



HAL
open science

Évaluer l'Impact de la métropole Aix-Marseille sur l'Acidification de la baie de Marseille et les conséquences sur les microorganismes marins, approche par Modélisation (IAMM) - Résumé exécutif

Lucille Barré, Frédéric Diaz, Thibaut Wagener, Christel Pinazo

► To cite this version:

Lucille Barré, Frédéric Diaz, Thibaut Wagener, Christel Pinazo. Évaluer l'Impact de la métropole Aix-Marseille sur l'Acidification de la baie de Marseille et les conséquences sur les microorganismes marins, approche par Modélisation (IAMM) - Résumé exécutif. Institut Méditerranéen d'Océanologie (M.I.O). 2024. hal-04702002v2

HAL Id: hal-04702002

<https://hal.science/hal-04702002v2>

Submitted on 27 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Évaluer l'Impact de la métropole Aix-Marseille sur l'Acidification de la baie de Marseille et les conséquences sur les microorganismes marins, approche par Modélisation (IAMM)

Résumé exécutif

Projet financé par l'AERMC – Etudes générales et réseau de suivi

Lucille Barré¹, Frédéric Diaz¹, Thibaut Wagener¹, Christel Pinazo¹

Septembre 2024

¹Aix Marseille Univ., Université de Toulon, CNRS, IRD, MIO, UM 110, 13288 Marseille, France

Contact : Lucille Barré (lucille.barre@mio.osupytheas.fr), Thibaut Wagener (thibaut.wagener@mio.osupytheas.fr) et Christel Pinazo (christel.pinazo@mio.osupytheas.fr)

Résumé

La baie de Marseille est un environnement côtier méditerranéen complexe soumis à de nombreux apports externes et affecté par divers processus hydrodynamiques. Compte tenu de cette complexité, sa réaction face au changement global est particulièrement difficile à anticiper. Dans cette étude, une approche par modélisation couplée physique biogéochimie, idéale dans ce type d'environnement, est utilisée pour envisager l'évolution des propriétés de la baie pendant les 30 prochaines années, pour un scénario de changement climatique optimiste (RCP 2.6) et pessimiste (RCP 8.5). Les tendances obtenues montrent une augmentation de la température (comprise entre 0.07 et 0.25°C pour les 30 ans) et une diminution du pH (comprise entre -0.02 et -0.05 unité pH pour les 30 ans) dans les eaux de surface de la baie. Cependant, ces résultats doivent être utilisés avec précaution car ils sont entachés par différents biais : (i) une sous-estimation de la température en été, et une sous-estimation globale de la $p\text{CO}_2$ marine, et (ii) une forte dépendance au forçage atmosphérique choisi qui est connu pour être dans la fourchette basse des projections des écarts à la normale de température de l'atmosphère et de leur variabilité.

Mots clés : baie de Marseille, Modélisation, Réchauffement, Acidification, Changement climatique

1 Introduction

1.1 Contexte

Depuis la révolution industrielle, la concentration en CO₂ atmosphérique n'a cessé d'augmenter atteignant de nos jours la valeur de 420 ppm (contre 277 μatm en 1750 ; Mauna Loa Observatory, <https://keelingcurve.ucsd.edu/>). L'océan absorbe de grandes quantités de CO₂ atmosphérique (environ 25% des émissions annuelles selon l'estimation de Friedlingstein et al. (2022)), participant ainsi à la régulation de sa concentration dans l'atmosphère. Ce processus l'affecte directement modifiant ainsi ses propriétés chimiques (Bopp et al., 2015). Parmi les propriétés chimiques modifiées par l'absorption de quantités toujours plus importantes de CO₂ atmosphérique, le pH est particulièrement étudié. Ainsi, de nombreuses études ont recensé une diminution de pH, plus ou moins prononcée selon l'océan considéré (Feely et al., 2009 ; Bates et al., 2012). Ce phénomène, plus connu sous le nom d'acidification des océans (AO), représente une menace pour les organismes marins, notamment pour les organismes calcifiants (ex : coccolithophoridés, ptéropodes), qui voient leur production diminuer. Un pH faible favorise la dissolution du carbonate de calcium car la disponibilité en minéraux diminue (Doney et al., 2009) et entrave la capacité de nombreux organismes marins à l'utiliser pour former des squelettes et des coquilles (Gattuso et al., 2015).

Les environnements côtiers contribuent à hauteur de 10% de l'absorption totale de CO₂ par l'océan (Thomas et al., 2004) et sont particulièrement affectés par le phénomène d'AO. Les études y recensent des diminutions de pH plus marquées et localisées (Kapsenberg et al., 2017). Cependant, il reste difficile d'y dégager des tendances claires compte-tenu de leur complexité et de leur forte variabilité, autant spatiale que temporelle (Carstensen et al., 2018). En effet, ces environnements subissent un stress important du fait de leur proximité avec le continent et des apports anthropiques qui peuvent en découler (nutriments, matière organique, aérosols ou produits chimiques). Ils sont également particulièrement actifs du point de vue hydrodynamique car souvent soumis à des forçages physiques marqués (courants induits par le vent, gradients de salinité et de température...).

1.2 Zone d'étude

En Méditerranée, l'acidification des eaux a été largement observée ces dernières années (Hassoun et al., 2022), par exemple, dans la baie de Villefranche, Kapsenberg et al. (2017) ont relevé une diminution du pH de l'ordre 0,0028 unité par an. Dans ce projet, nous nous intéressons à la baie de Marseille. Située dans la partie est du golfe du Lion, cet environnement est particulièrement complexe (Figure 1). En raison de sa proximité avec la ville de Marseille et d'autres zones urbanisées (étang de Berre, Fos-sur-Mer...), la baie de Marseille subit une forte pression anthropique qui se traduit notamment par des apports importants d'aérosols par le biais de l'atmosphère (pluies et vents), de nutriments et matière organique par le biais des fleuves et rivières environnantes (Rhône, rivières urbaines, déversoirs d'orage et émissaire de Cortiou par exemple ; Millet et al., 2018) et par de fortes valeurs de pCO₂ atmosphérique. De grandes quantités de nutriments et

d'eau douce peuvent également être apportées à la baie par le biais du Rhône, dont le delta est situé à 35 km à l'ouest de la baie. Ainsi, dans des conditions spécifiques de vents, le panache du Rhône peut être dévié et atteindre la baie (Figure 1, processus d'intrusion du Rhône) modifiant ainsi les propriétés biogéochimiques de la zone (Fraysse et al., 2014). En plus des phénomènes d'intrusion du Rhône, la baie peut être affectée par de forts épisodes de Mistral (Yohia, 2017), des phénomènes d'upwellings (Millot, 1990), des intrusions du courant Nord sur le plateau (Ross et al., 2016) ou encore la formation de structures tourbillonnaires (ex : Marseille *eddy*, Schaeffer et al., 2011) qui ont tendance à modifier la biogéochimie de la zone (Pinazo et al., 2022 ; Barré, 2023 ; Barré et al., 2023, Barré et al., 2024a) (Fig. 1).

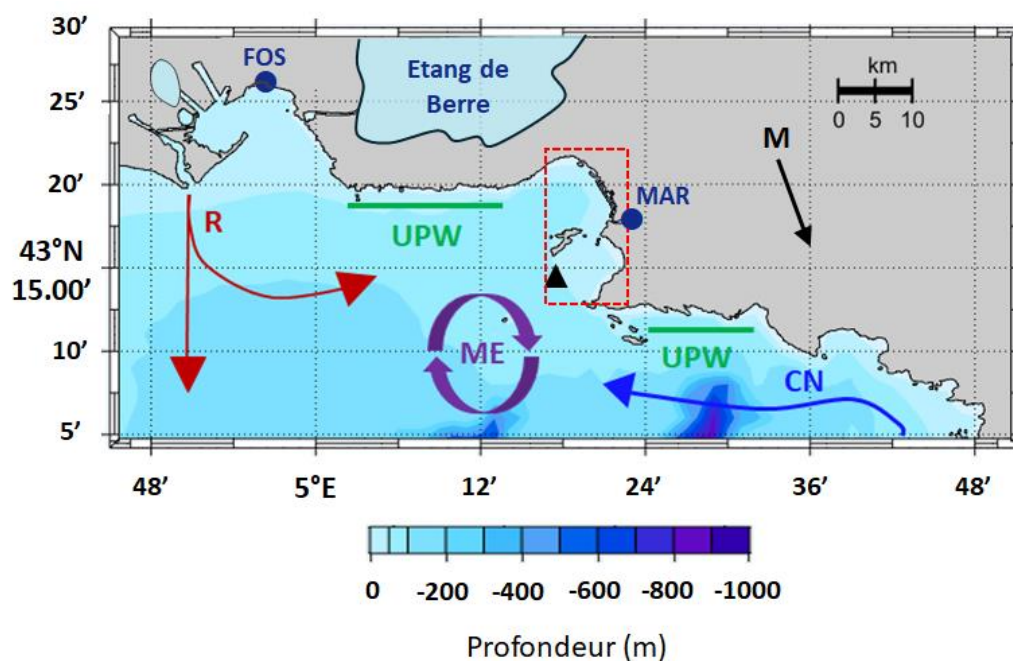


Figure 1 : Carte de la zone d'étude et schématisation des principaux processus hydrodynamiques l'impactant (R : Intrusion du panache du Rhône, UPW : upwellings, ME : Marseille eddy, CN : intrusion du courant Nord sur le plateau et M : Mistral). La baie de Marseille (au sens strict) est délimitée par les pointillés rouges et la station SOLEMIO, station de suivi considérée représentative de la baie, est indiquée par le triangle noir.

En tenant compte de la complexité de cette zone, le projet IAMM (évaluer l'impact de la métropole Aix-Marseille sur l'acidification de la baie de Marseille et les conséquences sur les microorganismes marins ; approche par modélisation) a pour objectif principal d'étudier l'évolution des propriétés de la baie de Marseille (i.e., température, salinité, concentration en nutriments, variable du système des carbonates...) au cours des 30 prochaines années (de 2021 à 2050). Pour ce faire, une approche par modélisation, idéale pour répondre à ce type de question, est privilégiée. Le modèle Eco3M-CarbOx 3D a été lancé sur la période 2021 – 2050 permettant ainsi d'obtenir les premières séries temporelles de ce type dans la zone. Dans ce résumé exécutif, nous nous concentrerons sur quatre propriétés : la température de surface, la $p\text{CO}_2$ marine, le pH et l'état de saturation du carbonate de calcium (Ω , Encadré 1) afin d'évaluer d'une part, (i) le réchauffement et l'acidification des eaux de la baie durant la période étudiée et d'autre part (ii) de comparer les taux obtenus à

la littérature disponible en Méditerranée. Ces quatre propriétés seront étudiées à la station SOLEMIO (Fig. 1), station représentative de la baie de Marseille. Les résultats obtenus pour les autres variables modélisées, et pour l'ensemble de la zone d'étude, sont disponibles dans le rapport de l'étude (Barré et al., 2024b).

Encadré 1 : L'état de saturation du carbonate de calcium (Ω)

Au même titre que le pH, l'état de saturation du carbonate de calcium (Ω) peut être utilisé afin de quantifier l'acidification du milieu marin. Ce paramètre est défini selon :

$$\Omega = \frac{[CO_3^{2-}]_{mes} \times [Ca^{2+}]_{mes}}{([CO_3^{2-}] \times [Ca^{2+}])_{sat}} \quad (E1)^{*1}$$

Ainsi, si Ω est supérieur à 1, le milieu est sursaturé, donc plus propice à la précipitation. Si Ω est inférieur à 1, le milieu est sous-saturé, la dissolution est privilégiée. Lorsque $\Omega = 1$, le milieu est à l'équilibre.

*1 : Ca^{2+} : ion calcium, CO_3^{2-} : ion carbonate

2 Approche par modélisation

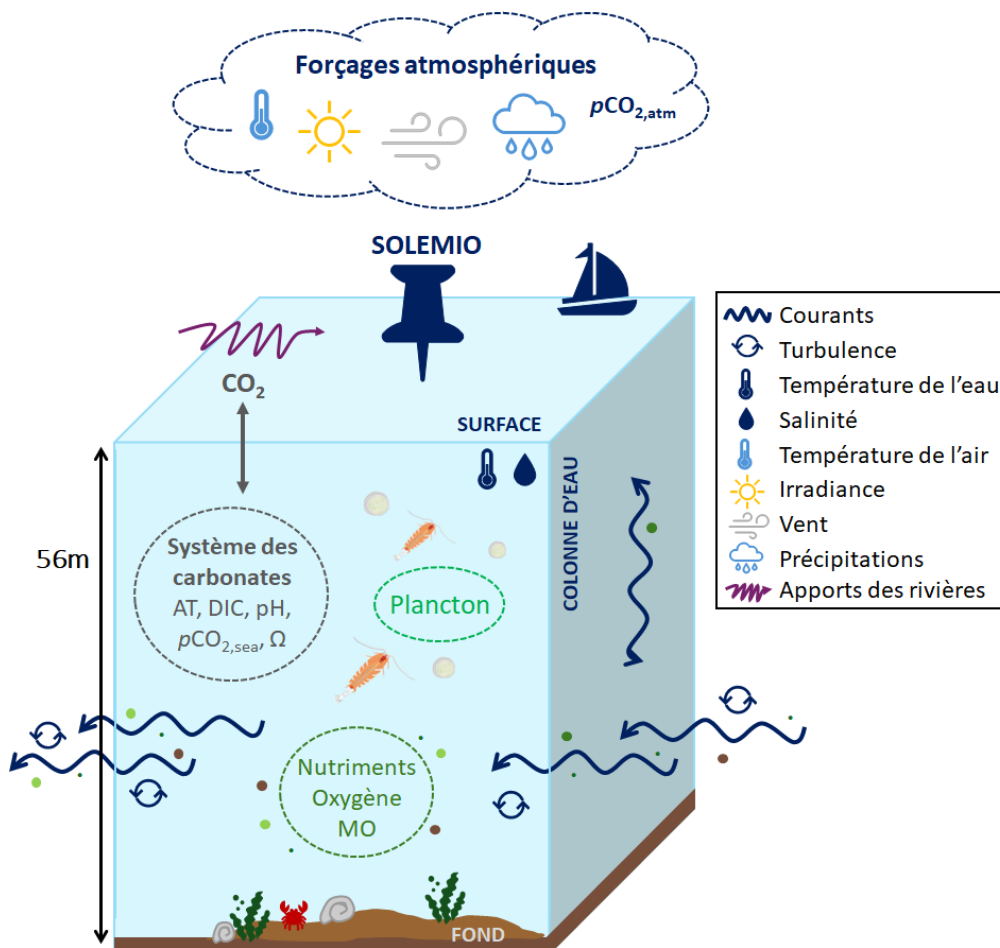


Figure 2 : Représentation simplifiée des processus et principales variables considérés (MO : matière organique, AT : alcalinité totale, DIC : carbone inorganique dissous, Ω : état de saturation du carbonate de calcium) par Eco3M-CarbOx 3D. A titre d'exemple, la coupe est effectuée à la station SOLEMIO (profondeur de 56 m), station de suivi considérée représentative de la baie de Marseille.

Dans cette étude, une approche par modélisation est utilisée. Cette approche est particulièrement adaptée aux environnements côtiers comme la baie de Marseille, où les forçages environnementaux et les processus hydrodynamiques sont nombreux et il s'agit pour le moment de l'unique méthode disponible lorsqu'il est question d'effectuer des projections selon des scénarios climatiques.

2.1 Le modèle Eco3M-CarbOx

Dans cette étude, le modèle biogéochimique Eco3M-CarbOx (Lajaunie-Salla et al., 2021) est couplé au modèle hydrodynamique à trois dimensions MARS3D-RHOMA (Lazure et Dumas, 2008). Il permet ainsi de représenter la dynamique des organismes planctoniques (phytoplancton, bactéries et de manière implicite zooplancton), des nutriments (nitrate, ammonium et phosphate), de l'oxygène, de la matière organique et des variables du système des carbonates (alcalinité totale : AT, carbone inorganique dissous : DIC, pH, $p\text{CO}_2$ marine et concentration en carbonate de calcium) tout en tenant compte des processus hydrodynamiques (courants horizontaux et verticaux, turbulence), des propriétés physiques caractérisant la colonne d'eau (température et salinité) et des forçages atmosphériques (température, irradiance, vent, précipitations et $p\text{CO}_2$ atmosphérique) (Fig. 2).

2.2 Scénarios de changement climatique

La mise en place de simulations pronostiques nécessite de nombreuses informations. Pour commencer, le choix d'un type de scénario de changement climatique est indispensable. Dans cette étude les scénarios RCP (*Representative Concentration Pathway*) 2.6 et 8.5 sont utilisés. Etablis par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), ils ont tous deux pour objectif de donner une estimation du climat futur en se basant sur la valeur d'augmentation du forçage radiatif à l'horizon 2100 comme première hypothèse. Le scénario RCP 2.6 est le plus optimiste, il considère une augmentation du forçage radiatif de 2.6 W.m^{-2} , associée à une augmentation de température de 2°C à la fin du siècle. Le scénario RCP 8.5 est le plus pessimiste, il considère une augmentation du forçage radiatif de 8.5 W.m^{-2} , associée à une augmentation de température supérieure à 4°C à l'horizon 2100. Il est important de noter qu'en 2023, l'augmentation du forçage radiatif a atteint la valeur de 2.79 W.m^{-2} , le scénario RCP 2.6 n'est donc plus vraiment d'actualité car déjà dépassé (Forster et al., 2024). A titre d'exemple, la figure 3 représente l'évolution de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique attendue pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5. Pour la période étudiée dans ce travail (2021 – 2050), une augmentation de $p\text{CO}_2$ atmosphérique de 60 μatm est attendue dans le cas du scénario RCP 2.6. Cette augmentation atteint 150 μatm dans le cas du scénario RCP 8.5.

Après avoir sélectionné le scénario de changement climatique à appliquer, les forçages sont paramétrés. Ainsi (i) les forçages atmosphériques : vitesse et direction du vent, irradiance, flux thermiques, précipitations, $p\text{CO}_2$ atmosphérique, et (ii) le forçage associé aux rivières : débits et concentrations du Rhône et des rivières urbaines, sont adaptés pour tenir compte du scénario sélectionné. Le détail des forçages utilisés est disponible dans le rapport de l'étude (Barré et al., 2024b).

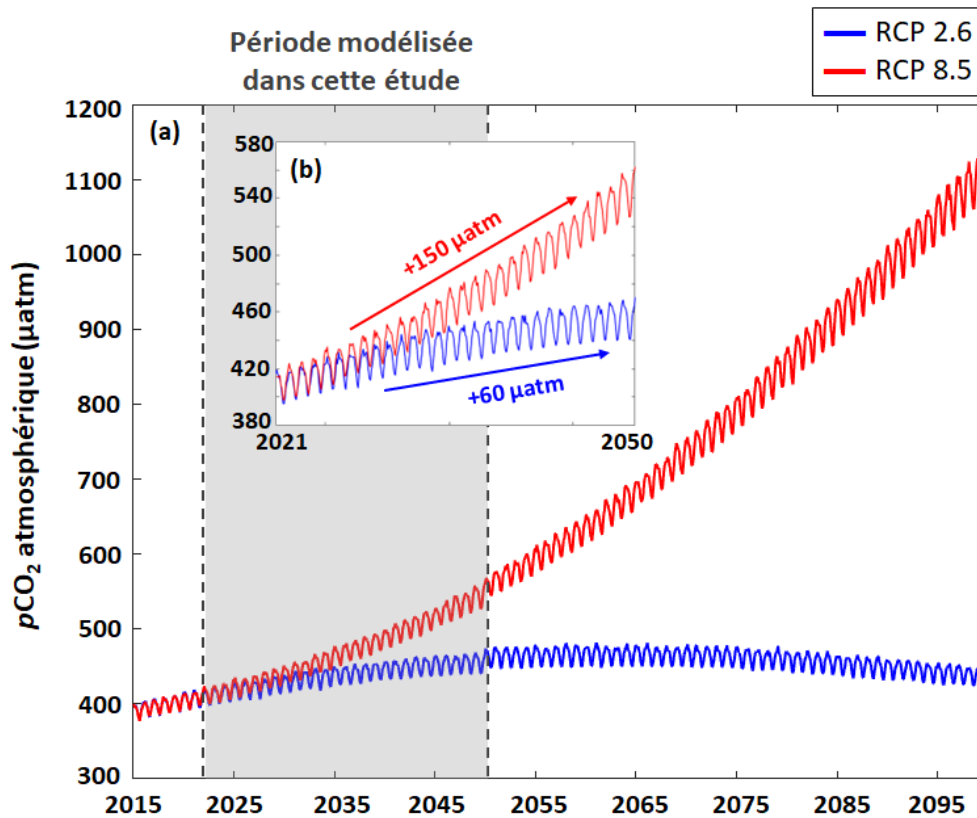


Figure 3 : Représentation de l'augmentation de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique attendue pour chaque scénario considéré (RCP 2.6, scénario le plus optimiste et RCP 8.5, scénario le plus pessimiste) (a) sur la période 2015 – 2100 et (b) sur la période étudiée 2021 – 2050.

3 Etude du réchauffement et de l'acidification des eaux de surface de la baie de Marseille

Dans cette section, les variables sont étudiées à la station SOLEMIO, station représentative de la baie de Marseille (Fig. 1), en surface (fine couche d'eau en contact avec l'atmosphère et profondeur à laquelle les études disponibles sont les plus nombreuses). Les résultats sont présentés sous la forme de diagramme *boxplot*¹. La médiane est représentée par la ligne rouge à l'intérieur des boîtes et les quartiles inférieur et supérieur correspondent au bas et sommet de la boîte respectivement. Les valeurs extrêmes sont représentées par des cercles.

¹ Le diagramme *boxplot* ou boîte à moustaches est une représentation graphique des données statistiques. Il permet de visualiser les principales caractéristiques d'une série statistique telles que la médiane ou les quartiles.

Tableau 1 : Moyenne et tendances sur la période étudiée au point SOLEMIO. TEND30 : tendance pour les 30 années (unité.30ans⁻¹), TEND : tendance pour une année (unité.an⁻¹). Les augmentations sont indiquées en rouges et les diminutions en bleu.

		Moyenne	TEND30	TEND
Température (°C)	RCP 2.6	15.4	+0.07	+0.002
	RCP 8.5	15.8	+0.25	+0.009
pCO _{2,sea} (µatm)	RCP 2.6	395	+21.4	+0.7
	RCP 8.5	406	+56.7	+1.9
pH	RCP 2.6	8.1	-0.02	-6.7×10⁻⁴
	RCP 8.5	8.08	-0.05	-0.002
Ω	RCP 2.6	1.6	-0.09	-0.003
	RCP 8.5	1.6	-0.12	-0.004

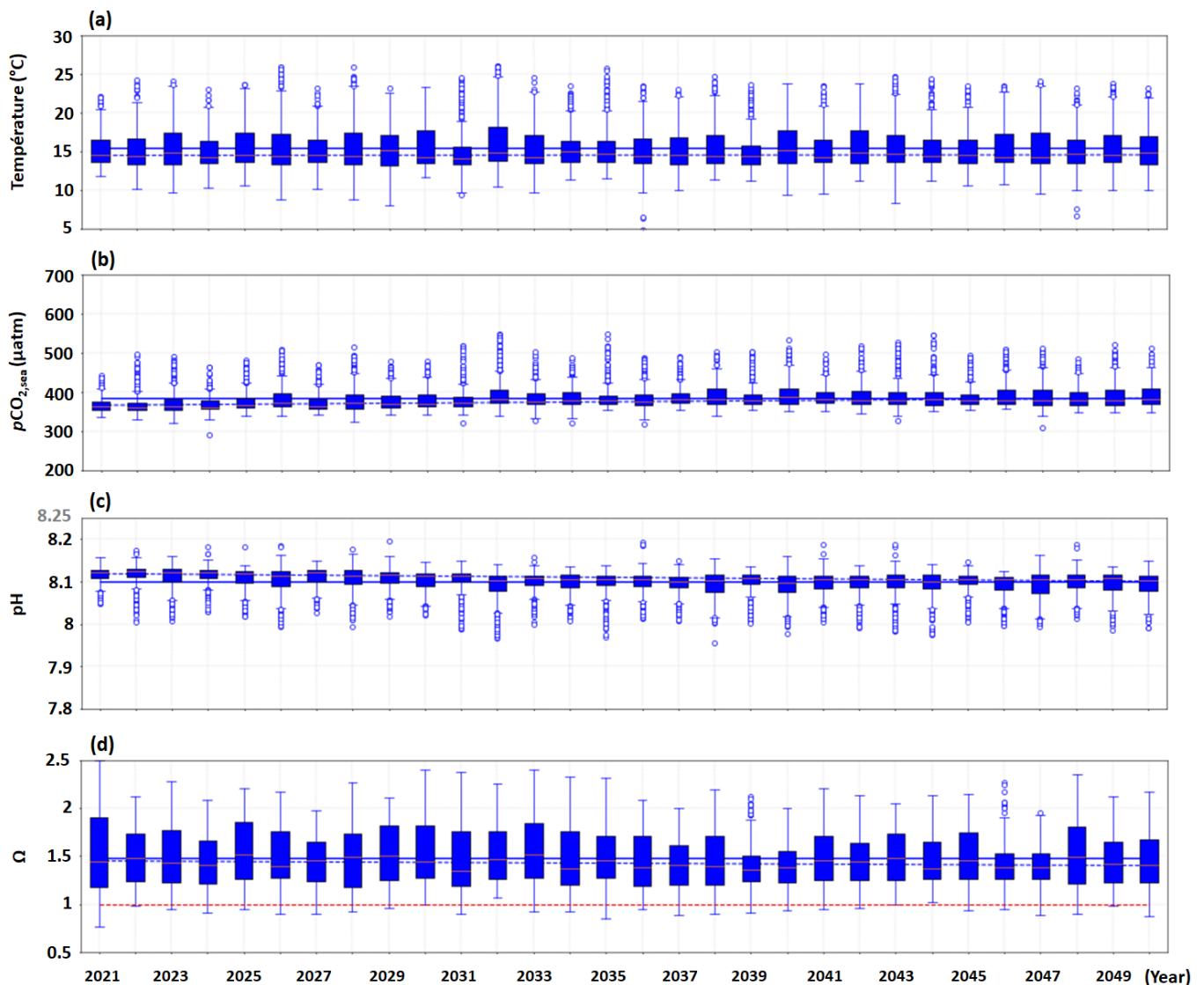


Figure 4 : Evolutions temporelles décennales (a) de la température de l'eau, (b) de la pCO₂ marine (pCO_{2,sea}), (c) du pH et (d) de l'état de saturation du CaCO₃ (Ω) au point SOLEMIO, en surface (fine couche d'eau en contact avec l'atmosphère) pour la période 2021 – 2050 pour le scénario RCP 2.6 (scénario le plus optimiste). La droite bleue en traits pleins représente la moyenne calculée sur la période,

la droite bleue en pointillées représente la tendance. Pour Ω , la droite rouge en pointillées représente l'équilibre ($\Omega = 1$).

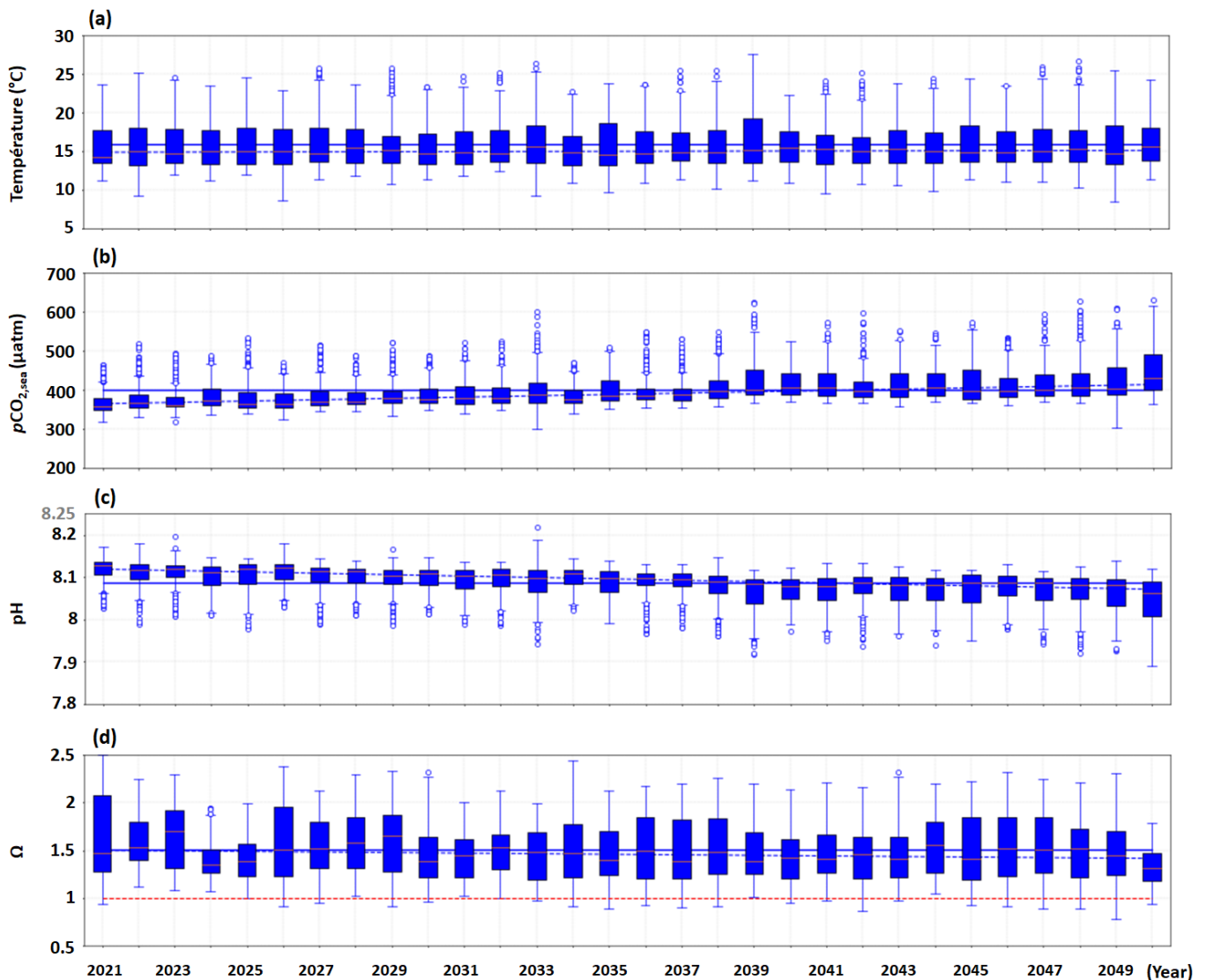


Figure 5 : Evolutions temporelles décennales (a) de la température de l'eau, (b) de la $p\text{CO}_2$ marine ($p\text{CO}_{2,\text{sea}}$), (c) du pH et (d) de l'état de saturation du CaCO_3 (Ω) au point SOLEMIO, en surface (fine couche d'eau en contact avec l'atmosphère) pour la période 2021 – 2050 pour le scénario RCP 8.5 (scénario le plus pessimiste). La droite bleue en traits pleins représente la moyenne calculée sur la période, la droite bleue en pointillées représente la tendance. Pour Ω , la droite rouge en pointillées représente l'équilibre ($\Omega = 1$).

Sur la période étudiée, nous pouvons faire les observations suivantes :

- Le scénario RCP 8.5 présente des valeurs de température et de $p\text{CO}_2$ (de pH et d' Ω) généralement plus fortes (plus faibles), dues aux forçages plus marqués appliqués dans ce scénario (Figs. 4, 5).
- L'étude étant effectuée en surface, les variables présentent généralement une forte variabilité sur toute la période d'étude quel que soit le scénario considéré. Même si elle se trouve plus à l'est, la station

SOLEMIO peut être affectée par les eaux du Rhône, qui ont des propriétés différentes (ex : température plus élevée, pH plus faible) (Figs. 4, 5).

- La baie de Marseille pourrait subir un réchauffement de ses eaux de surface compris entre 0.002 et 0.009°C.an⁻¹ sur la période 2021 – 2050 (Tableau 1), valeurs similaires à celle obtenue par le MedECC (2020a, b) (+ 0.009°C.an⁻¹) pour la Méditerranée occidentale.
- Une augmentation de la *p*CO₂ marine comprise entre 0.7 et 1.9 µatm.an⁻¹ pourrait être observée sur la période 2021 – 2050 (Tableau 1). Cette tendance est également observée par Reale et al. (2022) qui indiquent une tendance à l'augmentation de la *p*CO₂ marine soutenue en Méditerranée occidentale.
- Une acidification des eaux de surface de la baie, conséquence directe de l'augmentation de la concentration en CO₂ marine (augmentation de la *p*CO₂ marine) est également attendue à l'horizon 2050, elle pourrait se traduire par une diminution de pH et d'Ω comprise entre 6.7×10⁻⁴ et 0.002 unité pH.an⁻¹ et 0.003 et 0.004 .an⁻¹ respectivement (Tableau 1). Goyet et al. (2016) indiquent également une diminution du pH et d'Ω en Méditerranée occidentale, mais ces diminutions sont plus soutenues (comprises entre -0.002 et -0.004 unité pH.an⁻¹ et -0.01 et -0.03.an⁻¹ respectivement).

4 Récapitulatif des principaux résultats et conclusions

Les principaux résultats de cette étude sont résumés par la figure 6. La présente étude est la première à obtenir des taux de réchauffement et d'acidification pour les années à venir à l'échelle de la baie de Marseille. Ces résultats sont donc particulièrement intéressants car ils donnent une première idée de l'évolution de la température, de la *p*CO₂ marine, du pH et d'Ω dans la zone pour les années à venir, constituant ainsi un outil utile pour les acteurs régionaux en charge de la gestion de la baie de Marseille. Cependant, ils sont aussi à utiliser avec précaution et doivent être interprétés en tenant compte des limitations de l'approche utilisée (Encadré 2). Pour obtenir des tendances plus précises, la méthode utilisée pourrait être améliorée (utilisation d'un autre forçage atmosphérique qui propose des valeurs de température de l'air plus élevées par exemple) et plus de simulations pourraient être lancées (avec des modèles différents par exemple).

Encadré 2 : Des résultats à utiliser avec précaution

Pour utiliser au mieux les résultats de cette étude, il est important de prendre en compte les limitations du modèle utilisé.

⚠ Des biais de modèle identifiés : L'une des raisons pour laquelle Eco3M-CarbOx 3D a été utilisé dans cette étude est qu'il a pu être largement testé au préalable (Barré, 2020 ; Barré, 2023). Ces tests ont permis de mettre en évidence des biais qui peuvent influencer les résultats obtenus. C'est notamment le cas de la température de l'eau (sous-estimée en été) et de la *p*CO₂ marine (globalement sous-estimée).

⚠ Des résultats très dépendants des forçages choisis : Dans cette étude, le modèle de forçage atmosphérique choisi (modèle du CNRM) est connu pour être dans la fourchette basse des projections des écarts à la normale de température de l'atmosphère et de leur variabilité, lorsqu'il est comparé aux autres

modèles de projection climatique (Boucher et al., 2015). Ce choix peut affecter les résultats obtenus (par exemple en entraînant une sous-estimation de l'augmentation de la température modélisée sur les 30 ans).

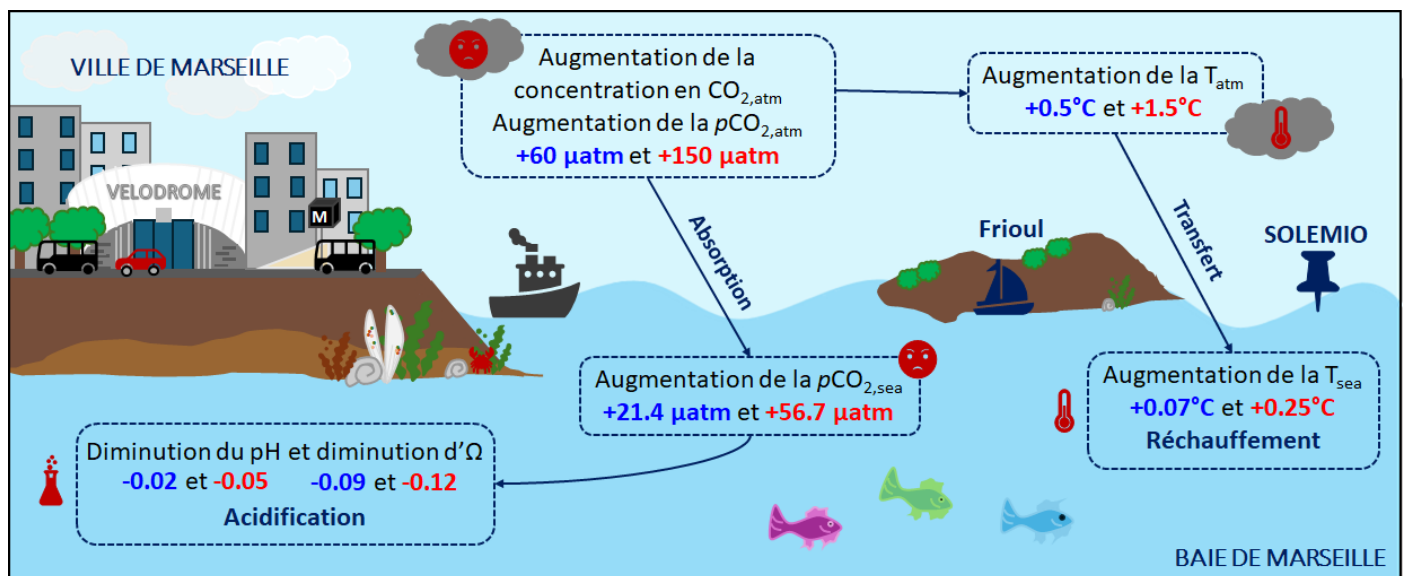


Figure 6 : Schéma récapitulatif des principaux résultats obtenus. Les tendances, notées en bleu pour le RCP 2.6 (scénario le plus optimiste) et en rouge pour le RCP 8.5 (scénario le plus pessimiste), sont données pour les 30 ans de simulation (période 2021 – 2050), en surface à la station SOLEMIO.

5 Bibliographie

Barré, L. (2020). Dynamique du système des carbonates et production communautaire nette en baie de Marseille. Approche par modélisation couplée 3D physique biogéochimie. Rapport de stage Master 2 Recherche d'Océanographie, Aix-Marseille Université, Marseille : 1-25.

Barré L. (2023). Impacts des variabilités environnementales sur la biodiversité fonctionnelle du plancton mixotrophe et le système des carbonates. Conséquences sur les flux de carbone en baie de Marseille : Approche par modélisation couplée physique-biogéochimie. Thèse de Doctorat d'Aix-Marseille Université, 1-254.

Barré, L., Diaz, F., Wagener, T., Van Wambeke, F., Mazoyer, C., Yohia, C., & Pinazo, C. (2023). Implementation and assessment of a model including mixotrophs and the carbonate cycle (Eco3M_MIX-CarbOx v1. 0) in a highly dynamic Mediterranean coastal environment (Bay of Marseille, France)–Part 1: Evolution of ecosystem composition under limited light and nutrient conditions. *Geoscientific Model Development*, 16(22), 6701-6739, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6701-2023>.

Barré, L., Diaz, F., Wagener, T., Mazoyer, C., Yohia, C., & Pinazo, C. (2024a). Implementation and assessment of a model including mixotrophs and the carbonate cycle (Eco3M_MIX-CarbOx v1. 0) in a highly dynamic Mediterranean coastal environment (Bay of Marseille, France)–Part 2: Towards a better representation of total

- alkalinity when modeling the carbonate system and air–sea CO₂ fluxes. *Geoscientific Model Development*, 17(15), 5851-5882, <https://doi.org/10.5194/gmd-17-5851-2024>.
- Barré, L., Diaz, F., Wagener, T., & Pinazo, C. (2024b). Évaluer l'Impact de la métropole Aix-Marseille sur l'Acidification de la baie de Marseille et les conséquences sur les microorganismes marins, approche par Modélisation (IAMM) – Rapport, 1-80.
- Bates, N. R., Best, M. H. P., Neely, K., Garley, R., Dickson, A. G., & Johnson, R. J. (2012). Detecting anthropogenic carbon dioxide uptake and ocean acidification in the North Atlantic Ocean. *Biogeosciences*, 9(7), 2509-2522, <https://doi.org/10.5194/bg-9-2509-2012>.
- Bopp, L., Bauler, C., Guidi, L., Karsenti, E., & De Vergas, C. (2015). L'océan, pompe à carbone. In OCÉAN ET CLIMAT, 2015 – Fiches scientifiques océan-climat, 128 pp. <https://ocean-climate.org/presentation-des-fiches-scientifiques-ocean-et-climat/>, 14-19.
- Boucher, O., Dufresne, J. L., Vial, J., Brun, É., Cattiaux, J., Chauvin, F., Salas Mélia, D., Voldoire, A., Bopp, L., Braconnot, P., Ciais, P., Yiou, P., Guilyardi, E., Mignot, J., & Guivarch, C. (2015). Projection des changements climatiques futurs. *La Météorologie*, 88, 56-67, [10.4267/2042/56362](https://doi.org/10.4267/2042/56362), [halshs-01124443](https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01124443).
- Carstensen, J., Chierici, M., Gustafsson, B. G., & Gustafsson, E. (2018). Long-term and seasonal trends in estuarine and coastal carbonate systems. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(3), 497-513, <https://doi.org/10.1002/2017GB005781>.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual review of marine science*, 1(1), 169-192, <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>.
- Feely, R. A., Doney, S. C., & Cooley, S. R. (2009). Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high-CO₂ world. *Oceanography*, 22(4), 36-47.
- Forster P.M., Smith, C., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Hall, B., Hauser, M., Ribes, A., Rosen, D., Gillett, N. P., Palmer, M. D., Rogelj, J., von Schuckmann, K., Trewin, B., Allen, M., Andrew, R., Betts, R. A., Borger, A., Boyer, T., Broersma, J. A., Buontempo, C., Burgess, S., Cagnazzo, C., Cheng, L., Friedlingstein, P., Gettelman, A., Gütschow, J., Ishii, M., Jenkins, S., Lan, X., Morice, C., Mühle, J., Kadow, C., Kennedy, J., Killick, R. E., Krummel, P. B., Minx, J. C., Myhre, G., Naik, V., Peters, G. P., Pirani, A., Pongratz, J., Schleussner, C. F., Seneviratne, S. I., Szopa, S., Thorne, P., Kovilakam, M. V. M., Majamäki, E., Jalkanen, J.-P., van Marle, M., Hoesly, R. M., Rohde, R., Schumacher, D., van der Werf, G., Vose, K., Zickfeld, R., Zhang, X., Masson-Delmotte, V., & Zhai, P. (2024). Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 16, 2625–2658. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2625-2024>.

- Frayse, M., Pairaud, I., Ross, O. N., Faure, V. M., & Pinazo, C. (2014). Intrusion of Rhone River diluted water into the Bay of Marseille: Generation processes and impacts on ecosystem functioning. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *119*(10), 6535-6556, <https://doi.org/10.1002/2014JC010022>.
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bopp, L., Chau, T. T. T., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Currie, K. I., Decharme, B., Djeutchouang, L. M., Dou, X., Evans, W., Feely, R. A., Feng, L., Gasser, T., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gurses, O., Harris, I., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Lujikx, I. T., Jain, A., Jones, S. D., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, J., Marland, G., McGuire, P. C., Melton, J. R., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Schwingshackl, C., Séférian, R., Sutton, A. J., Sweeney, C., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Vuichard, N., Wada, C., Wanninkhof, R., Watson, A. J., Willis, D., Wiltshire, A. J., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S. and Zeng, J. (2022). Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data*, *14*, 1917-2005, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.
- Gattuso, J. P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W. W., Howes, E. L., Joos, F., Allemand, D., Bopp, L., Cooley, S. R., Eakin, C. M., Hoegh-Guldberg, O., Kelly, R. P., Portner, H. -O., Rogers, A. D., Baxter, J. M., Laffoley, D., Osborn, D., Rankovic, A., Rochette, J., Sumaila, U. R., Treyer, S., & Turley, C. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, *349*(6243), aac4722, DOI: [10.1126/science.aac4722](https://doi.org/10.1126/science.aac4722).
- Goyet, C., Hassoun, A. E. R. R., Gemayel, E., Touratier, F., Abboud-Abi Saab, M., & Guglielmi, V. (2016). Thermodynamic forecasts of the Mediterranean Sea acidification. *Mediterranean Marine Science*, *17*(2), 508-518, <https://doi.org/10.12681/mms.1487>.
- Kapsenberg, L., Alliouane, S., Gazeau, F., Mousseau, L., & Gattuso, J. P. (2017). Coastal ocean acidification and increasing total alkalinity in the northwestern Mediterranean Sea. *Ocean Science*, *13*(3), 411-426, <https://doi.org/10.5194/os-13-411-2017>.
- Lajaunie-Salla, K., Diaz, F., Wimart-Rousseau, C., Wagener, T., Lefèvre, D., Yohia, C., Xueref-Remy, I., Nathan, B., Armengaud, A., & Pinazo, C. (2021). Implementation and assessment of a carbonate system model (Eco3M-CarbOx v1. 1) in a highly dynamic Mediterranean coastal site (Bay of Marseille, France). *Geoscientific Model Development*, *14*(1), 295-321, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-295-2021>.
- Lazure, P., & Dumas, F. (2008). An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in water resources*, *31*(2), 233-250, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.010>.

MedECC. (2020a). Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report [Cramer, W., Guiot, J., Marini, K. (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, 632pp. DOI: 10.5281/zenodo.7224821.

MedECC. (2020b). Résumé à l'intention des décideurs. Dans : Changement climatique et environnemental dans le bassin méditerranéen – Situation actuelle et risques pour le futur. Premier rapport d'évaluation sur la Méditerranée [Cramer W, Guiot J, Marini K (eds.)] Union pour la Méditerranée, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, 35pp.

Millet, B., Pinazo, C., Banaru, D., Pagès, R., Guiart, P., & Pairaud, I. (2018). Unexpected spatial impact of treatment plant discharges induced by episodic hydrodynamic events: Modelling Lagrangian transport of fine particles by Northern Current intrusions in the bays of Marseille (France). *PLoS One*, 13(4), e0195257, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195257>.

Millot, C. (1990). The gulf of Lions' hydrodynamics. *Continental shelf research*, 10(9-11), 885-894.

Pinazo, C., Barré, L., Diaz, F., Doglioli, A., Faure, V., Fraysse, M., Lajaunie-Salla, K., Mazoyer, C., Pairaud, I., Ross, O., Thouvenin, B., Verney, R., Wagener, T., & Yohia, C. (2022). Modélisation 3D des interactions atmosphère-océan-biogéochimie marine en zone côtière (application à la baie de Marseille): Influence des apports anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin. Cours de Master, 154 pp. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03722215>.

Reale, M., Cossarini, G., Lazzari, P., Lovato, T., Bolzon, G., Masina, S., Solidoro, C., & Salon, S. (2022). Acidification, deoxygenation, and nutrient and biomass declines in a warming Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 19(17), 4035-4065, <https://doi.org/10.5194/bg-19-4035-2022>.

Ross, O. N., Fraysse, M., Pinazo, C., & Pairaud, I. (2016). Impact of an intrusion by the Northern Current on the biogeochemistry in the eastern Gulf of Lion, NW Mediterranean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 170, 1-9, , <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.022>.

Schaeffer, A., Garreau, P., Molcard, A., Fraunié, P., & Seity, Y. (2011). Influence of high resolution wind forcing on hydrodynamic modeling of the Gulf of Lions. *Ocean Dynamics*, 61, 1823-1844. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176.1>

Thomas, H., Bozec, Y., Elkalay, K., & De Baar, H. J. (2004). Enhanced open ocean storage of CO₂ from shelf sea pumping. *Science*, 304(5673), 1005-1008.

Yohia, C. (2017). Genèse du Mistral par interaction barocline et advection du tourbillon potentiel. *Climatologie*, 13, 24-37, <https://doi.org/10.4267/climatologie.1182>.