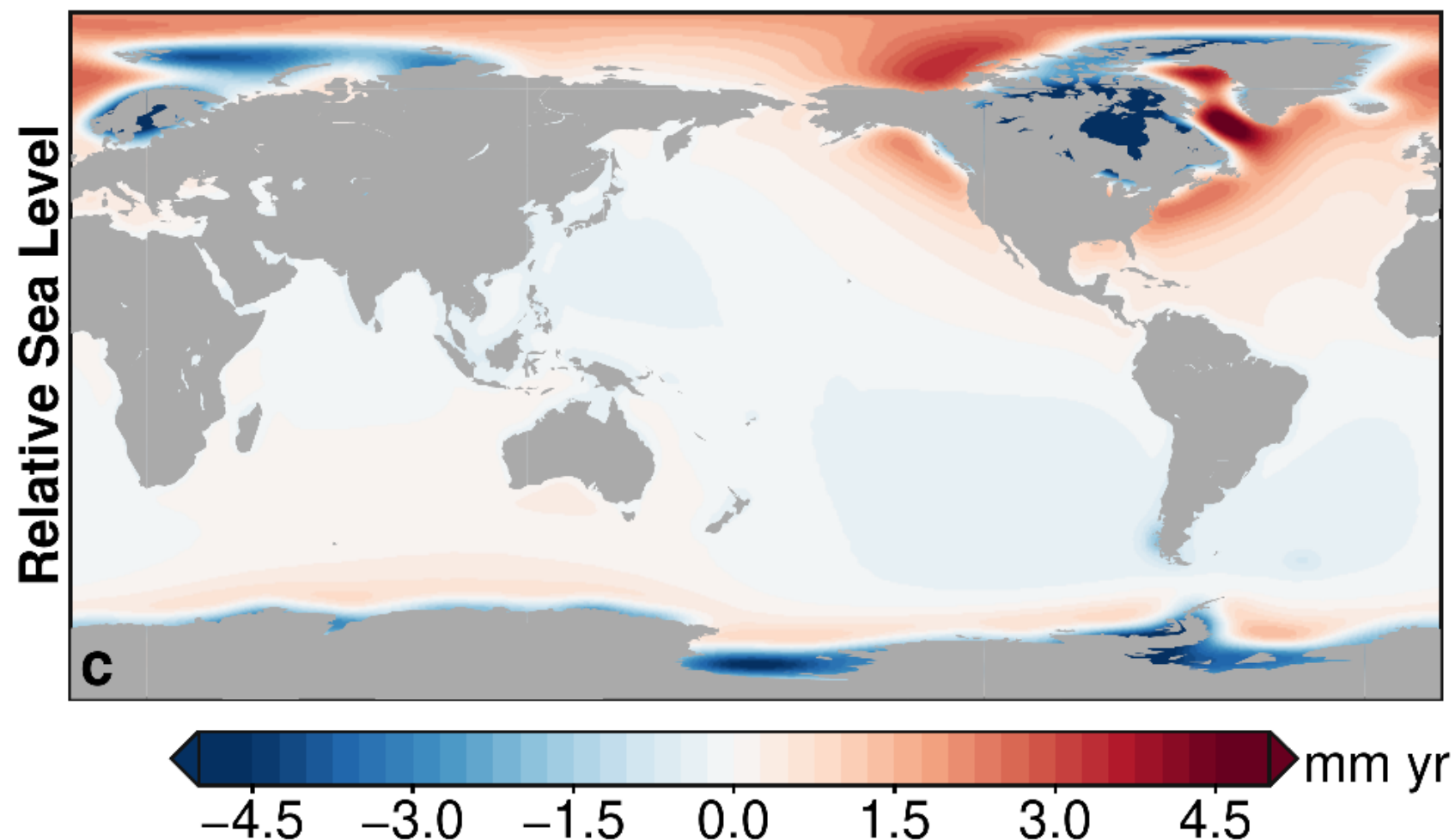
Land Water Storage



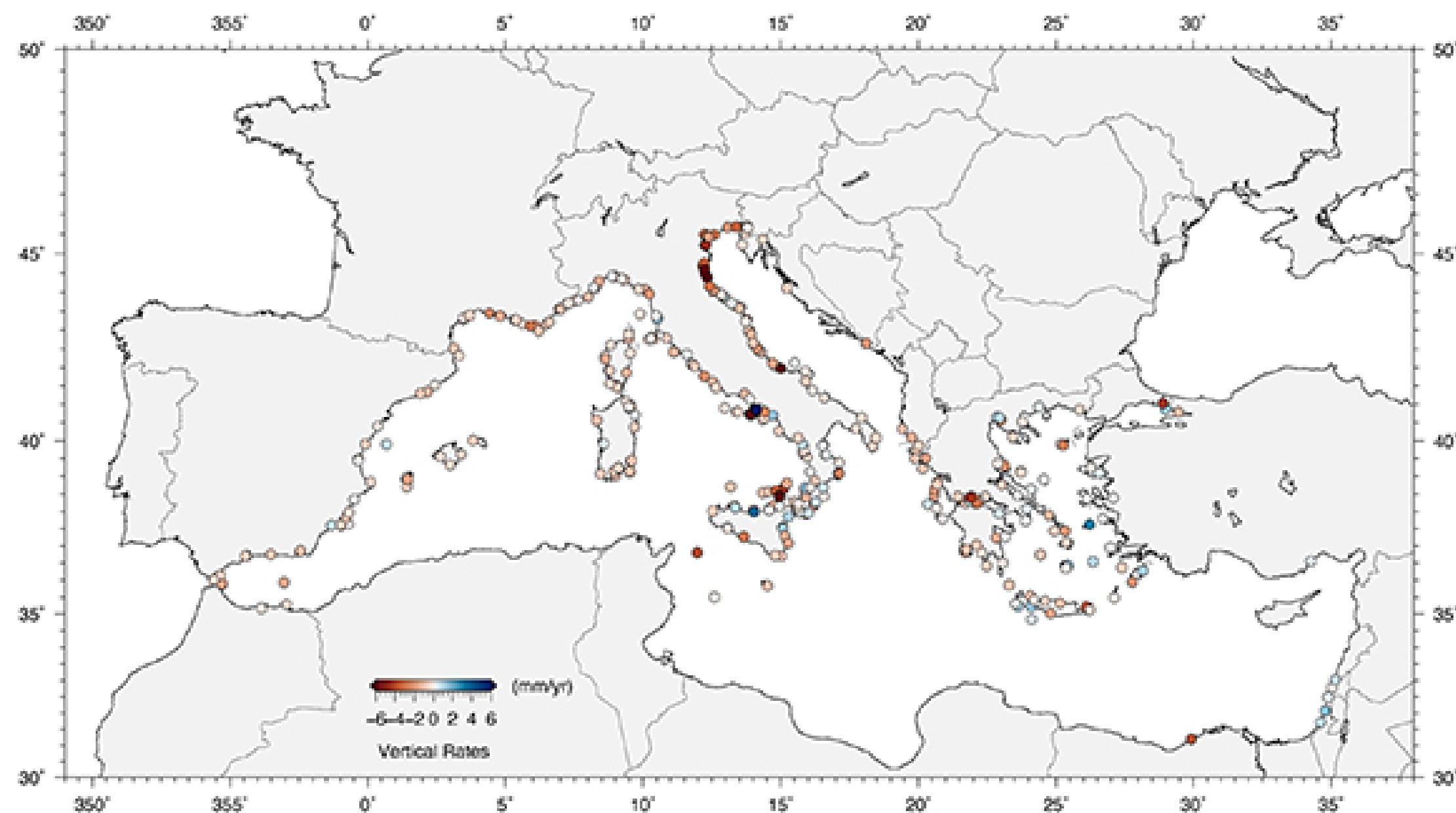
Mouvement vertical du terrain

- Combinaison du champ d'ajustement isostatique glaciaire (GIA) de grande échelle (Frederikse et al 2019) et des données de VLM locales issues de géodésie par satellite (GNSS) le long des côtes (Vecchio et al 2023)

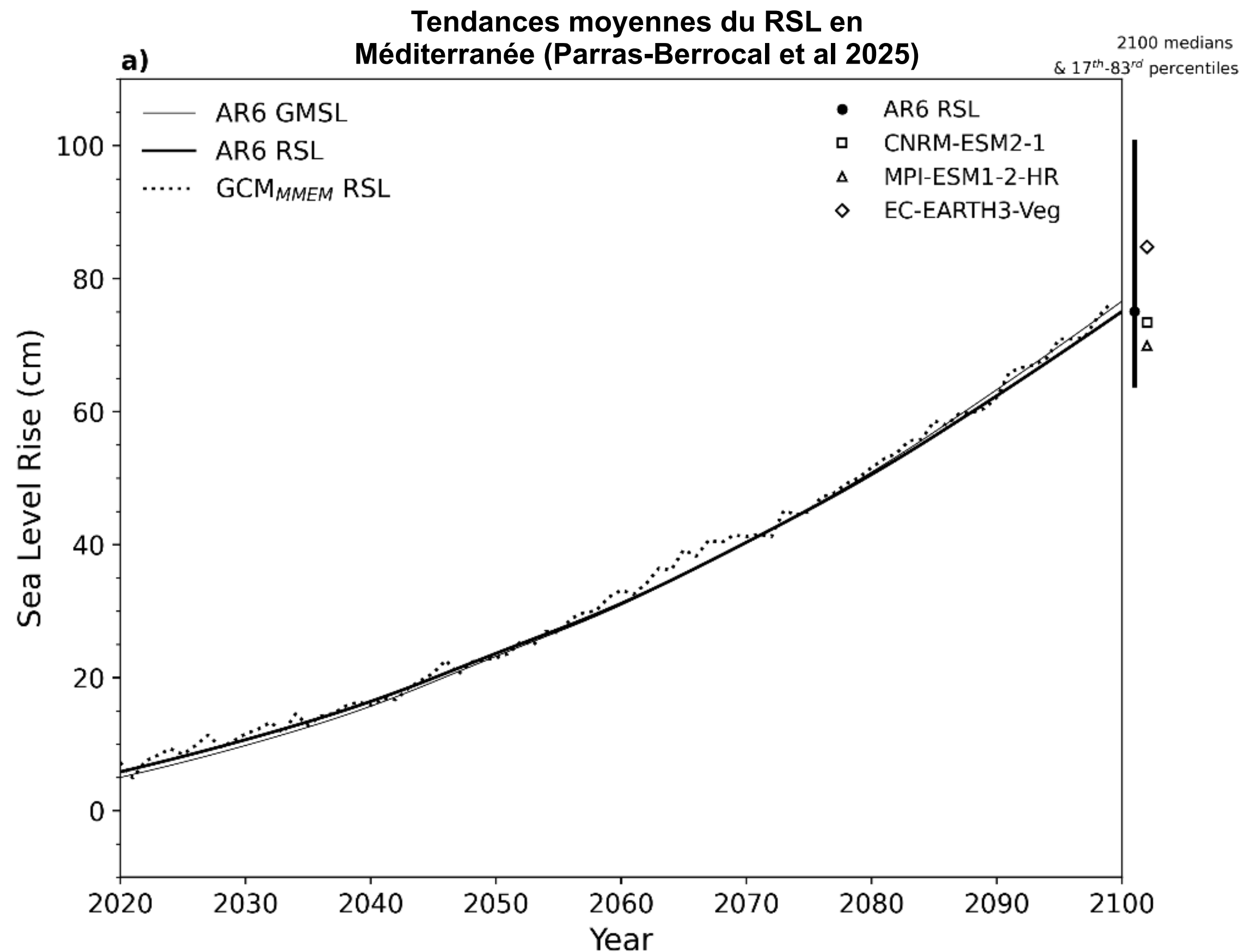
Ajustement isostatique glaciaire
(Frederikse et al 2019)



VLM par géodésie le long des côtes
méditerranéennes (Vecchio et al 2023)

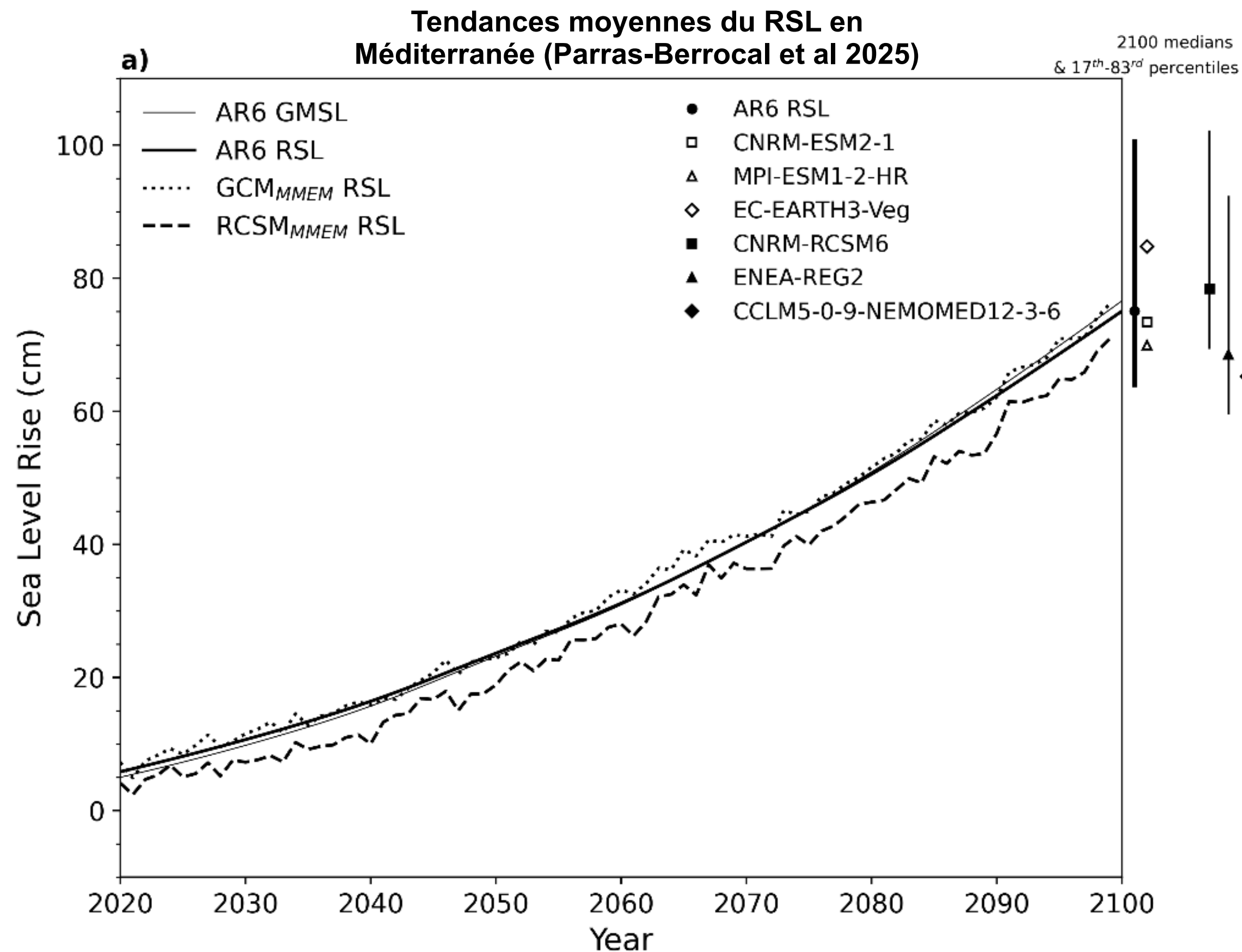


Niveau de la mer relatif moyen en Méditerranée



- La moyenne des modèles globaux est proche de l'estimation du GIEC

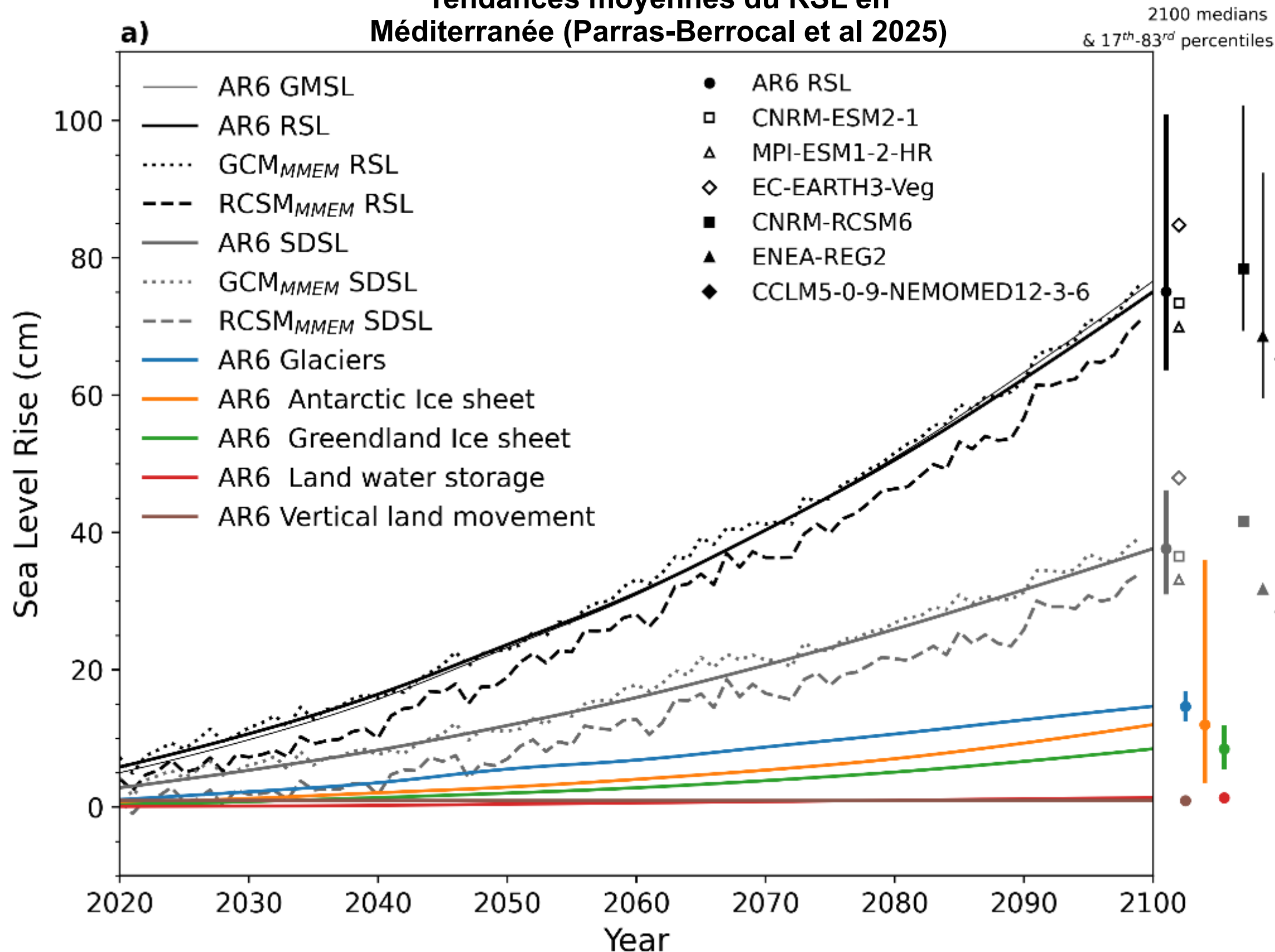
Niveau de la mer relatif moyen en Méditerranée



- La moyenne des modèles globaux est proche de l'estimation du GIEC
- Les modèles régionaux ne modifient pas les projections moyennes du niveau de la mer relatif
- Tendances du niveau de la mer relatif :
 - AR6 = +8.6mm/an
 - Modèles globaux = +8.7mm/an
 - Modèles régionaux = +8.4mm/an
- Tendance moyenne en Méditerranée 1-9% plus faible que la moyenne globale et 6-15% plus faible qu'en Atlantique poche (Golfe de Cadiz)

Niveau de la mer relatif moyen en Méditerranée

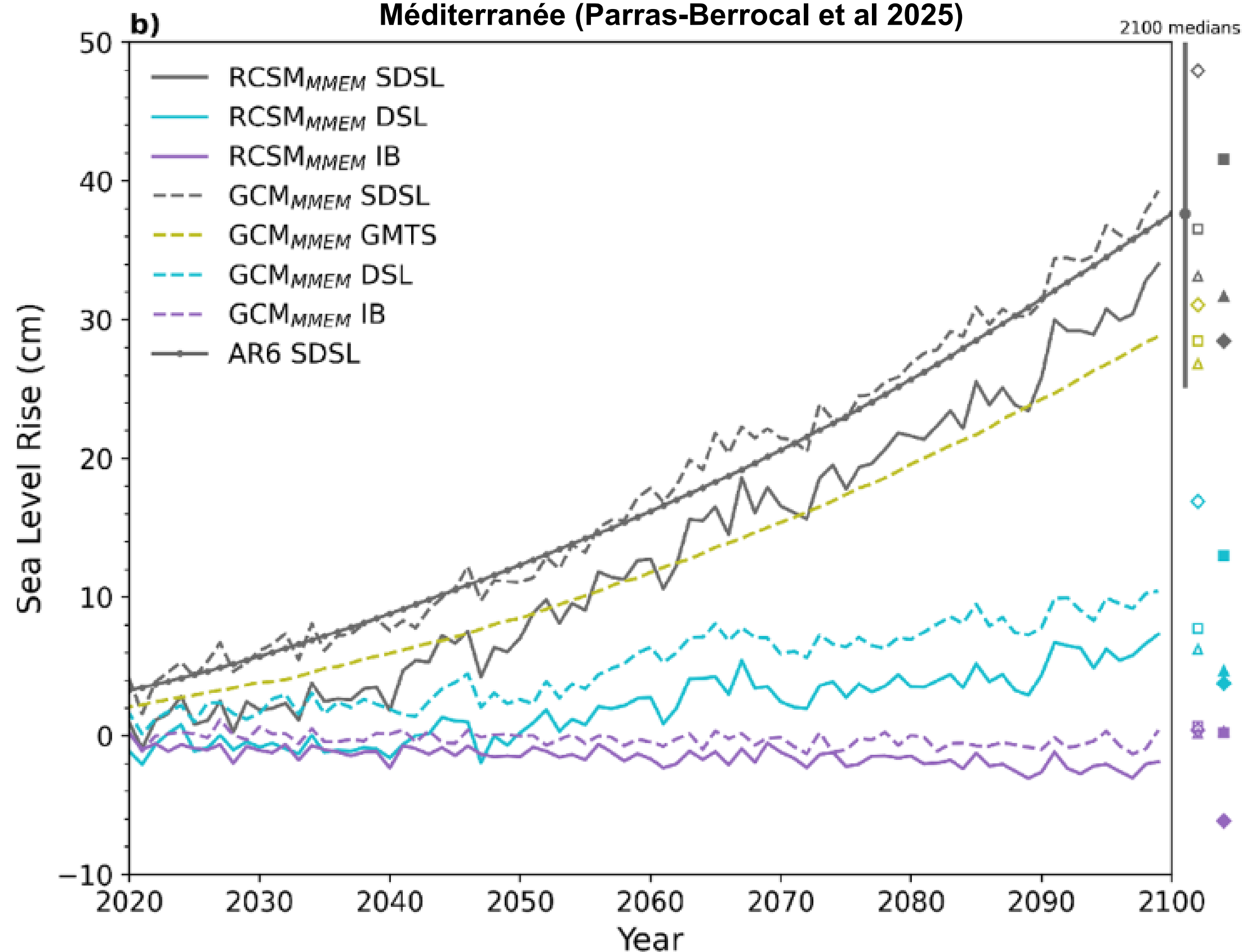
Tendances moyennes du RSL en
Méditerranée (Parras-Berrocal et al 2025)



- La moyenne des modèles globaux est proche de l'estimation du GIEC
- Les modèles régionaux ne modifient pas les projections moyennes du niveau de la mer relatif
- Tendances du niveau de la mer relatif (stérodynamique) :
 - AR6 = +8.6mm/an (+4.4mm/an)
 - Modèles globaux = +8.7mm/an (+4.5mm/an)
 - Modèles régionaux = +8.4mm/an (+4.2mm/an)
- Tendance moyenne en Méditerranée 1-9% plus faible que la moyenne globale et 6-15% plus faible qu'en Atlantique poche (Golfe de Cadiz)
- Principales composantes : physique océanique et bilan de masse
- Principale incertitude : calotte Antarctique

Niveau de la mer stérodynamique

Tendances moyennes du DSL en
Méditerranée (Parras-Berrocal et al 2025)

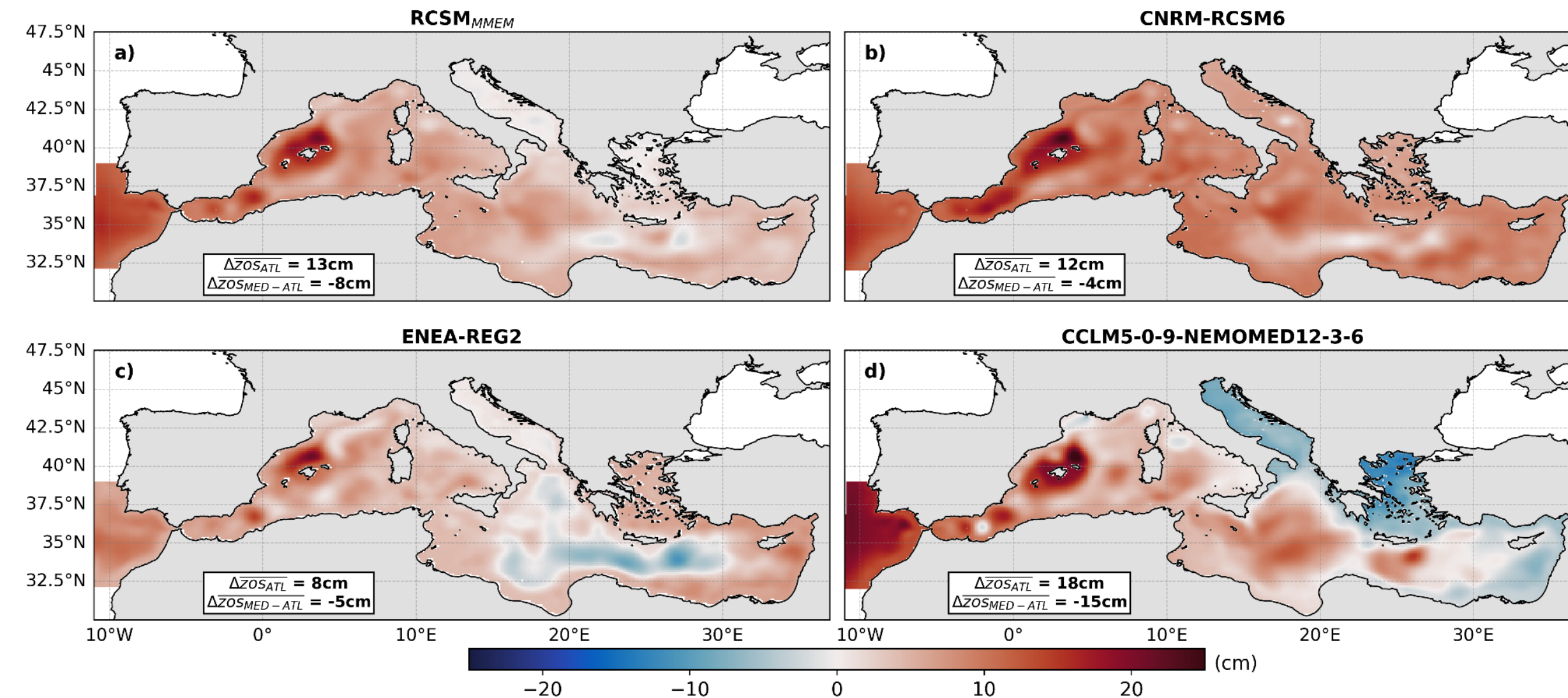


- Principale composante : la dilatation moyenne globale de l'océan (GMTS).
- Contribution supplémentaire de la dynamique (DSL), de +3cm à +8cm à horizon 2100.
- Effet négligeable de la pression atmosphérique

Niveau de la mer stérodynamique

Changements du niveau de la mer dynamique en Méditerranée (2080-2099) - (1995-2014) (Parras-Berrocal et al 2025)

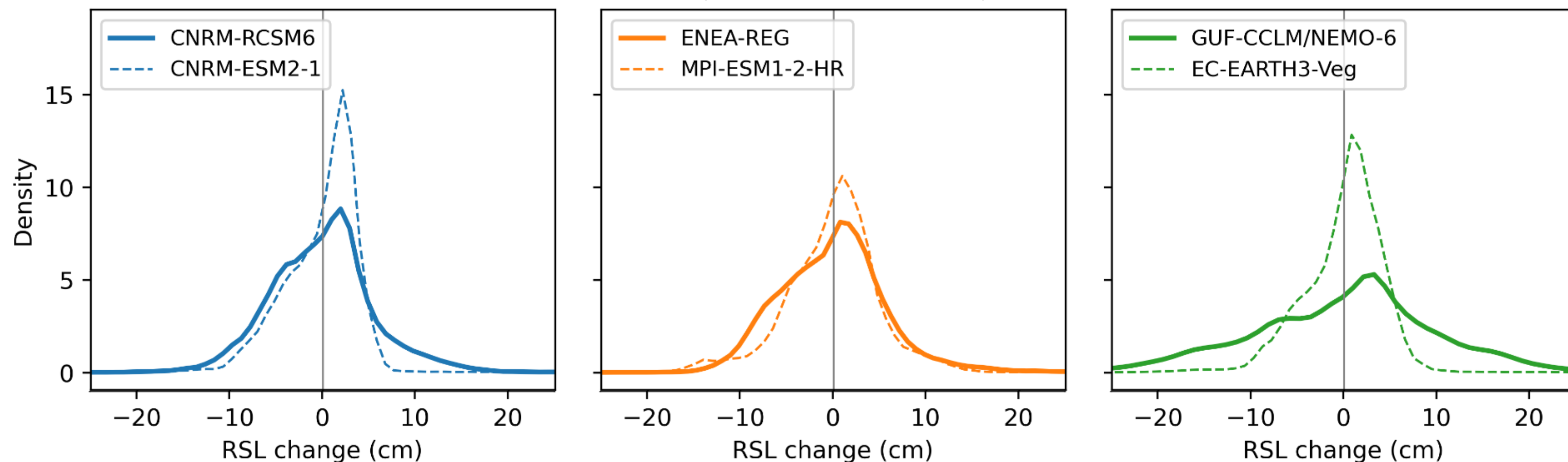
- Signal positif (+8cm à +18cm) venant de l'Atlantique
- Affaiblissement du signal (-4cm à -15cm) en Méditerranée
- Changements locaux peu robustes, hormis un fort anticyclone (anomalie positive) en mer des Baléares



Niveau de la mer stérodynamique

- Effet principal des modèles de climat régionaux : augmenter la variabilité spatiale des tendances dynamiques (DSL) projetées, et donc du niveau de la mer relatif (RSL)

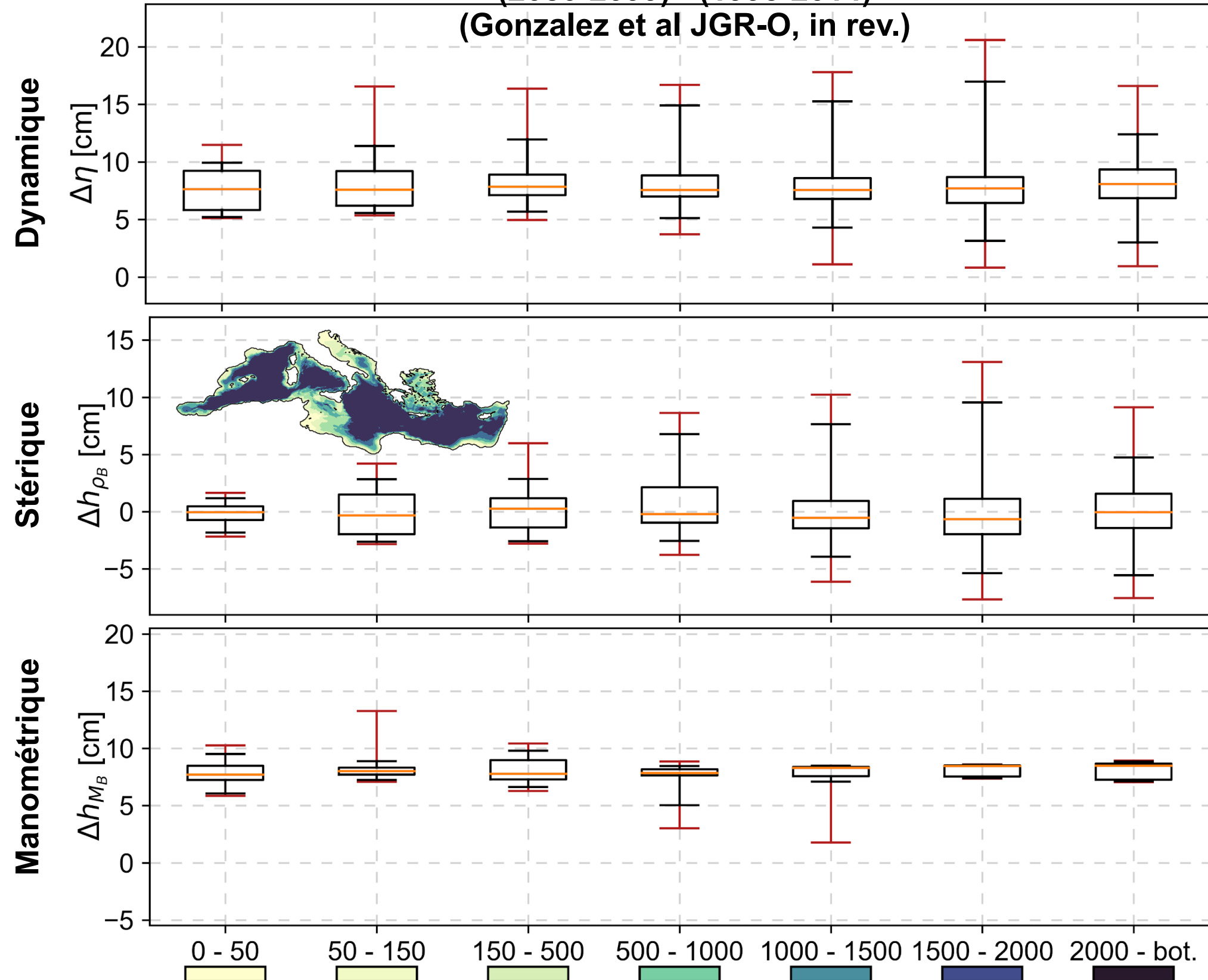
Densité de probabilité spatiale de l'anomalie locale du RSL
(2080-2099) - (1995-2014)
(Parras-Berrocal et al 2025)



Niveau de la mer stérodynamique

Tendance du niveau de la mer dynamique dans CNRM-RCSM6
par classes de bathymétrie
(2080-2099) - (1995-2014)

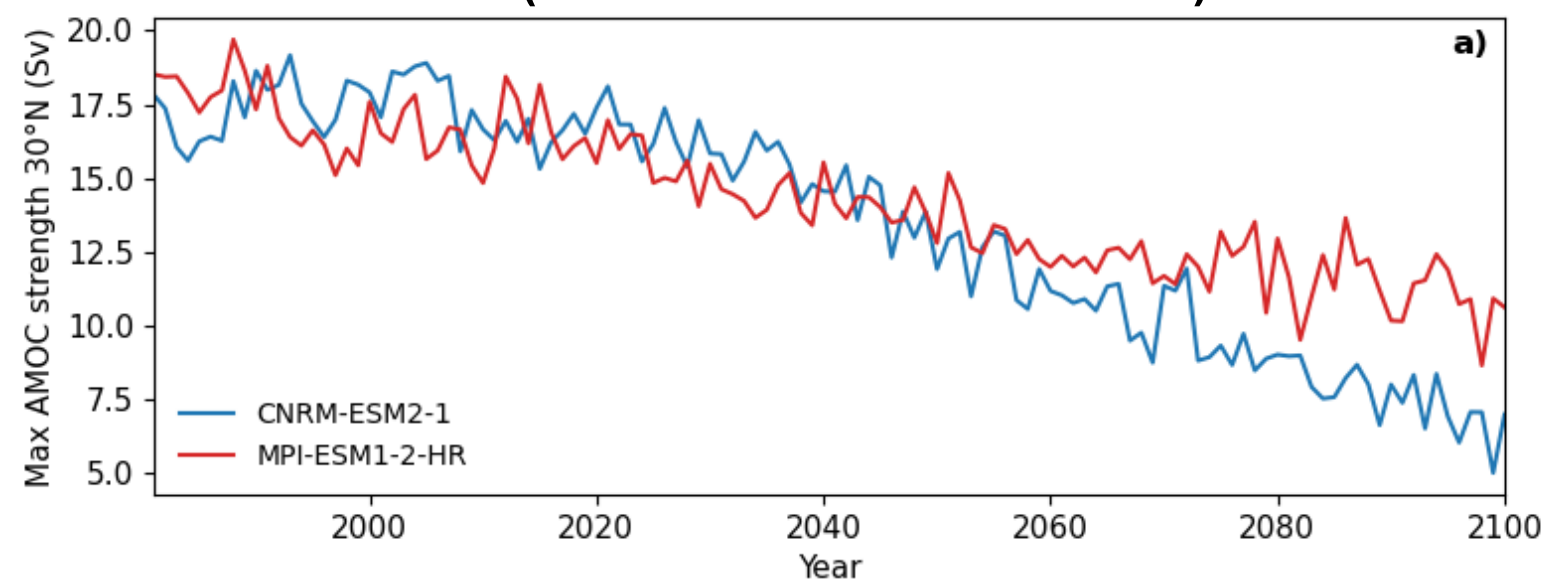
(Gonzalez et al JGR-O, in rev.)



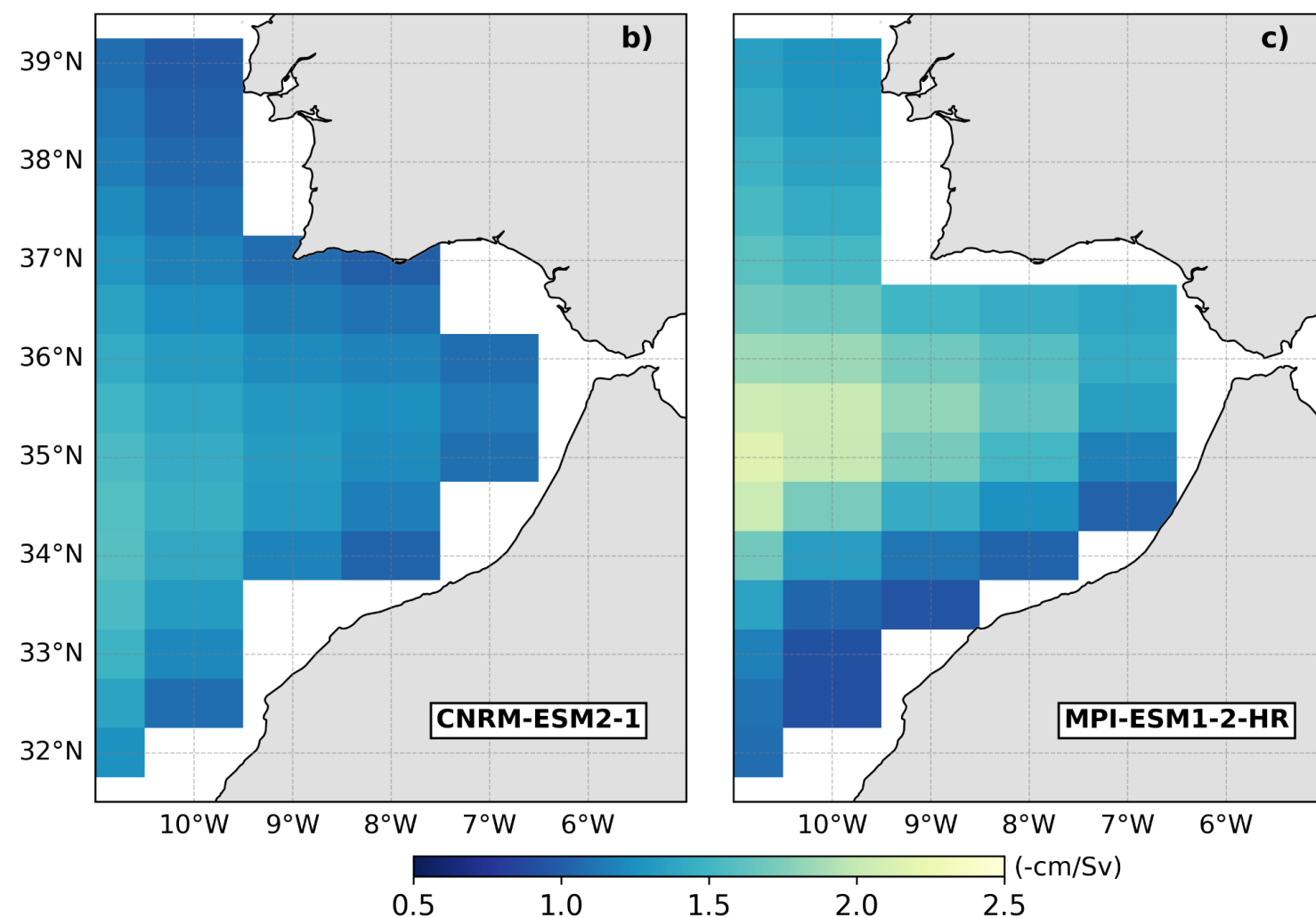
- Les tendances dynamiques varient peu le long des côtes (en eaux peu profondes)
- Les variations régionales sont stériques et principalement en eaux profondes.
- Le signal moyen de grande échelle est manométrique : apport de masse vers la Méditerranée.

Niveau de la mer stérodynamique

Séries de l'AMOC et régression DSL-AMOC en Atlantique proche dans le scénario SSP5-8.5 (Parras-Berrocal et al 2025)

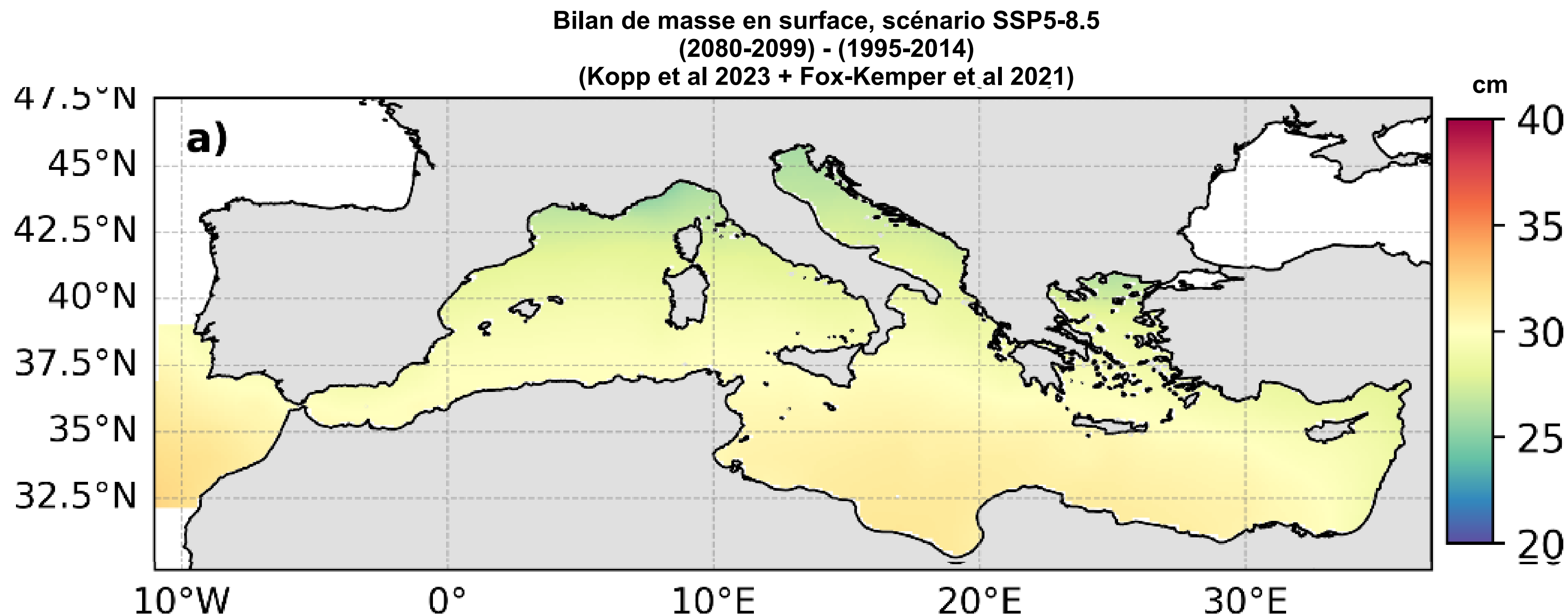


- L'AMOC à 30°N diminue fortement en scénario dans deux des trois modèles de climat globaux forceurs.
- Cet affaiblissement est associé à une augmentation du niveau de la mer dynamique en Atlantique nord-est, en accord avec les projections des ensembles CMIP5 (Chen et al 2018) et CMIP6 (Pardaens 2023)



Bilan de masse en surface

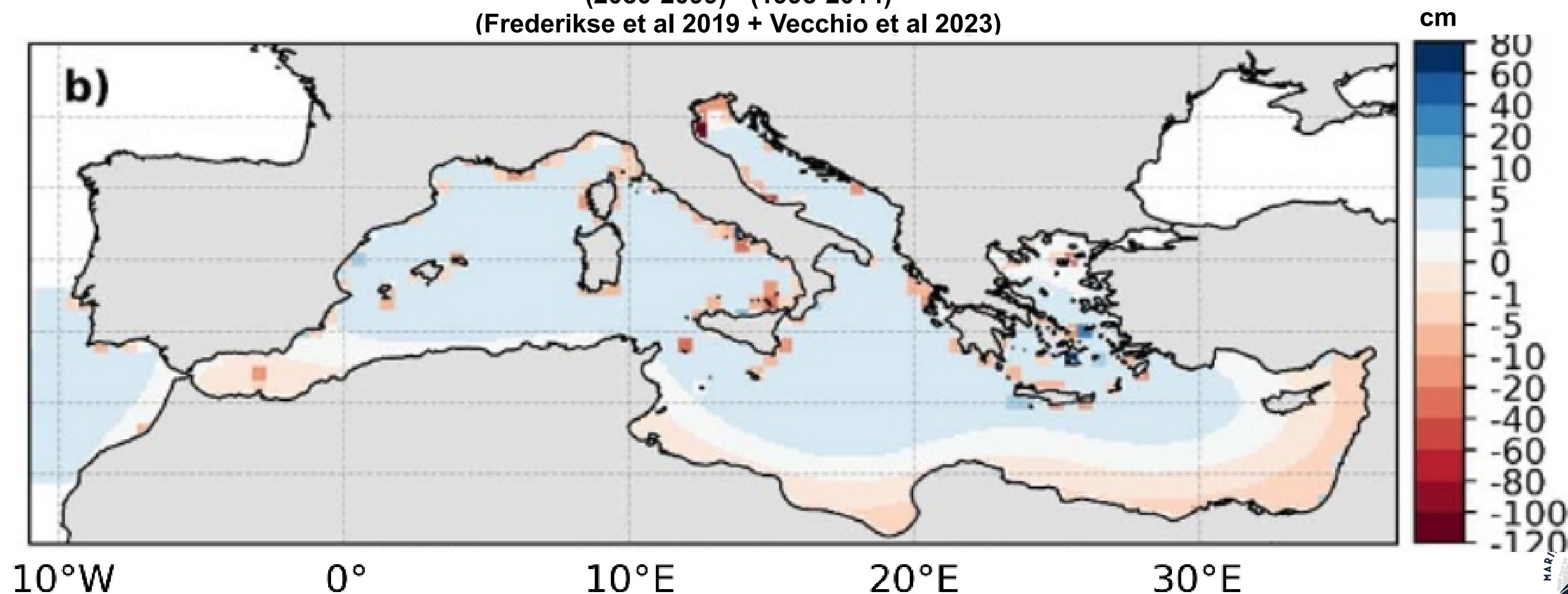
- Effets régionaux de gravité, rotation et déformation induisant un gradient nord-sud de SMB



Mouvements verticaux du terrain

- Faible contribution à grande échelle.
- Localement, effet pouvant devenir dominant par des processus tectoniques et sédimentaires : de -83cm (tectonique sud Egée) à +115cm (subsidence, compaction et extraction dans le delta du Po)

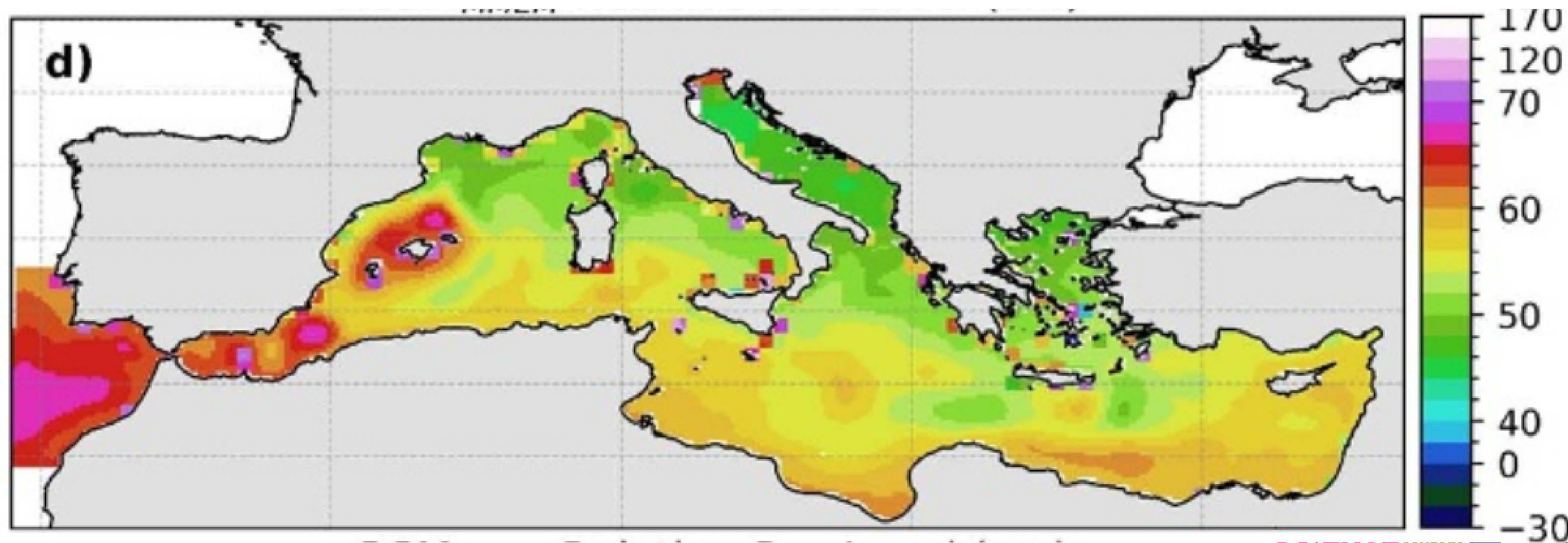
Mouvements verticaux du terrain
(2080-2099) - (1995-2014)
(Frederikse et al 2019 + Vecchio et al 2023)



Niveau de la mer relatif – distribution régionale

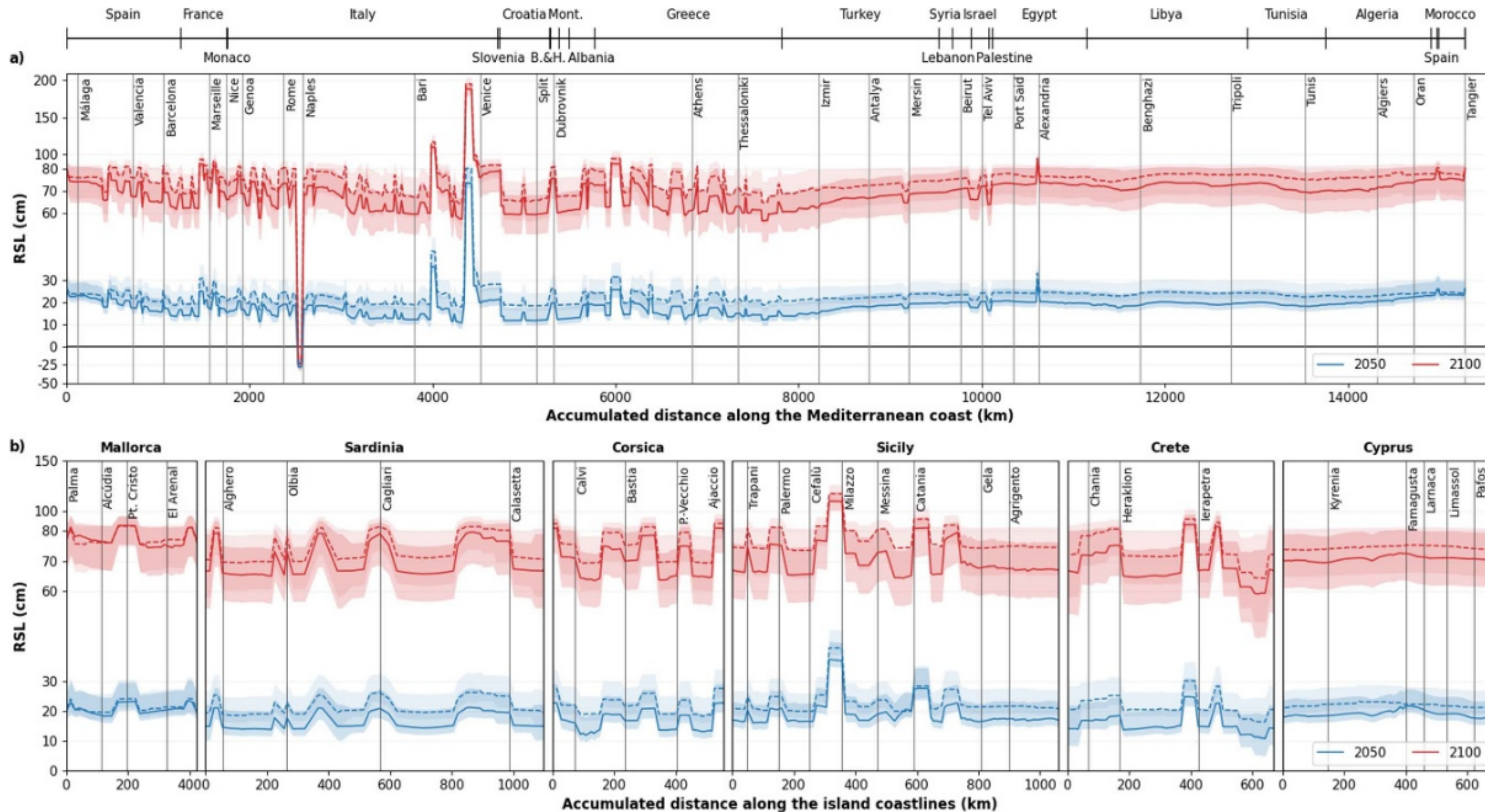
- Variations régionales dominées par la dynamiques, variations locales dominées par les mouvements verticaux du terrain.
- Valeurs comprises entre -29cm (mer Egée) et +162cm (delta du Po)

Niveau de la mer relatif
(2080-2099) - (1995-2014)
(Parras-Berrocal et al 2025)



Niveau de la mer relatif – distribution régionale

Tendances du niveau de la mer relatif le long des côtes méditerranéennes (Parras-Berrocal et al 2025)



- Fortes variations locales le long des côtes.
- Besoin de compléter les estimations par géodésie, notamment dans la moitié sud du bassin.

- Dans un scénario fort en émissions, projections d'une hausse du niveau de la mer relatif moyen à horizon 2100 de 60-93cm en mer Méditerranée, avec des variations locales allant de -29cm à +162cm.
- Apport des modèles de climat régionaux dans les projections régionales du niveau de la mer relatif en Méditerranée : plus de variabilité spatiale mais signal globalement cohérent avec les projections globales.
- Niveau de la mer stérodynamique :
 - ~50 % de la montée des eaux moyenne, principalement dû à la dilatation globale
 - montée des eaux supplémentaire de 3cm à 8cm induit par un apport de masse depuis l'Atlantique en réponse au ralentissement de l'AMOC.
 - variabilité régionale avec notamment une tendance positive en mer des Baléares.
- Bilan de masse en surface :
 - ~50 % de la montée des eaux moyenne, domine l'incertitude totale
 - faible gradient nord-sud, valeurs en Méditerranée inférieures à la moyenne globale
- Mouvement vertical du terrain : domine les variations locales le long des côtes

- Parras-Berrocal, I. M., Waldman, R., Gonzalez, N. M., Ahrens, B., Cabos, W., Jordà, G., ... & Somot, S. (2025). Regionalized Mediterranean relative sea level projections under high-emission regional climate scenarios. Environmental research letters, 20(11), 114068. DOI 10.1088/1748-9326/ae15a5
- Nicolas M. Gonzalez, Robin Waldman, Ivan M. Parras-Berrocal, Yuna Le Perron, Manon Le Dain, and Camille Pétard. Decomposing Steric and Dynamic Sea-Level Changes in Coupled Climate Projections: Implications for the Mediterranean Sea. Journal of Geophysical Research – Oceans (in revision)