



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)

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). Institut Méditerranéen d'Océanologie (M.I.O). 2024. hal-04707322

HAL Id: hal-04707322

<https://hal.science/hal-04707322v1>

Submitted on 24 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)

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, impactée par la métropole urbanisée et industrialisée d'Aix-Marseille, reçoit de grandes quantités de matières organiques et inorganiques provenant des effluents urbains et est soumise à de fortes émissions anthropiques de dioxyde de carbone (CO₂). Le CO₂ est considéré comme le principal gaz à effet de serre et est responsable de l'acidification des océans. Compte tenu des scénarios futurs d'augmentation des émissions de CO₂ et d'apports des effluents urbains, il est urgent d'évaluer l'impact de cette augmentation d'apports de carbone sur l'écosystème marin de la baie de Marseille. L'objectif de ce projet est d'améliorer, par une approche de modélisation, la connaissance de l'impact de l'acidification sur les changements de structure des communautés planctoniques marines de la baie de Marseille, afin d'émettre des recommandations en matière de surveillance des espèces concernées.

Pour ce faire, un modèle d'écosystème planctonique (Eco3M-CarbOx) contenant une représentation des variables du système des carbonates (alcalinité totale : AT, carbone inorganique dissous : DIC, pH et pression partielle de CO₂ : $p\text{CO}_2$) a d'abord été implémenté et utilisé en version adimensionnelle (en un point de la baie de Marseille, en surface). Après évaluation, Eco3M-CarbOx a permis d'obtenir une première représentation des variables du système des carbonates à la station SOLEMIO, station représentative de la baie de Marseille (Lajaunie-Salla et al., 2021). Afin d'accroître la biodiversité fonctionnelle au sein de la communauté modélisée de plancton marin, le modèle Eco3M-CarbOx a servi de base à l'implémentation du modèle Eco3M_MIX-CarbOx qui contient en plus, un compartiment mixotrophe permettant ainsi d'étudier pour la première fois ce type d'organisme en baie de Marseille (Barré et al., 2023 ; 2024a).

Par la suite le modèle Eco3M-CarbOx, présentant un temps de calcul plus court que le modèle Eco3M_MIX-CarbOx, a été couplé au modèle hydrodynamique à trois dimensions MARS3D-RHOMA afin de réaliser d'une part des simulations « historiques » (période 2017 - 2021) et d'autre part des prévisions décennales sur 30 ans (2021-2050) basées sur les scénarios de changement climatique optimiste (RCP 2.6) et pessimiste (RCP 8.5) :

- Les simulations historiques avaient notamment pour objectifs : (i) de choisir la paramétrisations des forçages la plus réaliste, (ii) d'évaluer le modèle en comparant les résultats obtenus aux mesures disponibles dans la zone, et (iii) de mettre en évidence le statut de la baie vis-à-vis de la concentration en CO₂ (source ou puits de CO₂) et du point de vue trophique (NCP). Ces simulations ont ainsi permis de démontrer que la baie se comportait globalement comme un puits de CO₂ sur la période étudiée et que les processus hétérotrophes y étaient dominants.
- Les prévisions décennales ont été réalisées afin d'estimer l'état futur du système des carbonates et des microorganismes marins. Les simulations effectuées ont ainsi permis d'étudier l'évolution des propriétés de la baie pendant les 30 prochaines années, mettant en évidence, entre autres, une augmentation de la température et une diminution du pH dans les eaux de surface de la baie. Ces derniers résultats restent cependant à être utilisés avec précaution et doivent être interprétés en tenant compte des limitations de l'approche utilisée.

Les résultats des modèles disponibles à la fin du projet, constituent un outil utile pour les acteurs régionaux en charge de la gestion de la baie de Marseille afin d'évaluer l'efficacité de leurs actions présentes, d'affiner la connaissance d'évolutions décennales spécifiques à la région côtière Marseillaise, et d'appréhender la mise en place de nouvelles actions en matière de protection de l'écosystème marin. Un résumé exécutif, rassemblant l'essentiel des résultats et analyses a également été rédigé à l'attention des gestionnaires (Barré et al., 2024c).

Table des matières

1	Introduction.....	5
1.1	État de l’art / Contexte de recherche.....	5
1.2	Objectifs du projet.....	8
2	Matériel & Méthodes	10
2.1	Les modèles numériques.....	10
2.1.1	Le modèle hydrodynamique MARS3D-RHOMA.....	10
2.1.2	Le modèle Eco3M-CarbOx.....	12
2.1.3	Le modèle Eco3M_MIX-CarbOx.....	13
2.2	Les données in situ.....	13
2.2.1	Evaluation du modèle biogéochimique avec carbonates Eco3M-CarbOx	13
2.2.2	Impact de la métropole Aix-Marseille	14
2.3	Réalisation des simulations historiques d’évaluation 2017-2021 (Barré, 2023)	14
2.4	Réalisation des prévisions décennales des scénarios de changement climatique	15
2.4.1	Forçages atmosphériques	16
2.4.2	Forçages des fleuves et des rivières	25
3	Résultats.....	31
3.1	Reproduction des processus connus dans la baie de Marseille.....	31
3.1.1	Upwelling.....	31
3.1.2	Intrusion des eaux diluées du Rhône	31
3.1.3	Marseille Eddy.....	31
3.2	Prévisions décennales de 2021 à 2050.....	33
3.2.1	Variables hydrodynamiques	34
3.2.2	Variables biogéochimiques	39
3.2.3	Variables planctoniques	43
3.2.4	Variables du système des carbonates	49
3.2.5	Flux de CO ₂ à l’interface air-mer.....	54
3.3	Variation relative des variables de 2021 à 2050.....	57
4	Synthèse et Perspectives	63

4.1	Synthèse des principaux résultats	63
4.2	Comparaison des résultats obtenus sur la baie de Marseille avec la littérature	64
4.2.1	Variables hydrodynamiques	64
4.2.2	Variables biogéochimiques	65
4.2.3	Chlorophylle	66
4.2.4	Variables du système des carbonates	66
4.2.5	Flux/puits de CO ₂	67
4.3	Limitations de ce travail de modélisation	67
4.4	Conclusions et perspectives d'amélioration.....	69
5	Remerciements.....	72
6	Références bibliographiques	74

1 Introduction

1.1 État de l'art / Contexte de recherche

Le changement climatique actuel provient principalement du fait que, depuis l'ère préindustrielle, la concentration moyenne de CO₂ dans l'atmosphère est passée d'environ 280 ppm¹ en 1750 à environ 400 ppm en 2015, due aux activités humaines, entraînant une augmentation de 0,6 °C de la température moyenne de la Terre au cours du siècle dernier, et de profondes modifications du climat régional (IPPC, 2013). Le Quéré et al. (2018) confirmé ensuite par Friedlingstein et al. (2022), ont estimé que les océans représentent un puits de plus de 25% (2.8 GtC.an⁻¹) des émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère (Figure 1). L'augmentation de la stratification liée au réchauffement de surface contrebalancée par des coups de vents plus intenses mais moins fréquents, joueraient sur les remontées d'eau riche en nutriments à la surface, l'oxygénation de l'eau et le puits de carbone océanique.

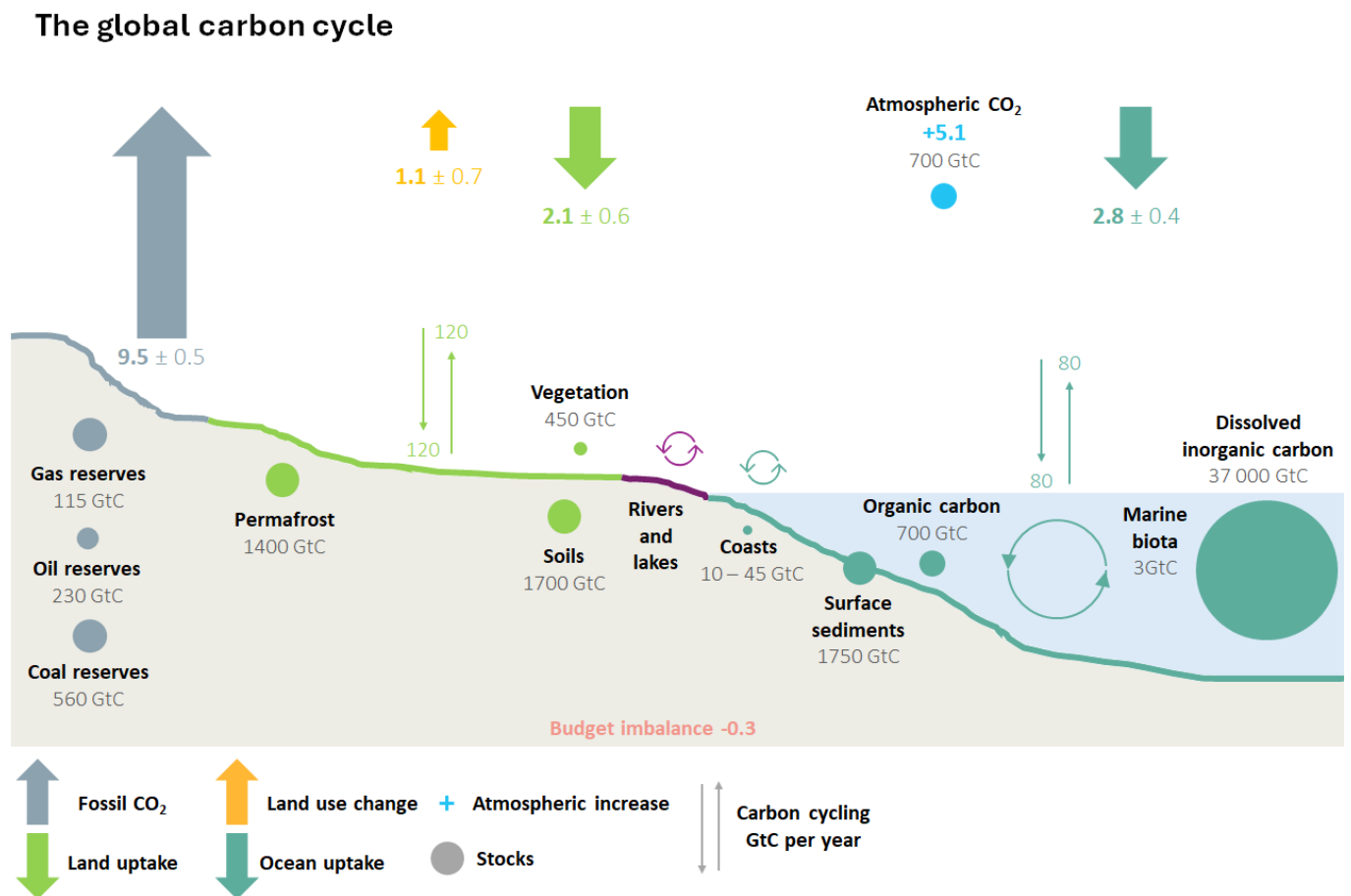


Figure 1 : Représentation schématique de la perturbation du cycle global du carbone causée par les activités anthropiques, moyennée dans le monde pour la décennie 2011-2020. Sources (flèches vers le haut) et puits (flèches vers le bas) voir les légendes et les unités correspondantes (figure reproduite de Friedlingstein et al., 2022).

¹ Les concentrations des espèces en phase gazeuse sont mesurées en ppmv (*parts per million volume*). Pour plus de simplicité, elles sont ici exprimées en ppm (*parts per million*).

Le dioxyde de carbone et l'oxygène sont fondamentaux pour les organismes vivants. Les organismes autotrophes fixent du CO₂ via la photosynthèse pour produire leur biomasse carbonée et de l'oxygène. Tandis que les organismes hétérotrophes produisent du CO₂ et consomment de l'oxygène par le processus de respiration aérobie.

Dans l'océan global, les principaux processus régulant les échanges de CO₂ sont la pompe biologique (de biomasse et carbonatée) et la pompe physique de solubilité. La pompe biologique est alimentée par des processus métaboliques de photosynthèse et de respiration, ainsi que des processus de précipitation de carbonate de calcium (CaCO₃) pour former les structures des organismes calcifiants (Bopp et al., 2015). La pompe physique de solubilité est principalement entraînée par la circulation thermohaline dans les océans : aux pôles, l'eau froide dense saturée en CO₂ atmosphérique plonge en profondeur, puis après environ un millier d'années, remonte à la surface près de l'équateur où elle dégaze (Speich, et al. 2015).

Dans un contexte d'augmentation constante de la concentration en CO₂ atmosphérique, l'océan absorbe des quantités de CO₂ croissantes qui perturbent le système des carbonates marin (Raven et al., 2005). Le CO₂ atmosphérique absorbé par l'océan réagit avec l'eau et se dissocie en ion hydronium (H⁺) et bicarbonate (HCO₃⁻). Une grande partie des ions H⁺ résultant de cette réaction réagira avec les ions carbonates (CO₃²⁻) présents en solution pour former des ions HCO₃⁻ supplémentaires. De cette manière, la quantité des espèces du système des carbonates marin est modifiée. Les concentrations en HCO₃⁻, CO₂^{*} (somme du CO_{2, aq} et de l'acide carbonique, H₂CO₃) et H⁺ augmentent et une diminution du pH océanique est observée. Ce phénomène, appelé acidification des océans (AO), est observé dans tous les océans de manière plus ou moins prononcée (Olafsson et al., 2009 ; Dore et al., 2009 ; Bates et al., 2012). L'AO est particulièrement étudiée car elle représente une menace pour les organismes marins, notamment pour les organismes calcifiants. En induisant une diminution de la concentration en CO₃²⁻ et de l'état de saturation du CaCO₃ (Ω , Encadré 1), l'AO entrave la capacité des organismes à former des squelettes ou coquilles en CaCO₃ (Doney et al., 2009 ; Gattuso et al., 2015). Les organismes calcifiants peuvent ainsi voir leur coût énergétique augmenter pour les produire, ou bien produire des squelettes ou coquilles incomplets. La plupart des études concerne les effets de l'acidification des eaux marines sur des organismes isolés (Hassoun et al., 2022) ; on en sait beaucoup moins sur les effets au niveau des communautés et écosystèmes. Peu d'études mesurent les effets de l'acidification actuelle dans des environnements naturels. Cependant, des observations récentes de terrain montrent une diminution de l'épaisseur des coccolites au cours des 12 dernières années en Méditerranée (Meier et al., 2014) et la dissolution de coquilles de ptéropodes vivants dans l'upwelling de Californie et l'océan Austral, régions qui subissent une acidification anthropique importante (Bednarsek et al., 2014).

L'océan côtier agit comme un puits de CO₂ important où les flux de CO₂ air-mer estimés convergent à plus de 20% du puits océanique total (Laruelle et al., 2010 ; Borges et al., 2011). Les zones côtières subissent un stress important dû aux activités humaines nombreuses et soutenues. D'une part, la matière organique et les nutriments provenant de l'agriculture, des industries, des effluents urbains et des rivières qui se déversent

dans la mer conduit à l'acidification de l'écosystème par la production de CO_2 via la respiration de l'excès de matière organique (Borges et Gypens, 2010). D'autre part, l'urbanisation accentue les émissions anthropiques de dioxyde de carbone qui perturbent également la dynamique de la chimie du carbone dans la colonne d'eau.

En Méditerranée, l'acidification des eaux a été observée, notamment à la station de Villefranche-sur-Mer par les données *in situ* obtenues depuis 2007, qui indiquent une accélération de la diminution du pH et d' Ω , soit 0.0028 et 0.0064 unité par an respectivement (Figure 2). Dans ce projet, nous nous intéressons à la baie de Marseille, localisée à l'est du golfe du Lion, au nord-ouest de la Méditerranée et qui est fortement impactée par la métropole Aix-Marseille qui s'est développée rapidement ces dernières décennies. Cette forte urbanisation conduit à l'apport supplémentaire de matière anthropique qui se déverse dans la baie, ainsi qu'à l'augmentation d'émission de CO_2 anthropique dans l'atmosphère. De plus, les apports de nutriments lors des intrusions d'eau dessalée provenant du Rhône dans la baie de Marseille favorisent la productivité biologique (Frayse et al., 2014).

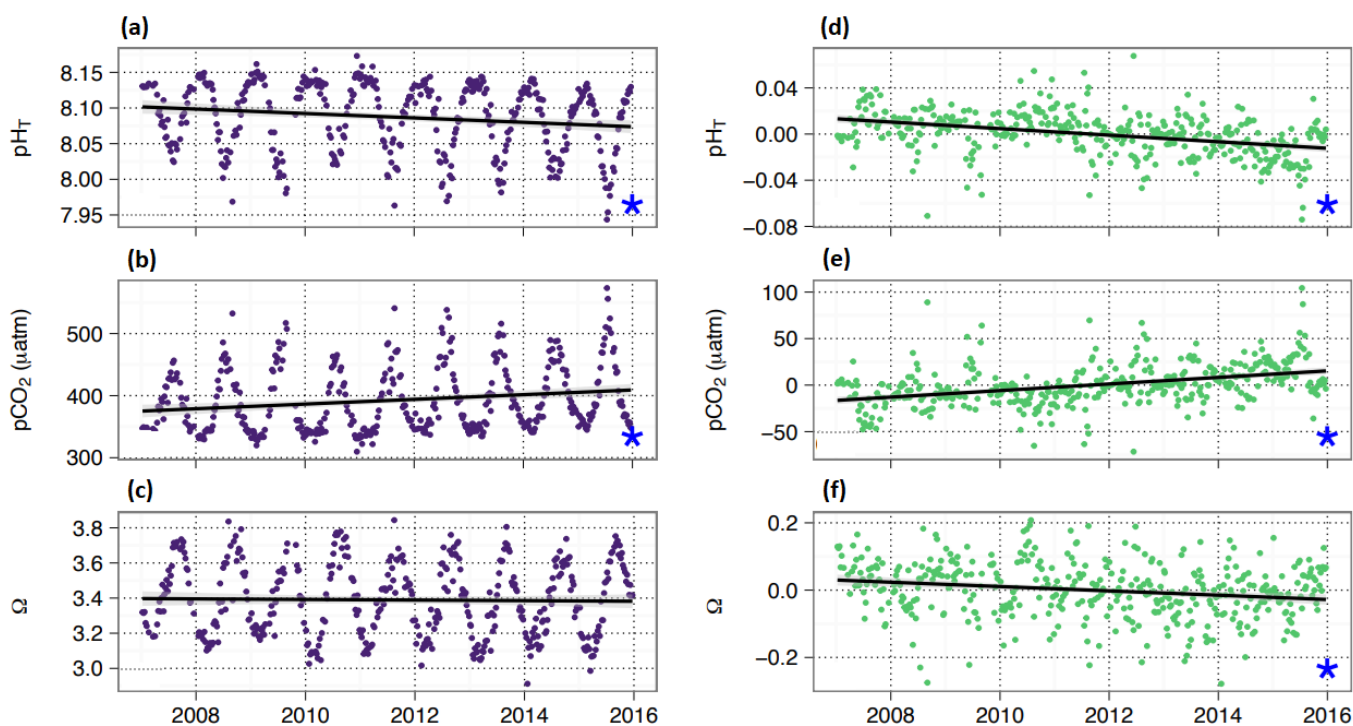


Figure 2 : Série temporelle *in situ* (a-c) et anomalie (d-f) de pH, $p\text{CO}_2$ et Ω au large de Villefranche-sur-Mer avec les droites de régression (significatives à $\alpha = 0.05$ pour les étoiles bleues) (source : Kapsenberg et al., 2017).

Encadré 1 : Définition de 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 :

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

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.

Dans l'océan, deux formes de carbonate de calcium peuvent être observées : la calcite et l'aragonite. Ces deux polymorphes du carbonate de calcium se différencient par leur structure cristalline et leurs propriétés minéralogiques qui leur confèrent des solubilités différentes. Il est important de noter que dans la présente étude, l'état de saturation du carbonate de calcium est défini par rapport à l'aragonite.

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

1.2 Objectifs du projet

Compte tenu des prévisions de concentration de CO_2 dans l'atmosphère, il est urgent d'évaluer son impact sur l'écosystème marin planctonique de la baie de Marseille. L'objectif de ce projet est de répondre à la question suivante :

Quel est l'impact de la métropole Aix-Marseille sur l'acidification de la baie de Marseille et ses conséquences sur la structure des communautés planctoniques ?

Afin de répondre à cette question, un modèle régional dit de « système terre » comprenant une représentation numérique des dynamiques atmosphérique, océanique, de l'écosystème planctonique et de la chimie marine a été mis en œuvre et exploité. Les modèles numériques sont des outils utiles pour évaluer la sensibilité des écosystèmes au forçage externe et pour évaluer les changements climatiques (en déconvoluant les différents impacts).

Les objectifs spécifiques suivants sont proposés :

1- Évaluer l'impact des émissions anthropiques de CO_2 (d'origines urbaine, portuaire...) et des effluents urbains sur la variabilité des flux de CO_2 air-mer et du taux d'acidification de la baie de Marseille.

2- Développer la biodiversité fonctionnelle au sein de la communauté modélisée de plancton marin en ajoutant les traits fonctionnels de la mixotrophie au modèle biogéochimique.

3- Évaluer l'impact de l'acidification sur les changements de structure des communautés planctoniques marines de la baie de Marseille afin d'émettre des recommandations en matière de surveillance et de la mise en place d'échantillonnage.

4- Réaliser des scénarios de dérèglement climatique sur 30 ans, afin d'estimer l'état futur du système des carbonates et des microorganismes marins à l'échelle de la baie de Marseille, dans le but d'aider les décideurs à maintenir une bonne qualité de l'eau dans cet environnement côtier particulier.

Les trois premiers objectifs de ce projet ont été traités dans le travail de Doctorat de Lucille Barré (Barré, 2023). Elle a tout d'abord amélioré, par une approche de modélisation 0D, la structure du modèle biogéochimique afin d'y inclure les organismes mixotrophes (modèle Eco3M_MIX-CarbOx) et d'étudier les changements de structure des communautés planctoniques marines de la baie de Marseille lorsque l'on considère ces organismes. Ce travail a permis la compréhension des conditions d'émergence du plancton mixotrophe dont la dynamique est principalement affectée par la modification des concentrations en nutriments dans leur environnement. La mixotrophie permet aux organismes en étant capables, d'être plus compétitifs que les organismes à régime trophique strict lorsque la ressource devient limitante. La considération des mixotrophes dans le modèle est également associée à une modification des flux de carbone. Notamment, les mixotrophes permettent d'augmenter le transfert de carbone vers les plus hauts niveaux trophiques de 9 % et de doubler la production communautaire nette (NCP= production primaire brute (GPP : Gross Primary Production) - respiration (R = somme des termes de respiration autotrophe (RA) et hétérotrophe (RH)) du milieu) (Barré et al., 2023 ; Barré, 2023).

La connaissance de l'impact actuel de l'acidification de la baie de Marseille à travers la dynamique des variables du système des carbonates, des flux air-mer de CO₂ et de la décomposition de la pCO₂ marine a été étudiée en 0D avec Eco3M_MIX-CarbOx (Barré et al., 2024a) et avec Eco3M-CarbOx en 3D, sur une période actuelle de cinq ans (début 2017 à fin 2021) (Barré, 2023). L'étude a permis de montrer que la baie de Marseille se comportait globalement comme un puits de CO₂ sur la période considérée avec une forte variabilité saisonnière : puits en période hivernale et source en période estivale, tendances qui peuvent être modulées par des événements à plus haute fréquence que la saison. Par exemple, lors d'une intrusion d'eau diluée provenant du Rhône, les apports d'AT, DIC et nutriments dans la baie, en période hivernale, entraînent une diminution du puits de CO₂ et une forte dominance des processus hétérotrophes. Au contraire, les épisodes d'upwelling estivaux entraînent une inversion du flux de CO₂ (de source à puits) principalement sous l'effet de la diminution de température qui accompagne ces événements, mais également à l'effet du vent. Le statut trophique de la baie est également modifié avec une augmentation des processus autotrophes (Barré et al., 2024a).

Le présent rapport présente en détail la partie concernant les prévisions décennales sur 30 ans (2021-2050) basées sur les scénarios de changement climatique optimiste (RCP 2.6) et pessimiste (RCP 8.5) qui ont été réalisées afin d'estimer l'état futur du système des carbonates et des microorganismes marins à l'échelle de la baie de Marseille. Pour cela le modèle biogéochimique Eco3M-CarbOx (Lajaunie-Salla et al., 2021) a été couplé au modèle hydrodynamique à trois dimensions MARS3D-RHOMA (Barré, 2023). Il a ensuite été utilisé avec les forçages régionaux du CMIP5 (Med-Cordex) correspondants aux scénarios climatiques optimiste et pessimiste afin de simuler deux jeux de 30 années de simulations permettant de reproduire de manière assez réaliste les processus couramment observés et bien connus dans la baie de Marseille : intrusion d'eau diluée provenant du Rhône, upwellings, Marseille Eddy etc...

2 Matériel & Méthodes

2.1 Les modèles numériques

2.1.1 Le modèle hydrodynamique MARS3D-RHOMA

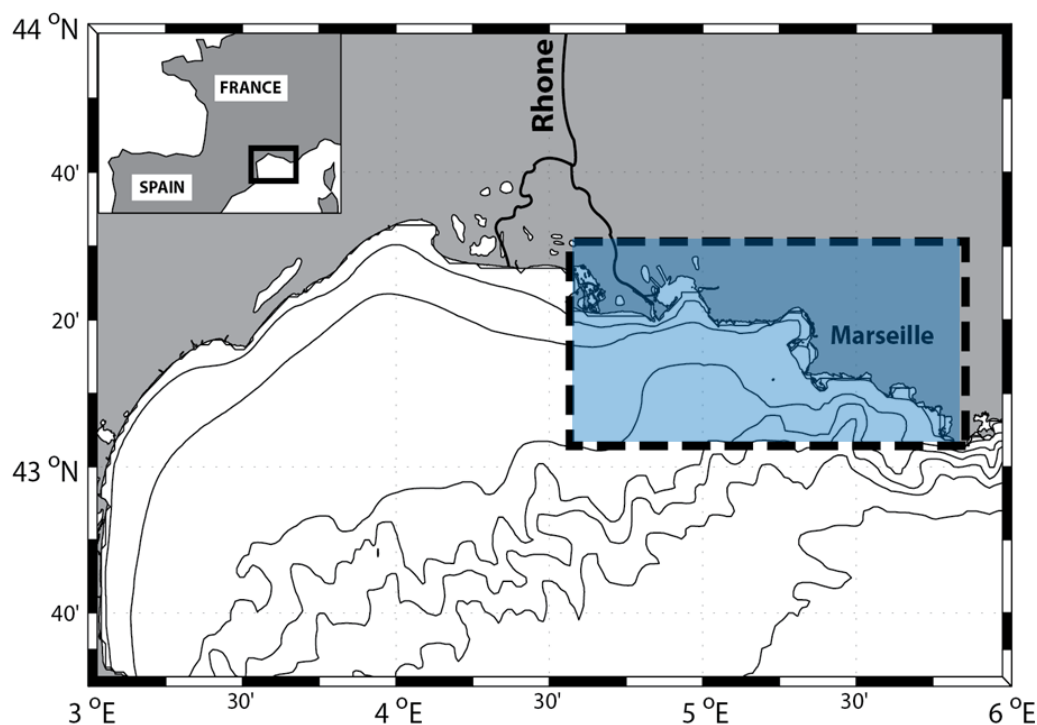


Figure 3 : Carte de la zone d'étude avec la zone modélisée RHOMA encadrée

Un modèle hydrodynamique centré sur la baie de Marseille et s'étendant du Grand Rhône au Cap Sicié a été mis en place (Figure 3). Pour cela, la configuration RHOMA (Rhône-Marseille) du modèle MARS3D (*3D hydrodynamic Model for Applications at Regional Scale*, IFREMER) (Lazure & Dumas, 2008) a été développée de façon à être la plus réaliste possible, avec prise en compte des interactions des processus à différentes échelles. Le modèle a été validé sur différents jeux de données (*in situ* et satellites, pour la température, la salinité et les courants) acquis en 2007-2008. Ce travail est décrit en détail dans Pairaud et al. (2011). L'amélioration du modèle et la compréhension des processus qui gouvernent la physique de la zone constituent le prérequis indispensable pour appréhender correctement la modélisation des processus biogéochimiques qui sont forcés par les mouvements advectifs et le mélange des masses d'eau.

Dans le cadre de cette étude, la configuration RHOMA du modèle tridimensionnel MARS3D est utilisée (Lazure et Dumas, 2008). Cette configuration comprend une résolution de maille de 200 m de côté, sur 30 niveaux sigma verticaux. Pour les besoins de développement des modèles couplés, une version avec une maille de 400 m de résolution horizontale a également été mise en place et validée sur la période 2007-2016 (Frayse et al., 2013 ; 2014 ; Ross et al., 2016). C'est cette version qui a été utilisée par la suite pour tous

les couplages avec d'autres modèles (Millet et al. 2018 ; Schmidt et al., 2019 ; Rossi et al., 2020 ; Reynes et al., 2021 ; Chevalier et al., 2023 ; Alcaïno et al., 2024).

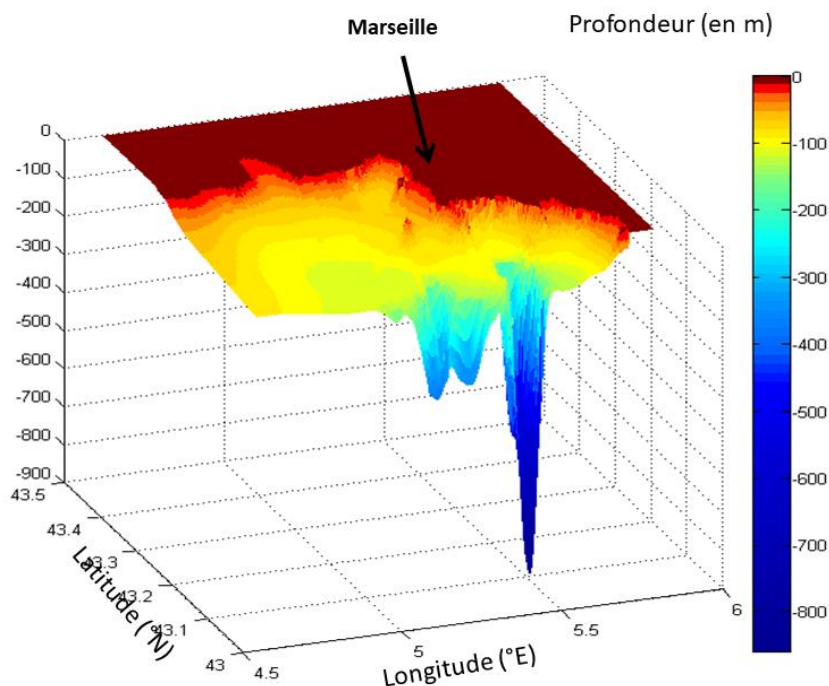


Figure 4 : Bathymétrie de la zone modélisée RHOMA

En plus de l'utilisation d'une bathymétrie réaliste (Figure 4), le modèle est forcé par le Rhône (débits journaliers), les rivières urbaines et l'atmosphère (vent, pluie, flux radiatifs).

Les débits de chaque apport de la ville de Marseille sont définis à partir des données de débits fournis par la Communauté Urbaine Aix-Marseille Provence Métropole (Délibération N° TCM-027-13512/23/BM du 16 mars 2023). Ces débits incluent les déversoirs d'orage et les torrents d'origine pluviale. Les rejets à Cortiou sont divisés en trois parts : la première est une estimation des débits de la STEP (eaux traitées), la seconde correspond aux rejets dans l'émissaire 1 sans les rejets de la STEP (ce sont donc des eaux résiduelles et des eaux bypassées) ; la troisième correspond aux rejets dans l'émissaire 2 sans la STEP (ce sont les eaux de l'Huveaune, du Jarret, avec des eaux bypassées) (Le Masson, 1995 ;1997 ;1998 ; Pinazo et al., 2022 ; Barré, 2023). Il faut noter que la totalité des apports par les pluies n'est sans doute pas reproduite car tous les rejets d'eau diffus ne sont pas pris en compte et seuls les débits mesurés sont inclus. D'autre part, certains appareils de mesure sont déconnectés lorsque les débits sont trop importants ou peuvent subir des pannes. Les apports en nutriments pendant ces pluies sont simulés par le modèle en affectant dans chaque apport des concentrations constantes ou variables dans le temps, issues de mesures ou estimées à partir de données bibliographiques (Barré 2023, § 3.4.3. Paramétrisation des fleuves et rivières urbaines).

Pour la période actuelle, se référer aux chapitres 3 et 5 de la thèse de Lucille Barré (2023) qui détaillent les forçages. Les forçages pour les prévisions décennales qui sont issus des scénarios climatiques optimiste et pessimiste sont décrits ci-après.

2.1.2 Le modèle Eco3M-CarbOx

Dans ce projet le modèle biogéochimique Eco3M-CarbOx (Figure 5) couplé au modèle hydrodynamique MARS3D-RHOMA (Figure 3 et Figure 4) est utilisé. Ce modèle est capable notamment de produire un champ 3D de flux de CO₂ air-mer et de carbone dans la colonne d'eau avec un degré de résolution spatio-temporelle très élevé dans une zone côtière soumise à une forte pression anthropique.

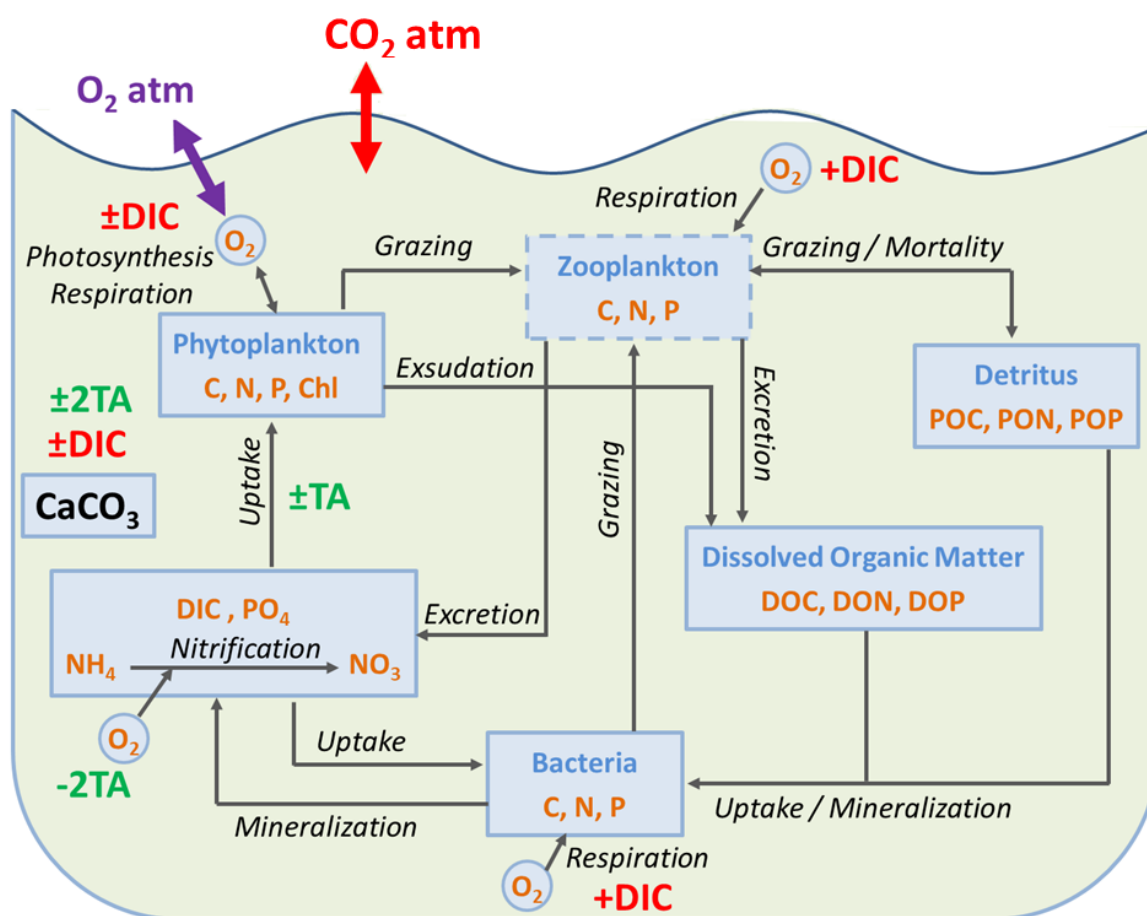


Figure 5 : Schéma descriptif du modèle biogéochimique Eco3M-CarbOx (Lajaunie-Salla et al., 2021)

Initialement, le modèle biogéochimique a été implémenté sur la baie de Marseille dans sa configuration Eco3M-Massilia (Frayssé et al., 2013). Il a été développé au sein de la plate-forme de modélisation biogéochimique Eco3M (*Ecological Mechanistic and Modular Model*) (Baklouti et al., 2006a & b). Ce modèle biogéochimique, qui a été modifié par l'intégration de deux types de phytoplanctons (picoplancton et petites diatomées) et par l'ajout du module du système des carbonates, est nommé Eco3M-CarbOx (Lajaunie-Salla et al., 2021). Il est couplé au modèle hydrodynamique MARS3D (Modèle à l'échelle régionale 3D) (Lazure et Dumas, 2008) dans sa configuration RHOMA (Frayssé et al., 2013 ; 2014 ; Ross et al., 2016). Cette

configuration comprend 252×120 cellules de calcul sur l'horizontale (grille 'C') soit une résolution de maille correspondante de 400 m de côté, sur 30 niveaux sigma verticaux (avec raffinement de la résolution au fond et en surface). Le pas de temps est fixé à 30 secondes. Le modèle biogéochimique Eco3M-CarbOx (23 variables d'état) décrit les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore dans cinq compartiments : (i) phytoplancton comprenant les petites diatomées et le picoplancton, (ii) bactéries hétérotrophes, (iii) matières organiques particulaires détritiques, (iv) matières organiques dissoutes labiles et v) matières inorganiques dissoutes, notamment ammonium, nitrates, phosphates, oxygène, carbone inorganique dissous et l'alcalinité totale. Un module de chimie des carbonates a récemment été ajouté à ce dernier modèle biogéochimique afin d'évaluer la dynamique spatiale et temporelle du cycle du carbone dans la baie de Marseille (Figure 5). Les variables pH et $p\text{CO}_2$ sont calculées de manière diagnostique à partir du carbone inorganique dissous et de l'alcalinité totale (Barré et al., 2024a).

2.1.3 Le modèle Eco3M_MIX-CarbOx

Le travail de doctorat de Lucille Barré (2023) a permis d'accroître la représentation de la biodiversité fonctionnelle au sein de la communauté modélisée de plancton marin en ajoutant les caractéristiques biogéochimiques de la mixotrophie, considérées comme essentielles pour influencer sur le métabolisme du carbone de l'écosystème marin. En effet, certaines études récentes mettent en évidence une fonction complexe de mixotrophie qui confère au plancton la capacité d'être autotrophe et / ou hétérotrophe selon les conditions environnementales, en particulier les conditions nutritives (Oikonomou et al., 2020 ; Livanou et al., 2021). Ce trait biogéochimique renforce le transfert de la biomasse marine vers des classes de taille plus grandes en augmentant le puits de carbone biologique océanique qui sera stocké en profondeur. Pour cela, nous avons ajouté deux types de zooplanctons et un troisième phytoplancton dans le modèle biogéochimique. Pour le zooplancton, nous représentons les foraminifères et les ptéropodes, et pour le phytoplancton les synechococcus (picoplancton), flagellés et ciliés (mixotrophes), les petites diatomées et les coccolithes (genre *Emiliana h.*) pour les organismes calcifiants (Barré, 2023 ; Barré et al., 2023).

2.2 Les données *in situ*

2.2.1 Evaluation du modèle biogéochimique avec carbonates Eco3M-CarbOx

Les données expérimentales *in situ* collectées dans la baie de Marseille sont utilisées à des fins d'évaluation du modèle dans la période récente actuelle de 2017 à 2021. MOOSE et SOMLIT sont des services nationaux d'observation dédiés à l'observation de l'évolution à long terme de la mer Méditerranée nord occidentale dans le contexte du changement climatique et des pressions anthropiques à l'échelle, respectivement, du bassin et du littoral. Ils fournissent des données sur la chimie des carbonates (données disponibles à partir de juin 2016) et la biomasse à l'échelle mensuelle et bimestrielle, y compris des profils verticaux dans la colonne d'eau.

2.2.2 Impact de la métropole Aix-Marseille

Le modèle Eco3M-CarbOx a été utilisé pour évaluer l'impact de la métropole Aix-Marseille sur le système des carbonates et sur la structure des communautés planctoniques marines. Le modèle est forcé par des séries temporelles de CO₂ atmosphérique actuelles (mesurées) et futures (issues des projections du CMIP6). Sur la métropole Aix-Marseille, la station météorologique Cinq Avenues est équipée d'un capteur de mesure de la concentration atmosphérique en CO₂ et les données sont mises à disposition par ATMOSud.

Le modèle prend aussi en compte les apports des effluents urbains de la ville de Marseille (rejets de l'émissaire de Cortiou, des rivières urbaines et des déversoirs d'orage). Ces données de la Métropole Aix-Marseille Provence (effectivement mises à disposition avec l'aide de la SERAMM en juillet 2023) sont utilisées sous réserve d'obtention liée à une convention longue à établir : une prolongation du projet a été nécessaire pour leur prise en compte).

2.3 Réalisation des simulations historiques d'évaluation 2017-2021 (Barré, 2023)

Les simulations pour la période actuelle (2017 – 2021) avaient notamment pour objectifs : (i) de choisir la paramétrisation des forçages la plus réaliste, (ii) d'évaluer le modèle en comparant les résultats obtenus aux mesures disponibles dans la zone, et (iii) de mettre en évidence le statut de la baie vis-à-vis de la concentration en CO₂ (source ou puits de CO₂) et du point de vue trophique (NCP). Dans cette partie, nous rappelons les principaux tests et résultats associés à ces simulations. Pour plus de détails, se référer aux chapitres 3 à 5 de la thèse de Lucille Barré (2023), dans lesquelles tous les forçages et résultats sont décrits.

De nombreux tests ont d'abord été effectués afin d'obtenir une configuration d'Eco3M-CarbOx 3D la plus réaliste possible. Parmi ces tests, la comparaison des différentes paramétrisations des points de rejets (Rhône et rivières urbaines en débit et concentrations) a été une étape cruciale, notamment du point de vue des variables du système des carbonates. Par exemple, la comparaison d'une paramétrisation considérant des valeurs constantes d'AT, DIC, pH et *p*CO₂ (basées sur la littérature) dans le Rhône à une paramétrisation utilisant des mesures mensuelles d'AT et de pH (valeurs de DIC et *p*CO₂ déduites ensuite de ces mesures ; données Naïades : <https://naiades.eaudefrance.fr>) dans le Rhône a permis de montrer que certains événements (ex : fortes diminutions d'AT ou de DIC) n'étaient pas reproduits par l'utilisation de valeurs constantes. Ce résultat a motivé l'utilisation de la paramétrisation utilisant les données mensuelles Naïades pour la représentation des carbonates dans le Rhône.

Les simulations lancées avec la paramétrisation des forçages choisie ont ensuite pu être évaluées, permettant ainsi de mettre en évidence les différents biais du modèles qui devront être pris en compte lors de l'interprétation des résultats obtenus. Les principaux résultats de ces simulations sont rappelés ci-dessous :

- La représentation de la majeure partie des variables du modèle est réaliste avec cependant une sous-estimation globale de la concentration en chlorophylle, de la température et de la $p\text{CO}_2$ et une surestimation globale d'AT et de DIC.
- L'étude des flux air-mer de CO_2 a permis de démontrer que la baie se comporte globalement comme un puits de CO_2 pendant la période étudiée, résultat en accord avec les précédentes études réalisées en milieu côtier méditerranéen.
- L'étude de la NCP a permis de mettre en évidence une dominance des processus hétérotrophes à la station SOLEMIO, résultat pouvant être impacté par la sous-estimation globale de la concentration en chlorophylle.

2.4 Réalisation des prévisions décennales des scénarios de changement climatique

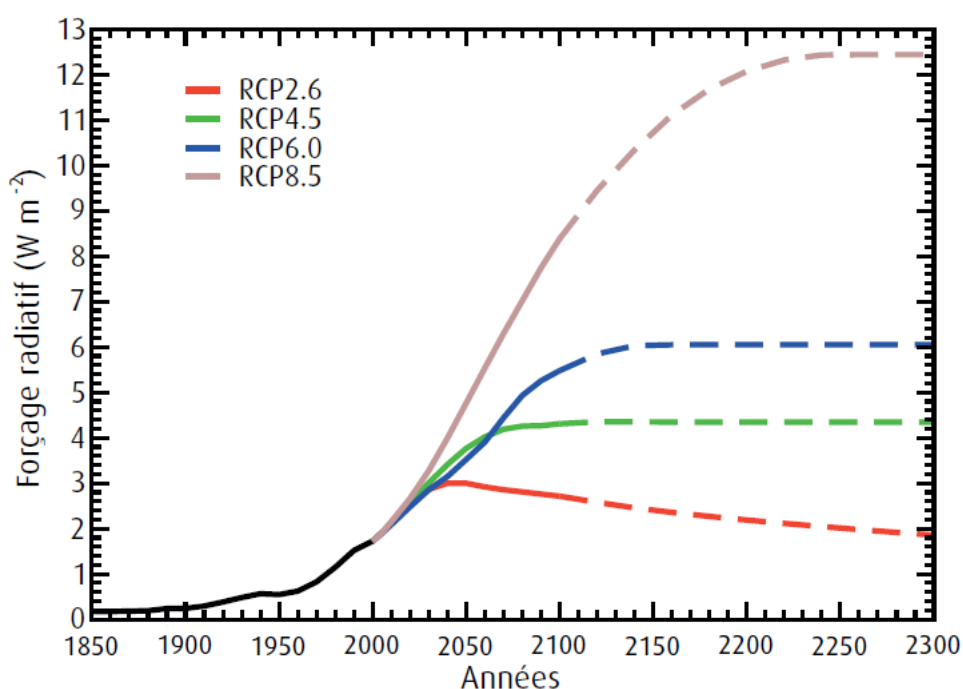


Figure 6 : Evolution du forçage radiatif total et global (W.m^{-2}) pour la période historique (1850-2005 en noir) et pour les quatre scénarios RCP du CMIP5 (2005-2100 en couleur) ainsi que leurs extensions en tiretés jusqu'en 2300. Le forçage radiatif est exprimé par rapport à l'année de référence de 1750.

Les prévisions décennales sur 30 ans effectuées dans ce travail, utilisent les données des scénarios de dérèglement climatique de deux projections (RCP 2.6 et 8.5) établies et référencées par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) qui alimentent le modèle 3D de la baie de Marseille RHOMA-CarbOx (Figure 6). Le rapport du GIEC de 2021 (AR6) s'appuyait sur des observations disponibles jusqu'à 2019-2020 afin d'établir certains indicateurs clés du réchauffement climatique au fil du temps, de 1850 à la fin de 2023. Il permet de donner une estimation du réchauffement climatique depuis 1850 à ce jour et de ses causes. Le prochain rapport du GIEC est attendu vers 2027. Une mise à jour annuelle du GIEC renforce

la transparence et la cohérence entre rapports successifs, pour informer la prise de décision. Il est à noter qu'en 2023, lors de la dernière réactualisation annuelle du GIEC des indicateurs clés de l'état du climat et de l'influence humaine sur celui-ci (Forster et al., 2024), le scénario RCP 2.6 est plus qu'optimiste car il est dépassé, avec un forçage radiatif actualisé de 2.79 W.m^{-2} (au lieu des 2.6 W.m^{-2} du RCP 2.6) (Figure 7). Nous pouvons aussi constater qu'en 2023, le réchauffement climatique global a atteint $1,3 \text{ }^\circ\text{C}$ et augmente de plus de $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ par décennie. Cela est dû aux émissions de gaz à effet de serre sans précédent.

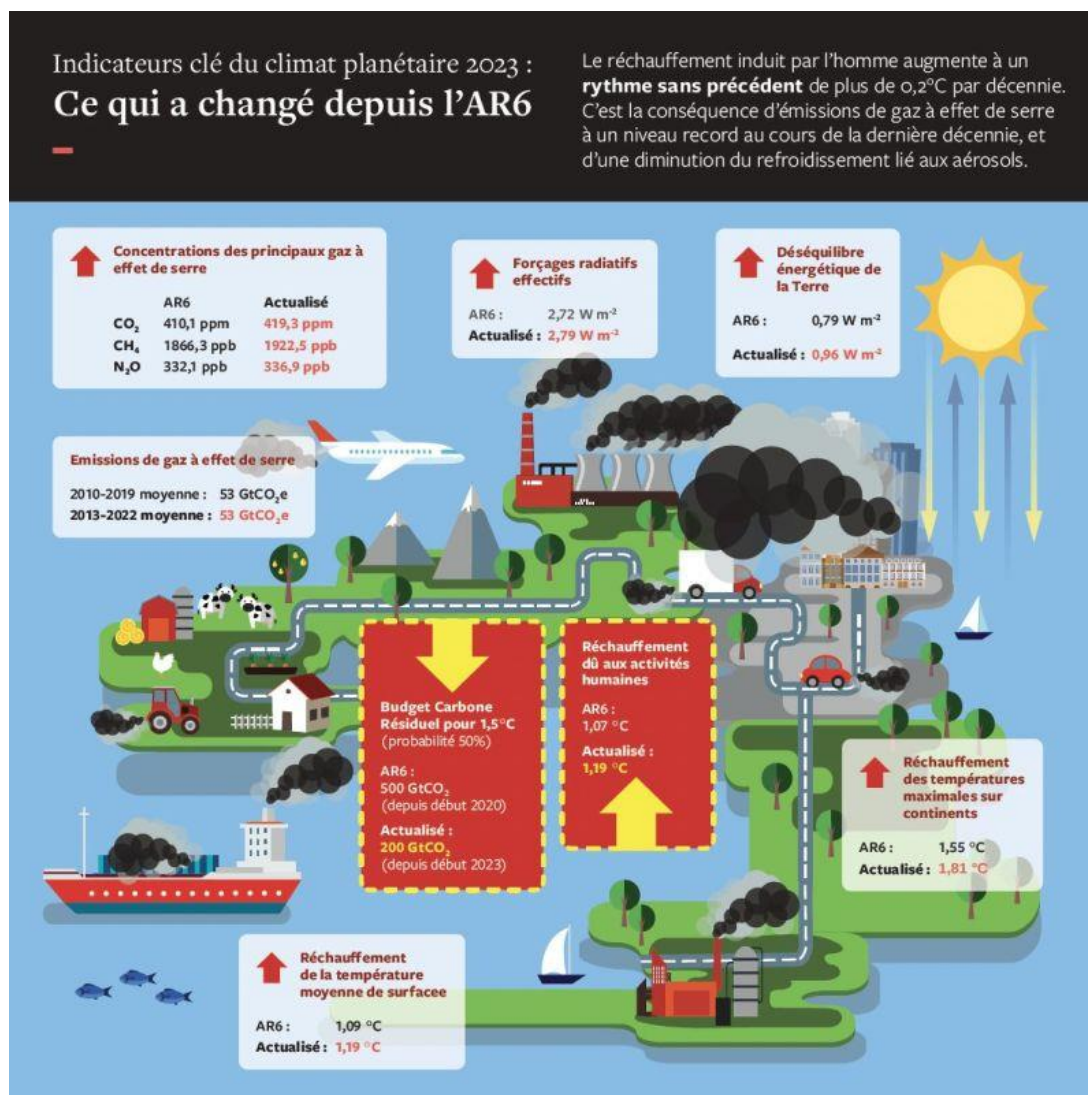


Figure 7 : Infographie traduite en français (Valérie Masson-Delmotte) des principaux indicateurs réévalués dans Forster et al. (2024)

2.4.1 Forçages atmosphériques

2.4.1.1 Forçages physiques

Les variables atmosphériques de forçage sont issues des simulations de projections climatiques régionales MED-CordeX effectuées par le modèle climatique régional Aladin du CNRM (Ruti et al., 2016 ; Somot et al., 2018). Elles ont été récupérées sur le site Copernicus C3S (2019) (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!dataset/10.24381/cds.bc91edc3?tab=overview>) sauf les

composantes (zonales et méridionales) du vent à 10 m qui ne sont pas distribuées par le C3S mais directement sur le site de MED-Cordex (<https://www.medcordex.eu>). La simulation régionale MED11 avec une résolution de 0.11 x 0.11 degrés, utilisée pour le scénario RCP8.5 est celle du CMIP5 du CNRM-CERFACS du modèle Aladin 52 version 1 (membre r1i1p1). La simulation régionale EUR11 avec une résolution de 0.11 x 0.11 degrés, utilisée pour le RCP2.6 est celle du CMIP5 du CNRM-CERFACS du modèle Aladin 63 version 2 (membre r1i1p1).

Les variables grillées journalières utilisées sont la température de l'atmosphère à 2 m au-dessus du niveau de la mer (tas), le rayonnement solaire en $W.m^{-2}$ (rsds), la couverture nuageuse totale (en %) (clt) l'humidité relative (hurs) et les précipitations (mm par jour) (pr). Elles sont transformées pour être utilisables directement par MARS3D. Les composantes de vitesses du vent à 10 m méridionale et zonale (uas et vas) de la simulation MED11 étaient disponibles sur le site de MED-Cordex. Pour la simulation EUR11, ce sont les composantes de la simulation EUR44 à la résolution 0.44 x 0.44 degrés qui ont été réinterpolées sur la même grille à 0.11 x 0.11 degrés.

Dans les sections suivantes, la représentation des variables atmosphériques de forçage est détaillée. Lorsque les représentations pour l'ensemble du domaine et la station SOLEMIO sont très similaires, seule celle obtenue pour l'ensemble du domaine est présentée. Dans ce cas, les figures correspondant à la station SOLEMIO sont disponibles en informations supplémentaires sur ZENODO (Barré et al., 2024b S.I.) et les observations effectuées ci-dessous sont également valables pour ces figures.

2.4.1.1.1 Flux Solaire

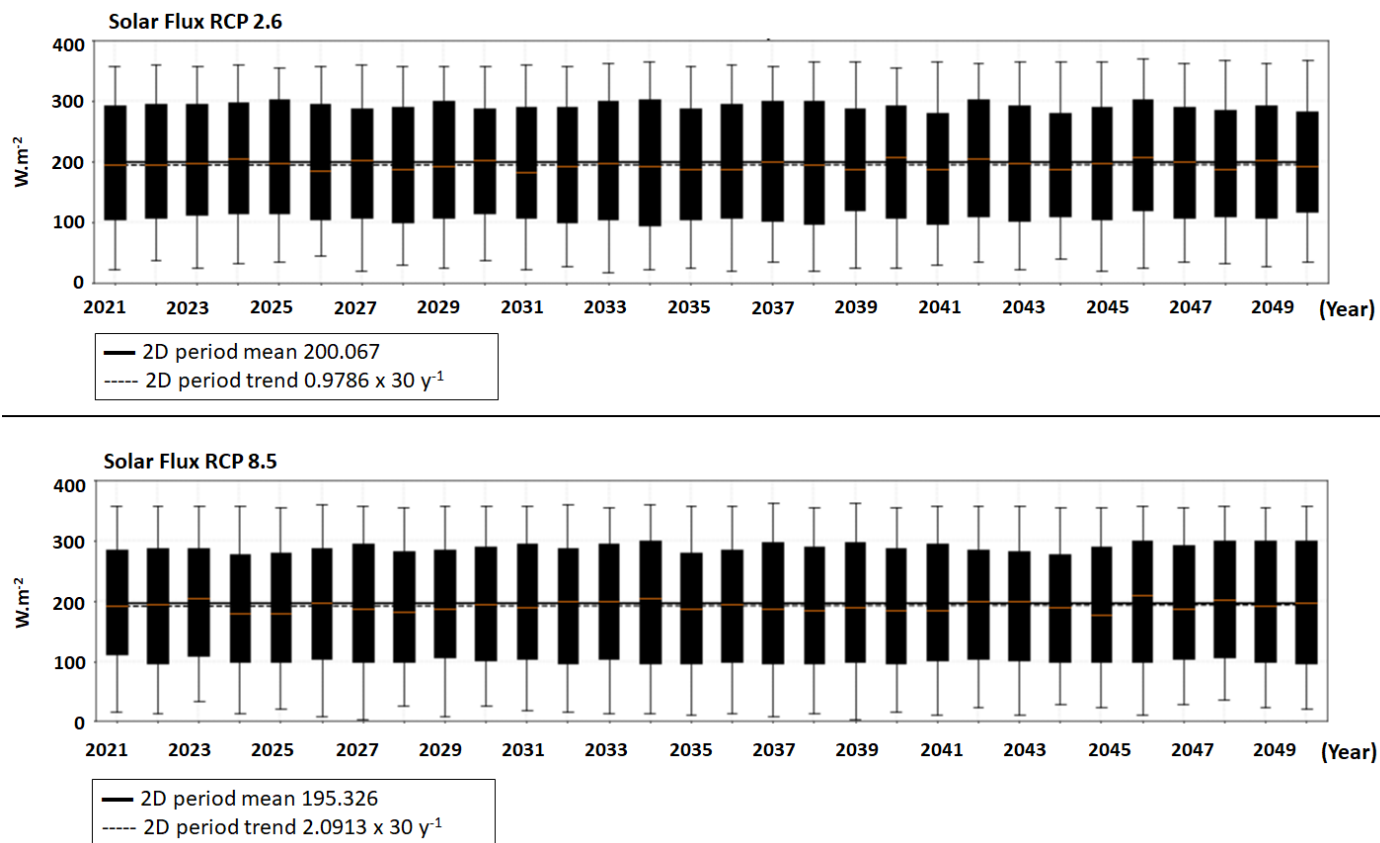


Figure 8 : Evolutions temporelles décennales de l'intensité du flux solaire de forçage de 2021 à 2050 simulées par le modèle du CNRM Aladin pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

Le flux solaire ($rsds$) futur augmente légèrement et seuls les modèles régionaux comme Aladin, incluant les aérosols et la couverture nuageuse, sont capables d'en faire une projection pour les scénarios climatiques. En fait, le flux solaire est très difficile à simuler car il y a beaucoup trop d'incertitudes sur l'évolution future des aérosols et de la couverture nuageuse. Les résultats obtenus sur la baie de Marseille sont en accord avec les projections des modèles régionaux comme Aladin, où la couverture nuageuse diminue, participant ainsi à l'augmentation du flux solaire (MedECC, 2020a). L'augmentation est plus notable pour le RCP 8.5 que pour le RCP 2.6 (Figure 8).

2.4.1.1.2 Flux thermique

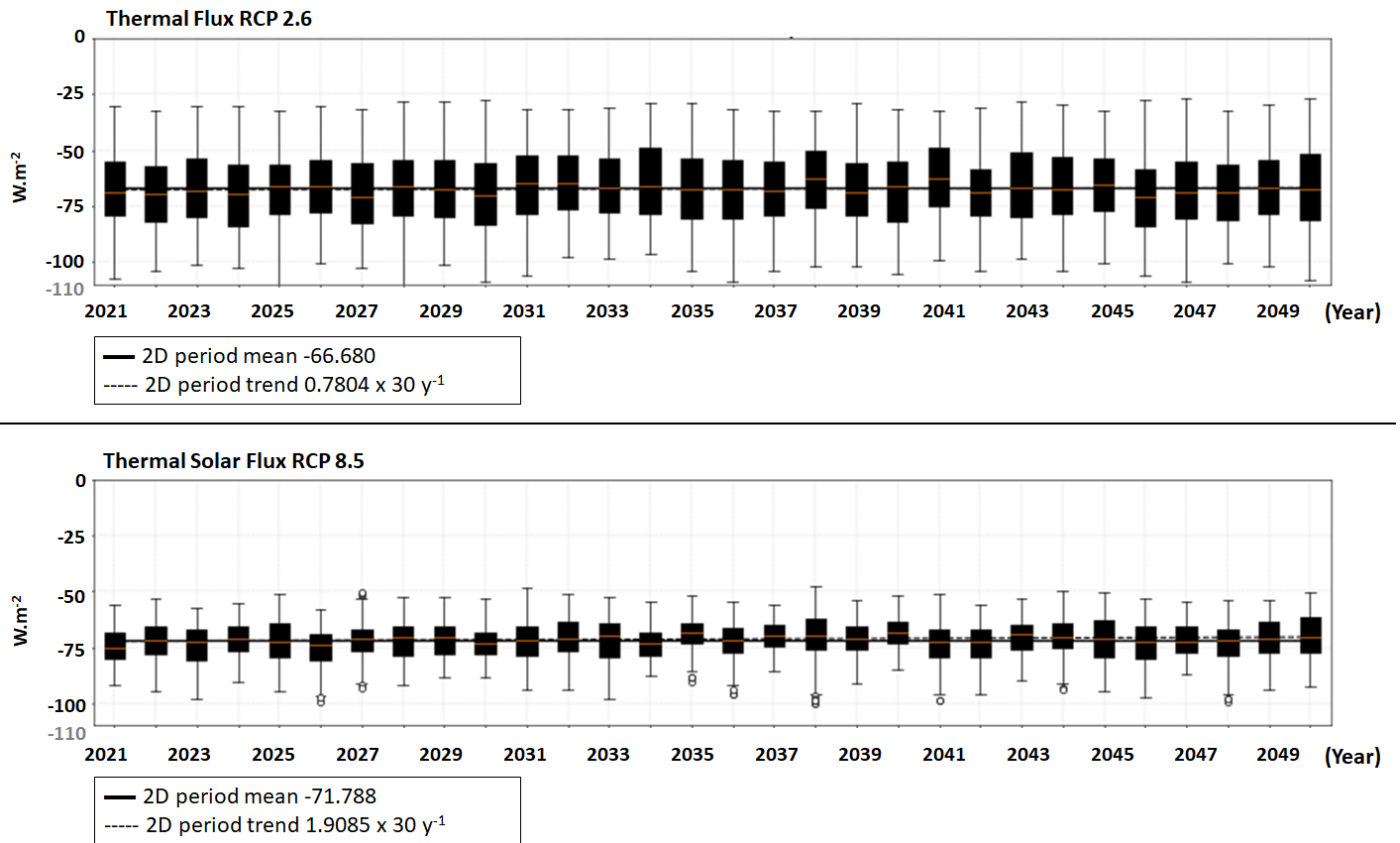


Figure 9 : Evolutions temporelles décennales de l'intensité du flux thermique de forçage de 2021 à 2050 simulées par le modèle du CNRM Aladin pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

Le flux thermique émis par l'océan est calculé selon la théorie du corps noir et la formulation de Luyten (Luyten & De Mulder, 1992) par MARS3D à partir de la température de surface de l'atmosphère (tas), de la température de la mer simulée par MARS3D-RHOMA (SST), de l'humidité relative (hurs) et de la couverture nuageuse (clt) calculées par Aladin. Les résultats obtenus indiquent bien une différence d'environ -5 W.m^{-2} réémis entre le scénario RCP 2.6 et le RCP 8.5 avec une tendance à la diminution du flux émis d'environ 2 W m^{-2} , compris dans la fourchette de 1.8 and 5.5 W m^{-2} jusqu'en 2050 pour le RCP 8.5 donnée par Med-Cordex (MedECC, 2020a), indiquant un stockage de chaleur par la mer au cours des trente ans et donc un réchauffement de la mer Méditerranée par l'atmosphère (Tableau 1).

2.4.1.1.3 Vent

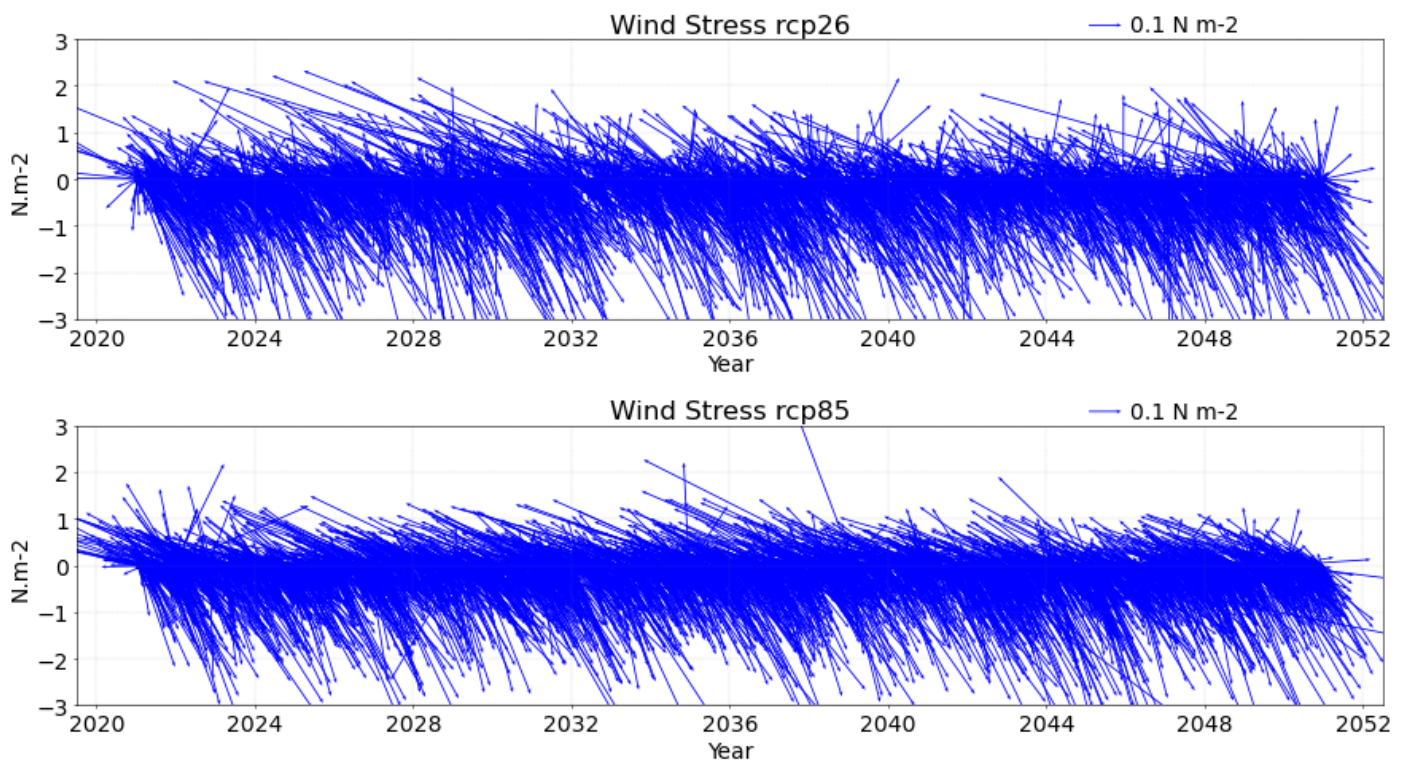


Figure 10 : Vecteurs de direction de la tension de frottement due au vent journalier de forçage sur l'ensemble du domaine de 2021 à 2050 simulés par le modèle du CNRM Aladin pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

La Figure 10 montre les directions de la tension de vent simulées par les forçages utilisés du CMIP5 du CNRM pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5. Les directions de vents dominants provenant du nord-ouest (Mistral) et du sud-est sont reproduites et permettent de simuler dans le futur, les processus induits par ces vents ou par les renverses de vent, historiquement rencontrés dans la baie de Marseille : upwelling (Millot, 1979 ; 1990 ; Pairaud et al., 2011), intrusions d'eau diluée provenant du Rhône (Frayssé et al., 2014), Marseille Eddy (Schaeffer et al, 2011). Le secteur nord-ouest se trouve renforcé, et les tempêtes de Mistral accrues comme cela est reporté dans MedECC (2020a). L'intensité moyenne sur les trente ans du vent sur l'ensemble du domaine est relativement proche pour les deux scénarios, un peu plus faible mais avec beaucoup plus de variabilité (coups de vent) pour le RCP 2.6, et un peu plus élevée avec moins de variabilité pour le RCP8.5.

Cependant au point SOLEMIO, il est à noter que l'intensité du vent moyenne sur les trente ans pour le RCP 8.5 pessimiste est nettement plus faible que pour le scénario RCP 2.6 (qui lui est assez proche de la moyenne calculée pour l'ensemble du domaine) et présente moins de variabilité et moins de coups de vents (points extrêmes) (Figure 12).

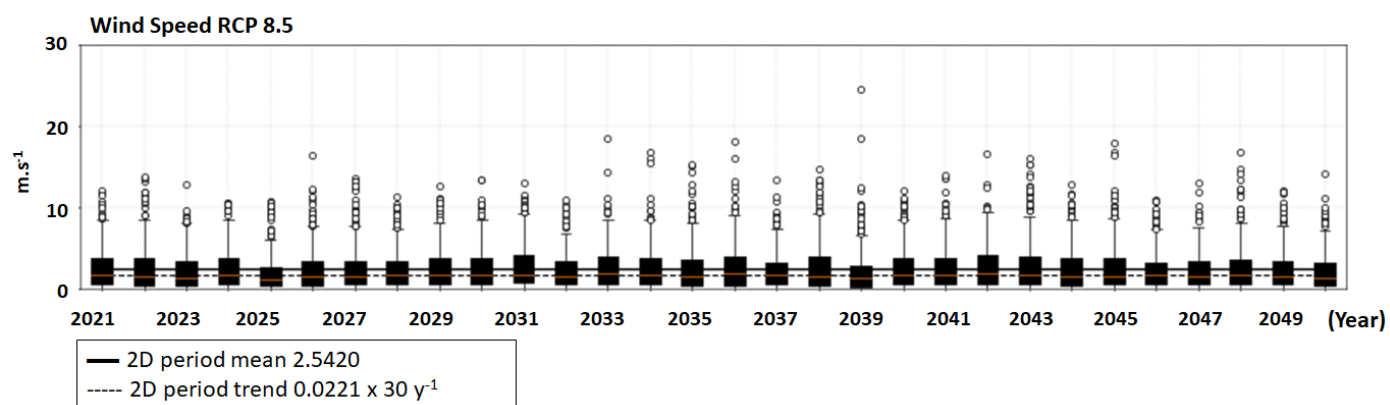
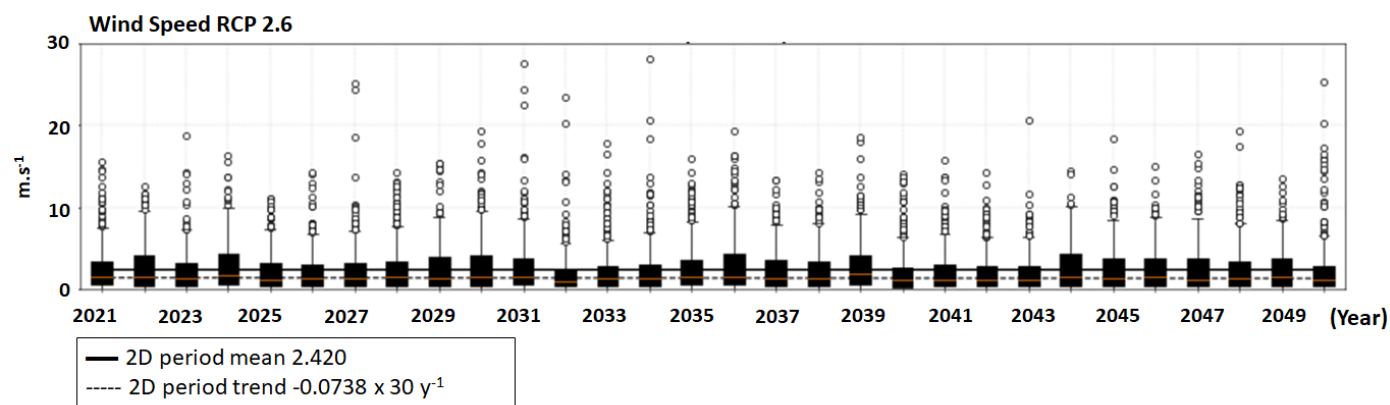


Figure 11 : Evolutions temporelles décennales de l'intensité du vent de forçage de 2021 à 2050 simulées par le modèle du CNRM Aladin pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

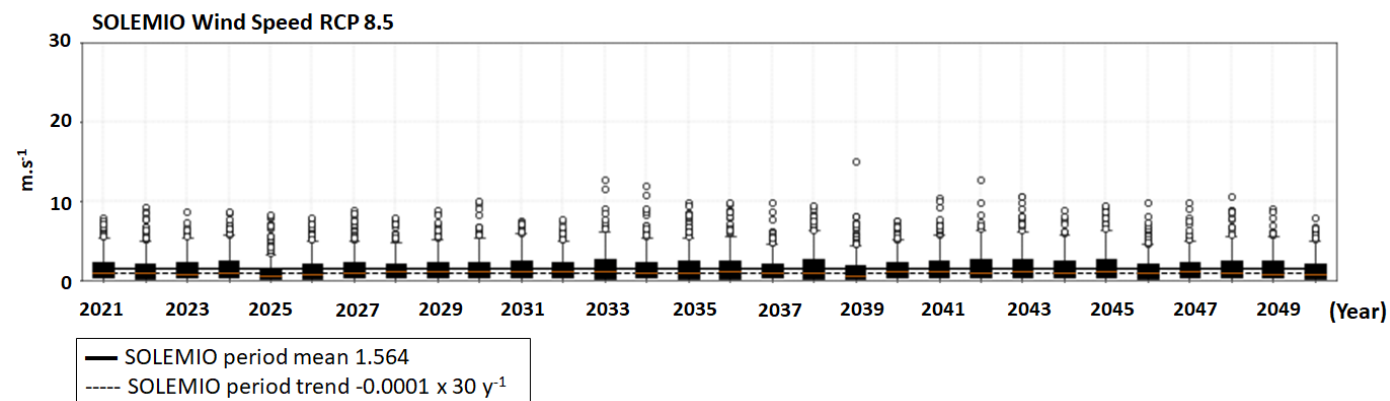
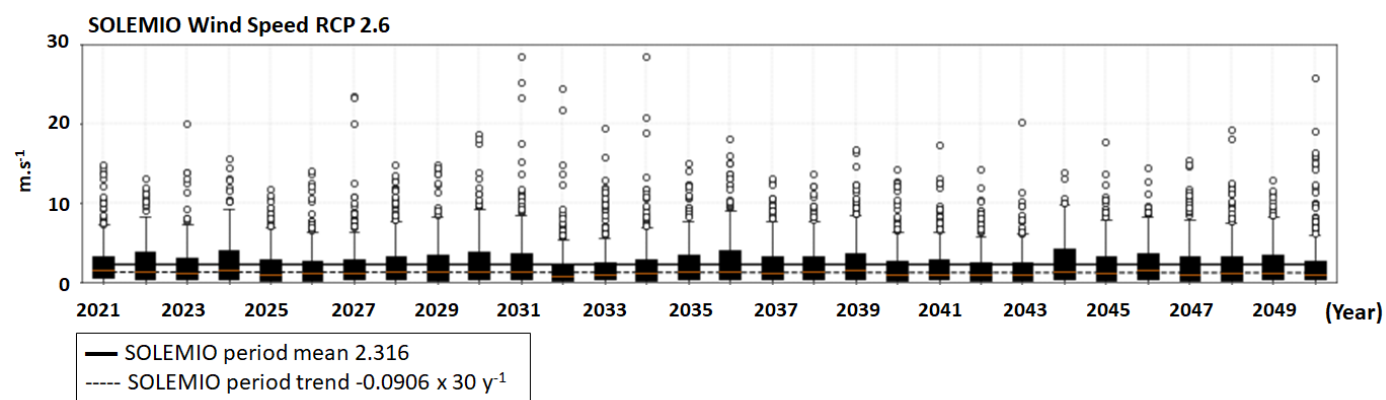


Figure 12 : Evolutions temporelles décennales de l'intensité du vent de forçage au point SOLEMIO de 2021 à 2050 simulées par le modèle du CNRM Aladin pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

L'intensité du vent en moyenne plus forte pour le scénario RCP 2.6 va à une légère diminution sur les trente ans pour l'ensemble du domaine (Figure 11), de même qu'à SOLEMIO (Figure 12). Pour le scénario RCP 8.5, la même tendance est observée, sauf une légère augmentation pour l'ensemble du domaine (Figure 11 et Tableau 2). Ceci (Tableau 1) concorde plutôt avec les prévisions d'Euro-Cordex et Med-Cordex même si les projections de vents présentent de nombreuses incertitudes. Le Mistral devrait présenter peu de changements dans les scénarios futurs (Obermann-Hellhund et al., 2018), et avec le modèle Aladin du CNRM, montrer une rare augmentation de l'ordre du dixième de $m.s^{-1}$ comme le montre la Figure 11.

2.4.1.1.4 Pluie

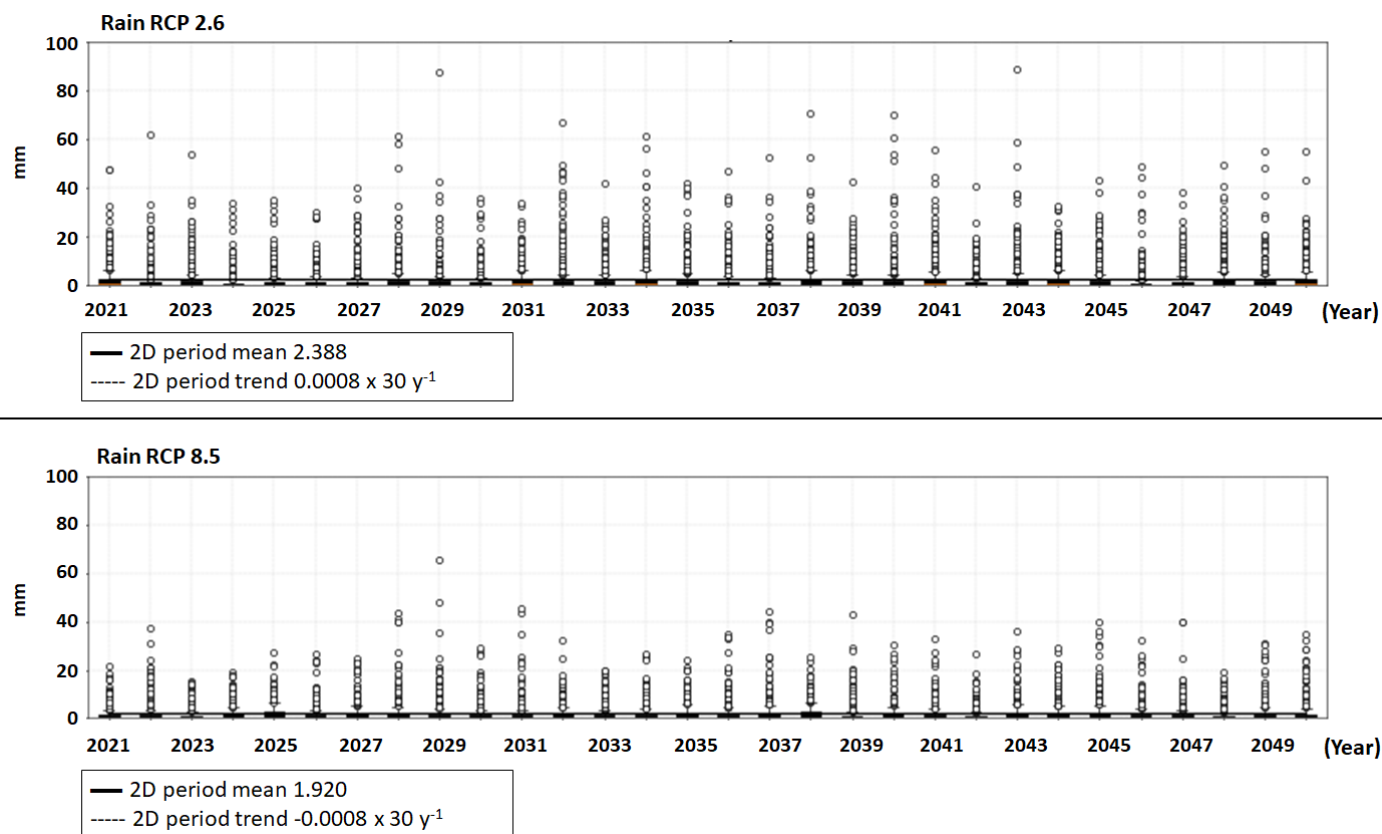


Figure 13 : Evolutions temporelles décennales des précipitations journalières de forçage de 2021 à 2050 simulées par le modèle du CNRM Aladin pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

Les précipitations journalières sont plus faibles pour le scénario pessimiste RCP 8.5 que pour le scénario RCP 2.6 (Figure 13). La tendance est à la stabilité (très légère augmentation pour le scénario RCP 2.6), alors qu'elle est à la diminution au cours des trente années simulées jusqu'en 2050, pour le scénario RCP 8.5. Cela correspond bien à ce que les modèles projettent dans le cadre du projet Med-Cordex, dont les conclusions principales sont résumées dans les évaluations MAR1 (MedECC, 2020a & b). Notamment, le fait que le scénario RCP 2.6 présenterait une légère augmentation dans la zone de la baie de Marseille (entre 0 et 10%) alors que le scénario RCP 8.5 présenterait une diminution entre 0 et 10 % ce qui correspond à ce qui est simulé (Tableau 1).

Tableau 1 : Variation relative par rapport à la valeur de référence (simulations) des variables de forçage simulée par le modèle du CNRM Aladin durant la période 2021 à 2050 pour les RCP 2.6 et RCP 8.5. Pour les tendances et variations, les augmentations sont indiquées en rouge et les diminutions en bleu.

Variable	Localisation	Valeur moyenne 2021	RCP 2.6			RCP 8.5		
			Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans	Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans
Flux solaire (W.m ⁻²)	Domaine Surface	192.7916	+0.033	+0.979	+0.51%	+0.070	+2.091	+1.08%
	SOLEMIO Surface	194.9033	+0.019	+0.580	+0.30%	+0.052	+1.547	+0.79%
Flux thermique (W.m ⁻²)	Domaine Surface	-67.2619	+0.026	+0.780	-1.16%	+0.064	+1.908	-2.84%
	SOLEMIO Surface	-68.0768	+0.038	+1.145	-1.68%	+0.071	+2.128	-3.13%
Intensité du vent (m.s ⁻¹)	Domaine Surface	2.6570	-0.002	-0.074	-2.78%	$+7 \times 10^{-4}$	+0.022	+0.83%
	SOLEMIO Surface	2.1837	-0.003	-0.091	-4.15%	0	-1×10^{-4}	-0.005%
Pluie (mm)	Domaine Surface	2.22	$+3 \times 10^{-5}$	$+8 \times 10^{-4}$	+0.04%	-3×10^{-5}	-8×10^{-4}	-0.04%
	SOLEMIO Surface	2.17	$+1 \times 10^{-5}$	$+3 \times 10^{-4}$	+0.01%	-2×10^{-5}	-7×10^{-5}	-0.03%

Tableau 2 : Valeurs moyennes sur 30 ans des variables de forçage simulée par le modèle du CNRM Aladin durant la période 2021 à 2050 pour les RCP 2.6 et RCP 8.5.

Variable	Localisation	Valeur moyenne sur 30 ans	
		RCP 2.6	RCP 8.5
Flux solaire (W.m ⁻²)	Domaine Surface	200.067	195.326
	SOLEMIO Surface	202.585	197.144
Flux thermique (W.m ⁻²)	Domaine Surface	-66.680	-71.788
	SOLEMIO Surface	-67.715	-72.900
Intensité du vent (m.s ⁻¹)	Domaine Surface	2.420	2.542
	SOLEMIO Surface	2.316	1.564
Pluie (mm)	Domaine Surface	2.388	1.920
	SOLEMIO Surface	2.327	1.748

2.4.1.2 Forçages en pCO₂ atmosphérique

Les forçages en pression partielle de CO₂ (pCO_{2,atm}) atmosphérique sont issus du Programme mondial de recherche sur le climat CMIP6 (O'Neill et al., 2016).

Les scénarios du CMIP6 font intervenir, comme dans le CMIP5, des scénarios climatiques (RCP : *Representative Concentration Pathways*) basés sur le forçage radiatif auquel sera soumis la planète en fonction de la concentration de Gaz à Effet de Serre (GES) présents dans l'atmosphère, mais également des scénarios sociaux économiques (SSP : *Shared Socioeconomic Pathways*) qui prennent en compte les nouveaux choix

d'avenir de développement sociétal. Les fichiers de $p\text{CO}_{2,\text{atm}}$ utilisés pour calculer les flux de CO_2 à l'interface air-mer durant les deux scénarios sont les $p\text{CO}_{2,\text{atm}}$ du SSP1-RCP2.6 pour l'optimiste et les $p\text{CO}_{2,\text{atm}}$ du SSP5-RCP8.5 pour le pessimiste. D'après O' Neill et al. (2016) ces scénarios peuvent être décrits comme suit :

- **SSP1-RCP2.6** : ce scénario représente le bas de la fourchette des futurs forçages climatiques envisagés et affine les valeurs initialement proposées par le RCP2.6 du CMIP5. Il correspond aux accords de Paris de 2015 de la COP21 (*The United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) 2015) puisqu'il est prévu qu'il produira un réchauffement moyen multi-modèle nettement inférieur à 2°C d'ici 2100, et permet donc d'étayer les analyses de cet objectif politique de sobriété. Le SSP1 a été choisi parce qu'il correspond à d'importants changements socio-économiques, notamment d'affectation/usage des terres (en particulier une couverture forestière mondiale accrue). Ce scénario optimiste est pertinent car il combine une plus faible vulnérabilité environnementale, avec de plus faibles défis politiques pour leur atténuation ainsi qu'un faible signal de forçage climatique. Il est cependant à noter qu'il est en 2023 déjà dépassé puisque le forçage radiatif vient d'être réévalué à 2.79 W.m^{-2} (Forster et al., 2024) (Figure 7).
- **SSP5-RCP8.5** : ce scénario représente le haut de la fourchette des futurs forçages climatiques envisagés qui affine les valeurs initialement proposées par le RCP8.5, et devrait être utilisé pour aider répondre à de nombreuses questions scientifiques et politiques. Le scénario socioéconomique SSP5 a été choisi pour ce forçage car c'est le seul scénario SSP avec des émissions de gaz à effet de serre suffisamment élevées pour produire un forçage radiatif de 8.5 W.m^{-2} en 2100.

Les données de projection du CMIP6 (SSP1-RCP2.6 & SSP5-RCP8.5) qui ont été récupérées sur le site Copernicus C3S (2021) pour calculer la $p\text{CO}_{2,\text{atm}}$ sont la pression atmosphérique au niveau de la mer (ps), la température à la surface de la mer SST (tos), la hauteur du niveau de la mer SSH (sos) et l'humidité relative (hur) des modélisation du CNRM (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=overview>). Elles sont enregistrées/moyennées tous les mois à haute résolution dans notre zone $40-45^\circ\text{N}$ et 2 à 18°E .

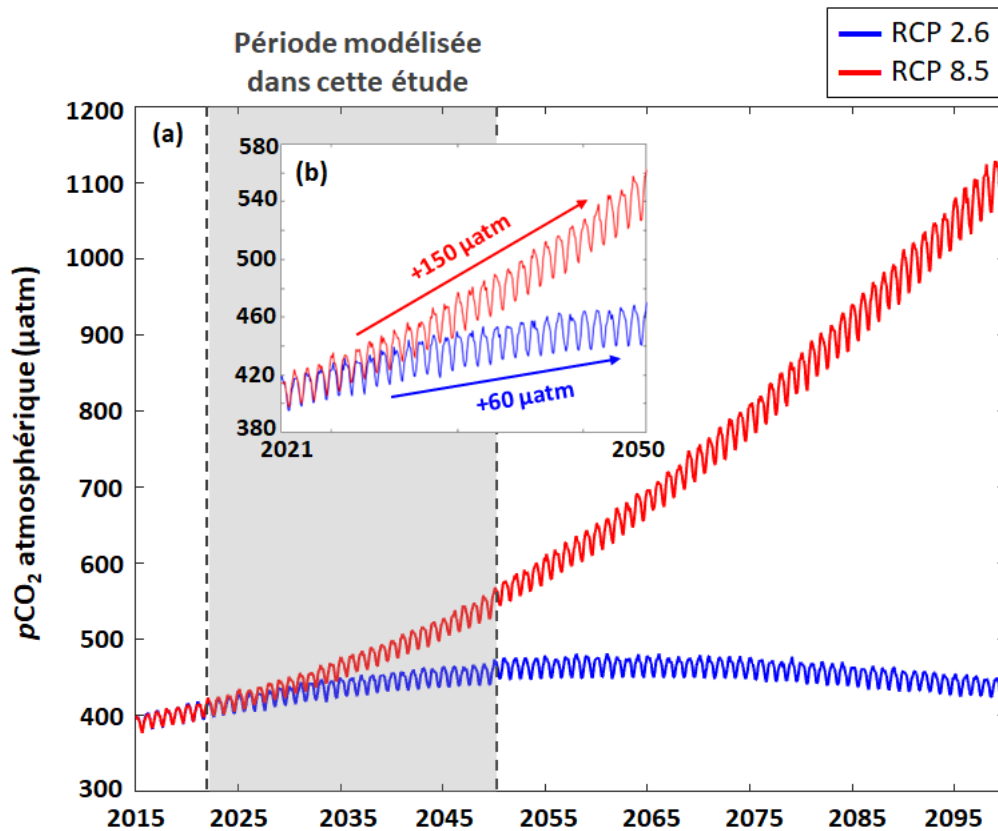


Figure 14: Représentation de l'augmentation de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique attendue pour chaque scénario considéré (RCP 2.6, scénario le plus optimiste et RCP 8.5, scénario le plus pessimiste) (a) sur la période 2015 – 2099 et (b) sur la période étudiée 2021 – 2050.

Les $p\text{CO}_{2,\text{atm}}$ calculées pour la période 2015 – 2099 sont présentées sur la Figure 14.a. Sur cette période, une augmentation soutenue de $p\text{CO}_{2,\text{atm}}$ est calculée pour le scénario RCP 8.5 (augmentation d'environ 700 μatm entre 2015 et 2099). Cette augmentation est beaucoup moins marquée pour le scénario RCP 2.6 pour lequel une valeur maximale de $p\text{CO}_{2,\text{atm}}$ (475 μatm) est atteinte pendant l'année 2060, une diminution est ensuite observée jusqu'en 2099. Il est important de noter que même si ces scénarios donnent des valeurs de $p\text{CO}_{2,\text{atm}}$ très différentes à l'horizon 2099, ils restent très similaires jusqu'en 2030. Pendant la période étudiée (2021 – 2050, Figure 14.b), les deux scénarios décrivent une augmentation de la $p\text{CO}_{2,\text{atm}}$ qui est beaucoup plus soutenue pour le scénario RCP 8.5 (+150 μatm en 30 ans vs +60 μatm en 30 ans pour le scénario RCP 2.6).

2.4.2 Forçages des fleuves et des rivières

2.4.2.1 Forçage du Rhône

Les fichiers de données de forçage pour les RCP2.6 et 8.5 sont disponibles sur le site Copernicus C3S (Berg et al., 2021). Ils existent sous deux formats : les fichiers grillés et les fichiers par *Catchment* et *SubCatchment* (correspondant aux bassins et sous-bassins versants). Les premiers sont faciles à utiliser car il n'y a pas d'ambiguïté sur la maille de la grille pour l'embouchure du Rhône. Malheureusement, certaines

variables (température, nutriments) ne sont pas disponibles en données grillées. Ils ne peuvent donc être utilisés que pour les prévisions de débit du fleuve.

Les valeurs des forçages à appliquer sont données en changements relatifs ou absolus (*relative* ou *absolute change*) selon les cas :

- Les variables données en changement absolu sont recalculées à partir de la valeur historique (Encadré 2).
- Les variables données en changement relatif permettent de calculer la valeur future en appliquant un facteur correctif (Encadré 2).

Il est important de noter que les valeurs absolues peuvent être entachées d'erreur donc, lorsque le changement relatif est disponible, il a été préférentiellement utilisé en se basant comme référence sur les données moyennes mensuelles de MOOSE historiques disponibles. Dans cette étude, c'est le cas pour la température et les nutriments.

Encadré 2 : Calcul des changements absolu et relatif

Changement absolu (même unité que la variable) :

$$V_{abs} = FUTURE - HIST \quad (E2)$$

Avec HIST, la valeur historique calculée sur la période 1971 – 2000.

Changement relatif (%) :

$$V_r = \frac{(FUTURE - HIST)}{HIST} * 100 \quad (E3)$$

Exemple pour le changement relatif :

En prenant $V_r = -14.5\%$:

$$-14.5 = \frac{(FUTURE - HIST)}{HIST} * 100 \Leftrightarrow -0.145 = \frac{FUTURE}{HIST} - 1 \Leftrightarrow FUTURE = HIST * 0.8546$$

2.4.2.1.1 Débit du Rhône :

Pour obtenir le débit du Rhône à appliquer pour les projections décennales, ce sont les fichiers grillés (*gridded*) de résolution 5 km x 5 km qui sont utilisés, et le point correspondant à l'embouchure du Rhône sur la grille de 1000 x 950 est $i=280, j=302$ (python, nco) et $i=281 j=303$ (ferret).

Sont extraits à ce point, pour tous les fichiers de chaque année entre 2021 et 2050, les valeurs de débit moyen mensuel (valeur absolue à ajouter à la valeur historique moyenne calculée pour la période entre 1971-2000 du même mois).

Le problème de cette méthode de calcul, est que les extremums sont sous-estimés mais que globalement les forçages sont surestimés. Pour pallier la surestimation des débits minimums du Rhône à l'été, la valeur minimale du débit à l'été pour le Rhône à l'embouchure (*gridded*) est récupérée et utilisée (Tableau 3).

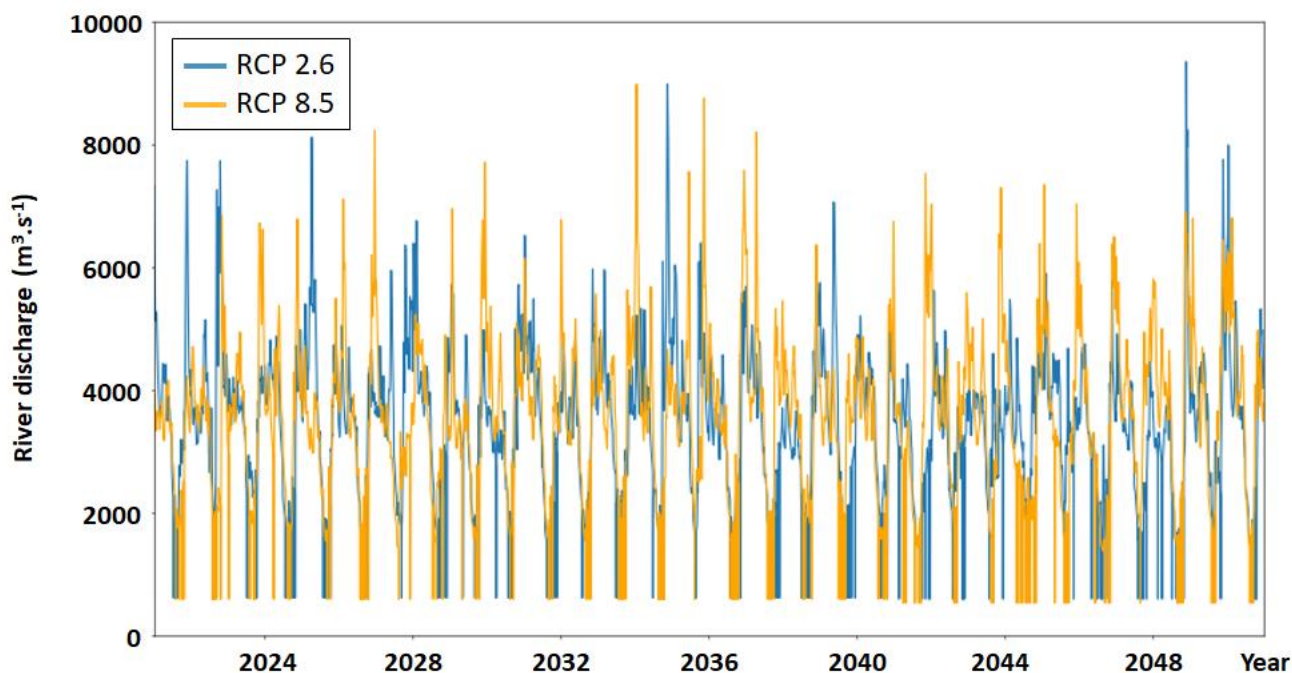


Figure 15 : Débit du Rhône appliqué au modèle RHOMA-CarbOx pour les prévisions décennales avec les scénarios RCP 2.6 (bleu) et RCP 8.5 (orange)

Cependant, les débits du Rhône utilisés en forçage restent surestimés pour les deux scénarios. Le RCP 2.6 est plus faible mais présente une variabilité plus importante (crues). Les forçages de débits du Rhône appliqués pour les prévisions décennales pour les RCP2.6 et 8.5 sont présentés sur la Figure 15.

Tableau 3 : Valeur minimale du débit à l'été pour le Rhône à l'embouchure (*gridded*) durant la période 2011 à 2070 pour les RCP 2.6 et RCP 8.5.

Période	Scénario	Débit min
2011-2040	RCP2.6	609.9
	RCP8.5	589.7
2041-2070	RCP2.6	593.5
	RCP8.5	526.5

2.4.2.1.2 Température du Rhône

La température du Rhône est disponible sur le site Copernicus C3S (Berg et al., 2021) modélisée grâce à une simulation d'ensemble par le modèle de Bassin versant HYPE, pour lequel le *catchment* 00 (moyenne et écart-type de tous les membres de la simulation d'ensemble) est sélectionné afin de n'utiliser qu'un seul jeu de forçage (noms de fichiers *E_HYPE_catch00-EUR11*).

Tableau 4 : Variation absolue mensuelle de la température en °C par rapport à la période historique de 1971-2010 (Absolute change from reference period)

Période	Scénario	Variation en °C au minimum (février)	Variation en °C au maximum (août)	Variation totale °C	½ Ecart °C	Moyenne	± °C	Min	Max
2007-2021	Historic	0	0	19	9.5	17	9.5	7.5	26.5
2011-2040	RCP2.6	+0.22 °C	+1.42 °C	+1.64°C	0.82	17.82	10.1	7.72	27.92
	RCP8.5	+0.74 °C	+2.4 °C	+3.14°C	1.57	18.57	10.33	8.24	28.9
2041-2070	RCP2.6	+0.5 °C	+3 °C	+3.5°C	1.75	18.75	10.75	8	29.5
	RCP8.5	+1.2 °C	+3.4 °C	+4.6°C	2.3	19.3	10.6	8.7	29.9

Pour la température, les valeurs relatives ne sont pas disponibles. Ce sont les valeurs par bassin versant (*catchment*) absolues par rapport à la période historique que vont être utilisées.

Ces valeurs vont permettre de savoir de combien de °C va augmenter dans les futurs scénarios RCP la courbe saisonnière de référence historique sinusoïdale ($17 \pm 9.5^\circ\text{C}$ utilisée dans les simulations historiques) pour les deux périodes : 2011-2040 et 2041-2070 distinguées sur Copernicus C3S (Tableau 4). Donc de 2021 à 2040, on trace la courbe saisonnière avec les valeurs de 2011-2040 et de 2040 à 2050 on trace la courbe saisonnière avec les valeurs de 2041-2070 pour chacun des RCP.

2.4.2.1.3 Nutriments du Rhône

Pour les nutriments, les valeurs relatives en % de variation locale (*local stream*) en azote total et en phosphore total par rapport à la période de référence historique 1970-2000. Ces variations en N (ou P) sont exprimées pour le scénario et la période future considérée en fonction de la période de référence 1970-2000. Les valeurs positives indiquent une augmentation de la moyenne annuelle de concentration molaire des nutriments, une valeur négative une diminution.

Pour les nutriments, le même point que pour la température a été considéré pour obtenir les variations relatives en azote et phosphore total à l'embouchure du Rhône.

L'indicateur est calculé selon l'équation E3 (Encadré 2). Les valeurs positives du % indiquent une augmentation de la concentration molaire des nutriments dans le futur et les valeurs négatives une diminution.

Le forçage appliqué dans les simulations est le changement relatif (Tableau 5) par rapport aux données de concentrations molaires mensuelles moyennes disponibles sur toute la période historique de Moose (à partir de 2005 ou 2007 selon les variables). Ces changements ont été appliqués en azote à NO_x (NO₂-NO₃) (Figure 16) et NH₄ (Figure 17), et en phosphore à PO₄ (Figure 18). Il n'y a pas eu de modification pour les autres variables afin de pouvoir analyser l'impact spécifique des modifications en nutriments du Rhône.

Tableau 5 : Pourcentage de variation locale pour l'embouchure du Rhône en azote et en phosphore total. Les augmentations sont indiquées en rouge et les diminutions en bleu.

Période	Scénario	% N Local (/1970-2000)	N factor	% P local (/1970-2000)	P factor
2011-2040	RCP2.6	-12.19	0.8781	-15.05	0.8495
	RCP8.5	+0.4446	1.004446	-7.168	0.92832
2041-2070	RCP2.6	-4.742	0.95258	-10.31	0.8969
	RCP8.5	+17.1	1.171	+4.801	1.04801

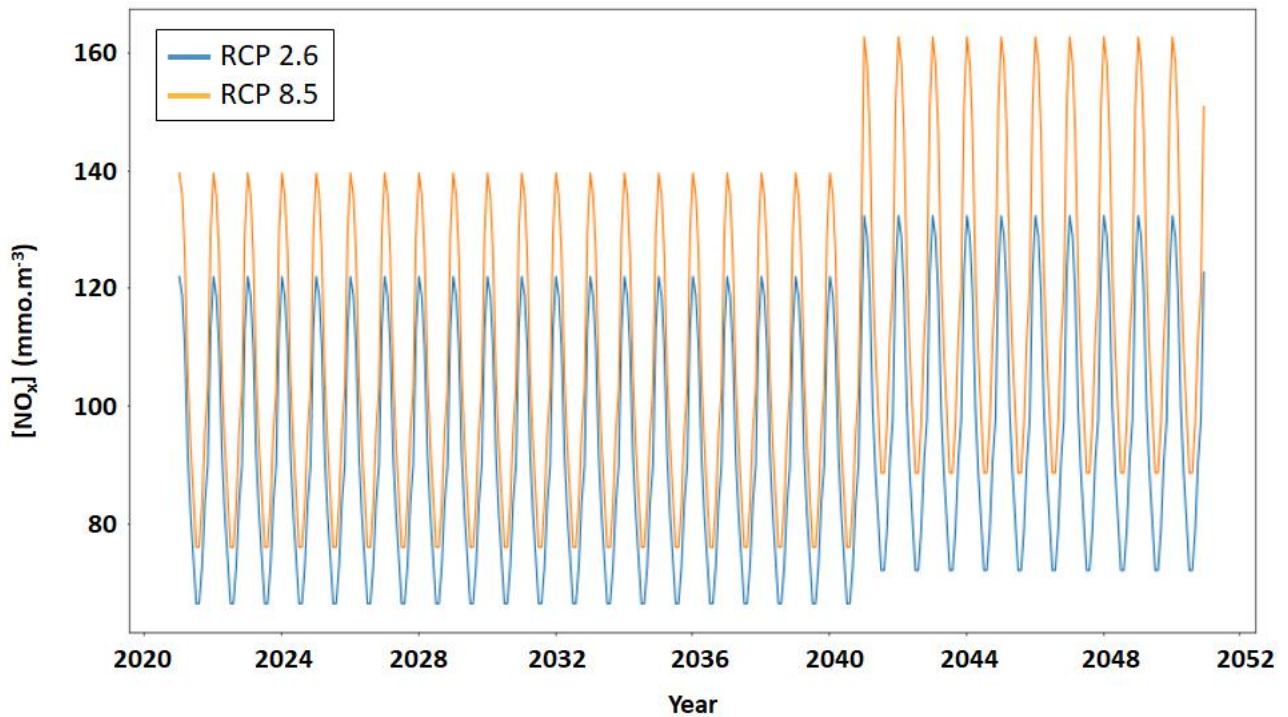


Figure 16 : Concentration en mmol.m^{-3} en NO_x (NO_2 - NO_3) rejetée par le Rhône lors des prévisions décennales 2021-2050 selon le scénario RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (orange)

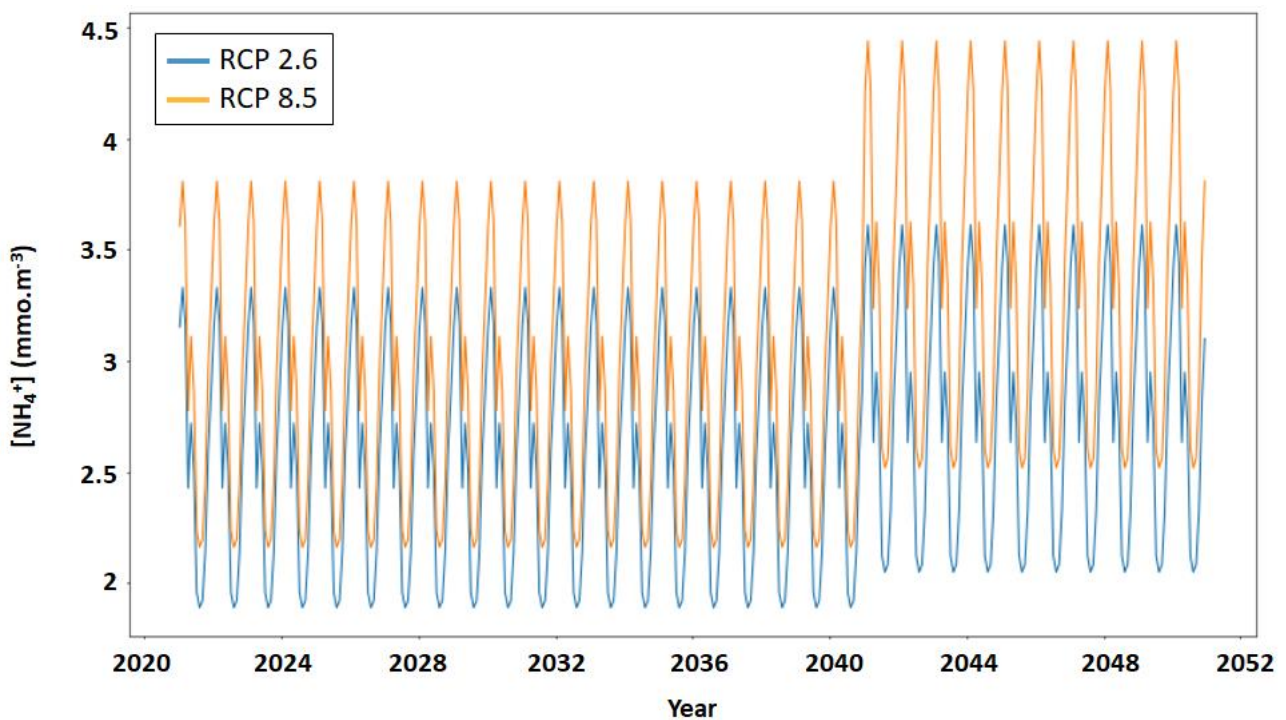


Figure 17 : Concentration en mmol.m^{-3} en NH_4 rejetée par le Rhône lors des prévisions décennales 2021-2050 selon le scénario RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (orange)

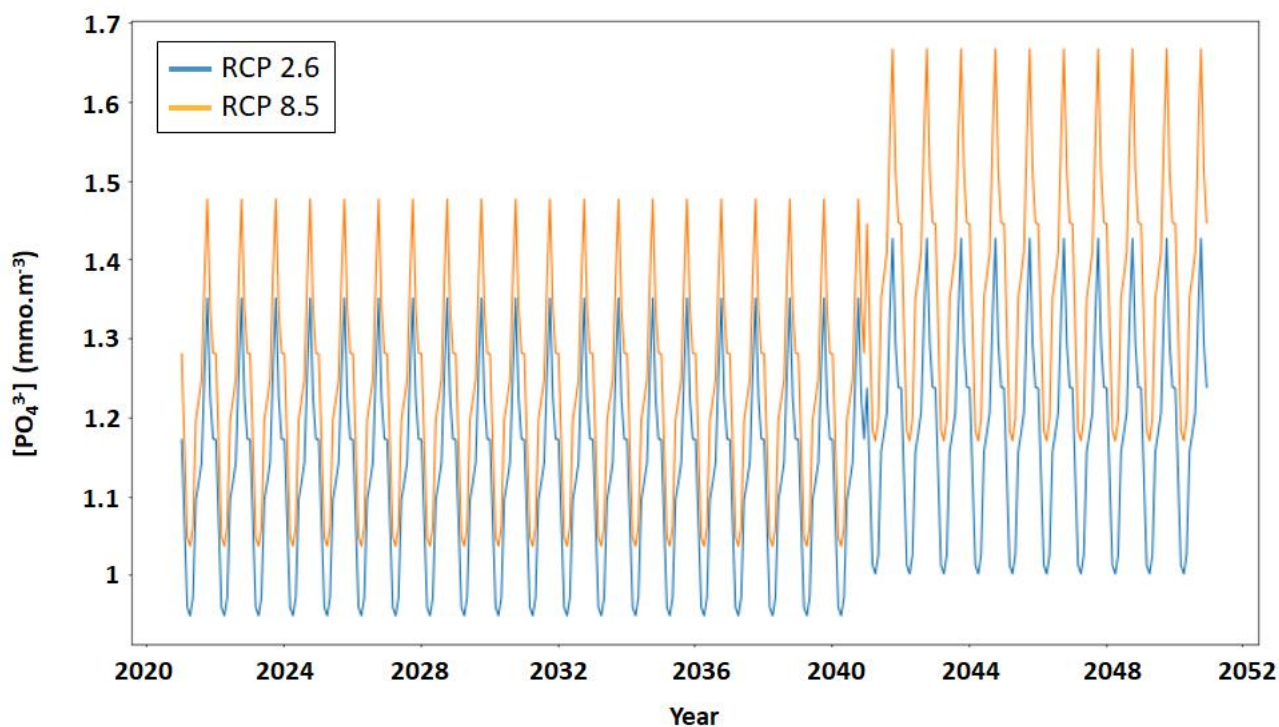


Figure 18 : Concentration en mmol.m^{-3} en PO_4 rejetée par le Rhône lors des prévisions décennales 2021-2050 selon le scénario RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (orange)

3 Résultats

3.1 Reproduction des processus connus dans la baie de Marseille

3.1.1 Upwelling

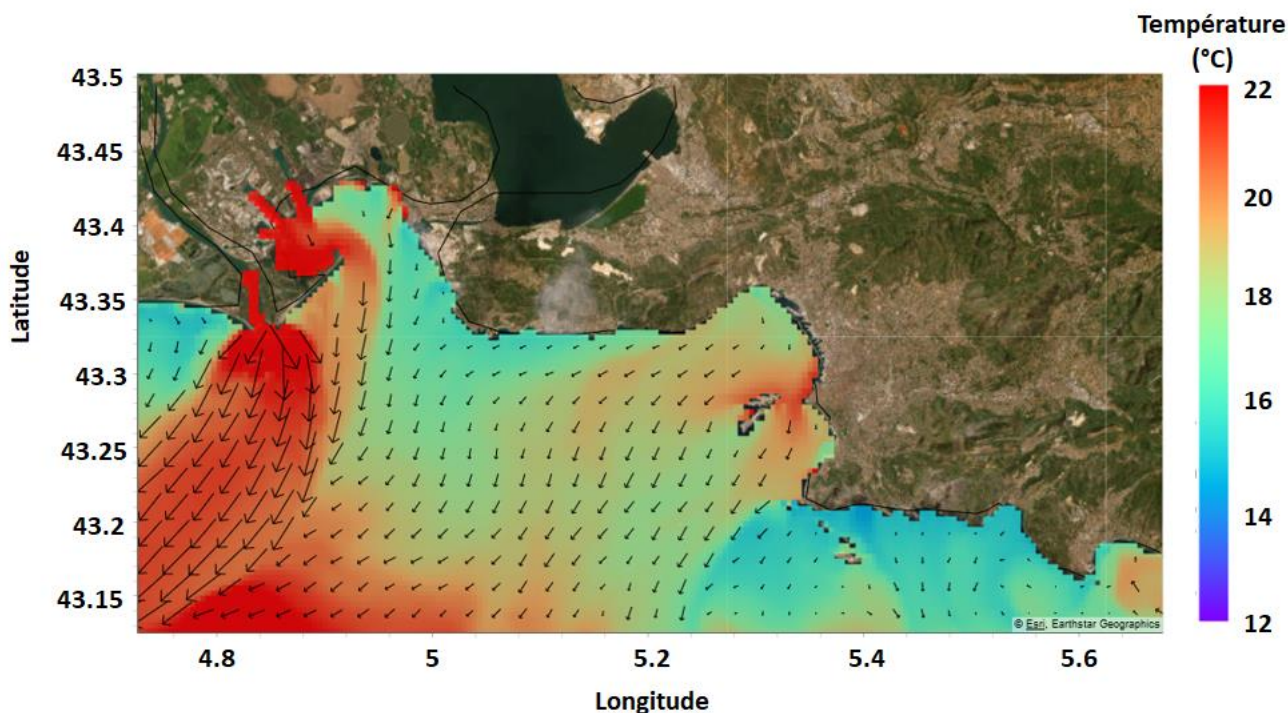


Figure 19 : Température de surface ($^{\circ}\text{C}$) simulée pour le 21 juillet 2047 scénario RCP 8.5 indiquant la présence d'upwelling à la côte ($T < 16^{\circ}\text{C}$)

La Figure 19 permet de voir l'impact du Mistral simulé en 2047 sur le panache du Rhône qui présente sa forme spécifique, celle d'une virgule, dans ces conditions de Mistral, et des upwellings (remonté d'eau du fond plus froide $< 16^{\circ}\text{C}$) dans les Calanques, à Beauduc et dans une moindre mesure sur la côte Bleue.

3.1.2 Intrusion des eaux diluées du Rhône

La Figure 20 illustre une intrusion du Rhône simulée le 23 février 2047. Même si ces intrusions sont moins fréquentes au cours des années, surtout dans le cas du RCP 8.5, elles persistent tout de même. Il semble que le « type » d'intrusion, d'après la nomenclature de Fraysse et al. (2014), serait plutôt « Small » alors que lors de la période historique, ce type d'intrusion a plutôt lieu en période estivale, du moins, en période stratifiée.

3.1.3 Marseille Eddy

La Figure 21 montre le pH de surface simulée pour le 16 juin 2047 et indique la présence du Marseille Eddy qui présente un pH plus faible dû à l'hétérotrophie de ce tourbillon anticyclonique qui concentre la

matière organique et inorganique en son centre (Barré, 2020 ; Pinazo et al., 2022). A noter que le pH du Rhône, comme à l'heure actuelle, est le plus faible.

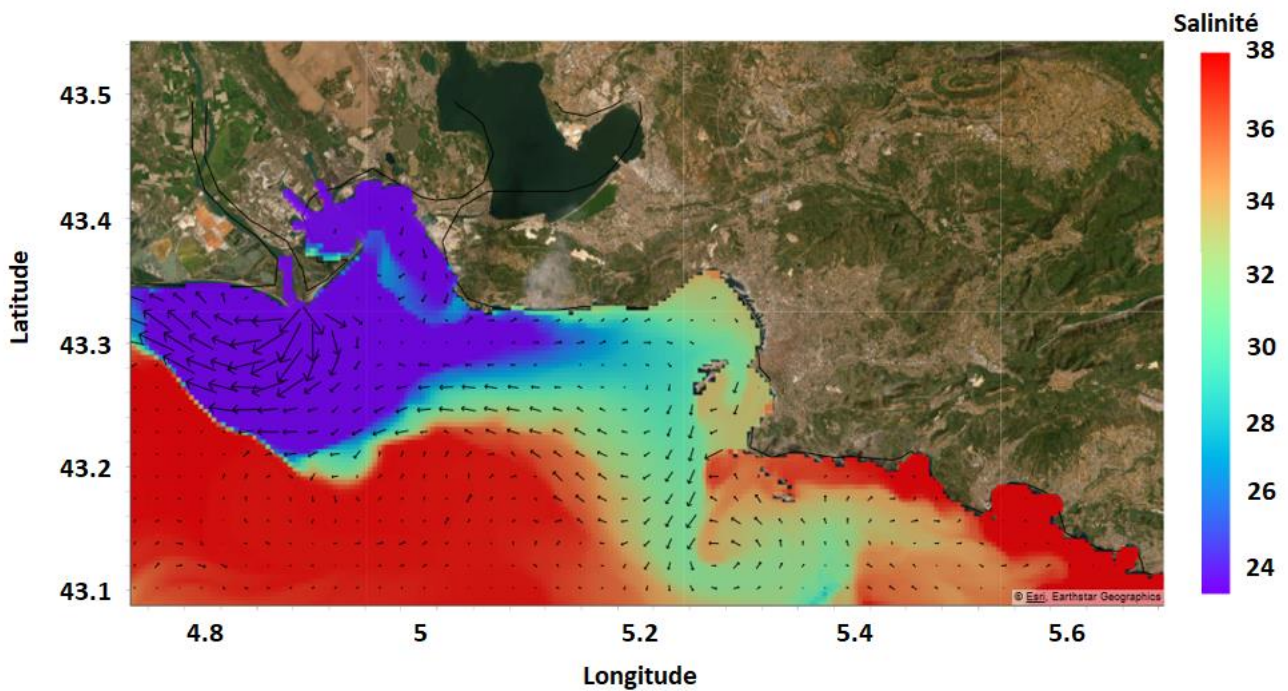


Figure 20 : Salinité de surface (PSU) simulée pour le 23 février 2047 scénario RCP 8.5 indiquant le déplacement du panache du Rhône vers la baie pendant un évènement d'intrusion du Rhône ($S < 37.8$)

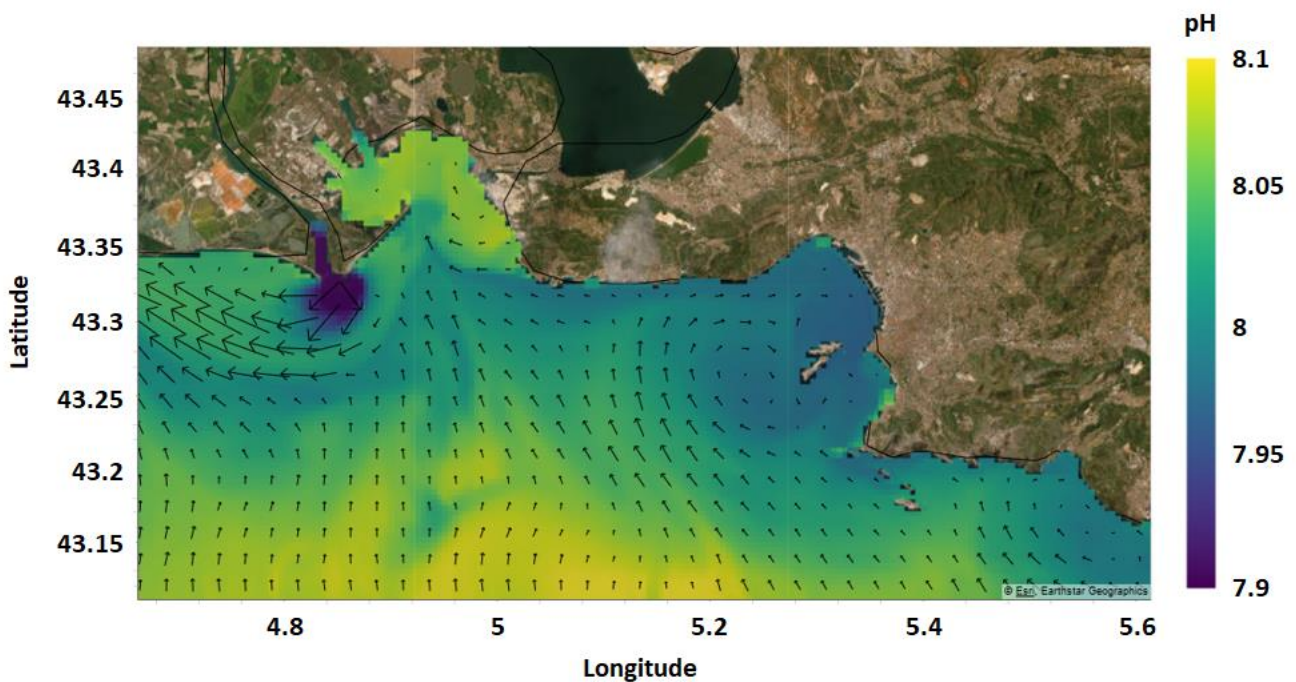


Figure 21 : pH de surface simulé pour le 16 juin 2047 scénario RCP 8.5 indiquant la présence du Marseille Eddy à l'ouest des îles du Frioul

3.2 Prévisions décennales de 2021 à 2050

Dans la suite, les résultats des simulations décennales de trente ans de 2021 à 2050 sont présentés sous forme de diagrammes boxplot (ou boîte à moustaches) qui permettent de présenter en même temps que les résultats, les statistiques de base (Encadré 3). Les diagrammes boxplot sont présentés pour tout le domaine et à la station SOLEMIO.

Dans cette partie, les tendances et variations sont également présentées pour toutes les variables d'intérêt (Tableau 6 à Tableau 9). Leur calcul est détaillé dans l'encadré 3.

Encadré 3 : Représentation des résultats

Variables statistiques représentées sur le diagramme boxplot :

(i) La médiane : ligne intérieure rouge ; (ii) les quartiles supérieurs et inférieurs : sommet et bas de la boîte respectivement ; (iii) l'étendue interquartile : longueur de la boîte ; (iv) les outliers (valeurs extrêmes) : cercles.

Les moustaches s'étendent à partir de la boîte jusqu'aux points extrêmes qui ne sont pas considérés comme des valeurs aberrantes. Par défaut, elles s'étendent à 1,5 fois l'IQR à partir des bords de la boîte sauf si cette valeur dépasse la valeur minimum ou la valeur maximum (dans ce cas l'extrémité de la moustache prend la valeur minimum ou maximum).

Calcul des tendances (TEND) :

Les tendances des variables sont évaluées à l'aide de l'estimateur de Theil-Sen (Sen, 1968), une méthode non paramétrique basée sur la pente médiane. Cette dernière étant moins sensible aux valeurs aberrantes que les méthodes de régression traditionnelles, elle permet une évaluation plus fiable de la tendance.

Calcul des variations relatives (VAR%) :

Les variations relatives sont exprimées en pourcentage et calculées à partir de la tendance de la variable selon la formulation suivante :

$$VAR_{\%} = \frac{TEND * 30}{MEAN_{2021}} * 100$$

Où $MEAN_{2021}$ représente la valeur moyenne de la variable pour l'année 2021 calculée pour toutes les simulations disponibles cette année-là (historiques et de projections), ainsi que les valeurs mesurées au point SOLEMIO lorsque celles-ci sont disponibles.

3.2.1 Variables hydrodynamiques

3.2.1.1 Coefficient de mélange vertical (Kz)

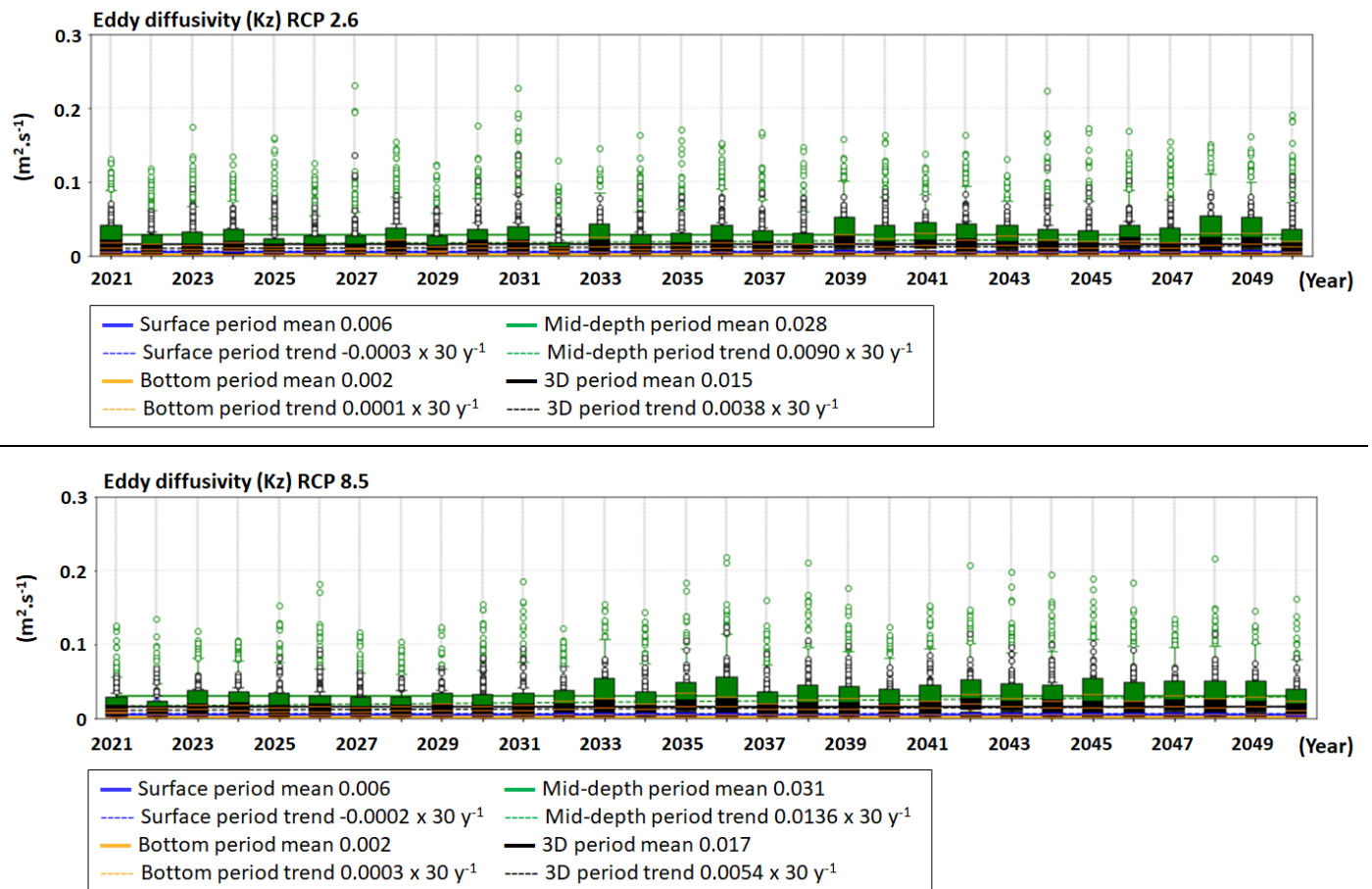


Figure 22 : Evolutions temporelles décennales de la diffusion turbulente (mélange, Kz) ($m^2 \cdot s^{-1}$) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

Le coefficient de mélange vertical des traceurs (composés présents dans l'eau) Kz est un peu plus fort sur l'ensemble du domaine pour le RCP 8.5 (Figure 22) qui présente une intensité moyenne du vent plus forte également (Figure 11). Il est plus fort au sein de la colonne d'eau, profondeur qui correspond souvent à la couche de mélange. Ce mélange turbulent, qui peut être dû à l'ensemble des processus hydrodynamiques de la zone, est le plus faible à proximité du fond qui est considéré comme une paroi. La surface peut être très dynamique lorsqu'il y a du vent, ou complètement stratifiée l'été en absence de vent.

Des résultats différents sont observés au point SOLEMIO (Figure 23), avec une dynamique turbulente un peu plus faible que sur l'ensemble du domaine, surtout pour le RCP 8.5 qui correspond à une intensité du vent plus faible (Figure 12).

Le mélange turbulent au sein de la colonne d'eau (couche de mélange) augmente sur l'ensemble du domaine, principalement à mi-profondeur et au fond (Figure 22). Cette tendance globale à l'augmentation est encore plus forte pour le RCP 8.5 en lien avec une intensité de vent plus forte et à l'augmentation pour ce

scénario (Figure 11). Le mélange diminue légèrement en surface en rapport avec la tendance à la diminution du vent en surface, alors la stratification thermique et/ou haline domine.

Au contraire au point SOLEMIO, globalement une très légère diminution du mélange est observée, principalement en surface pour le RCP 2.6 et pour le RCP 8.5 cette tendance est encore plus faible, avec un mélange relativement stable au cours des 30 ans (Figure 23).

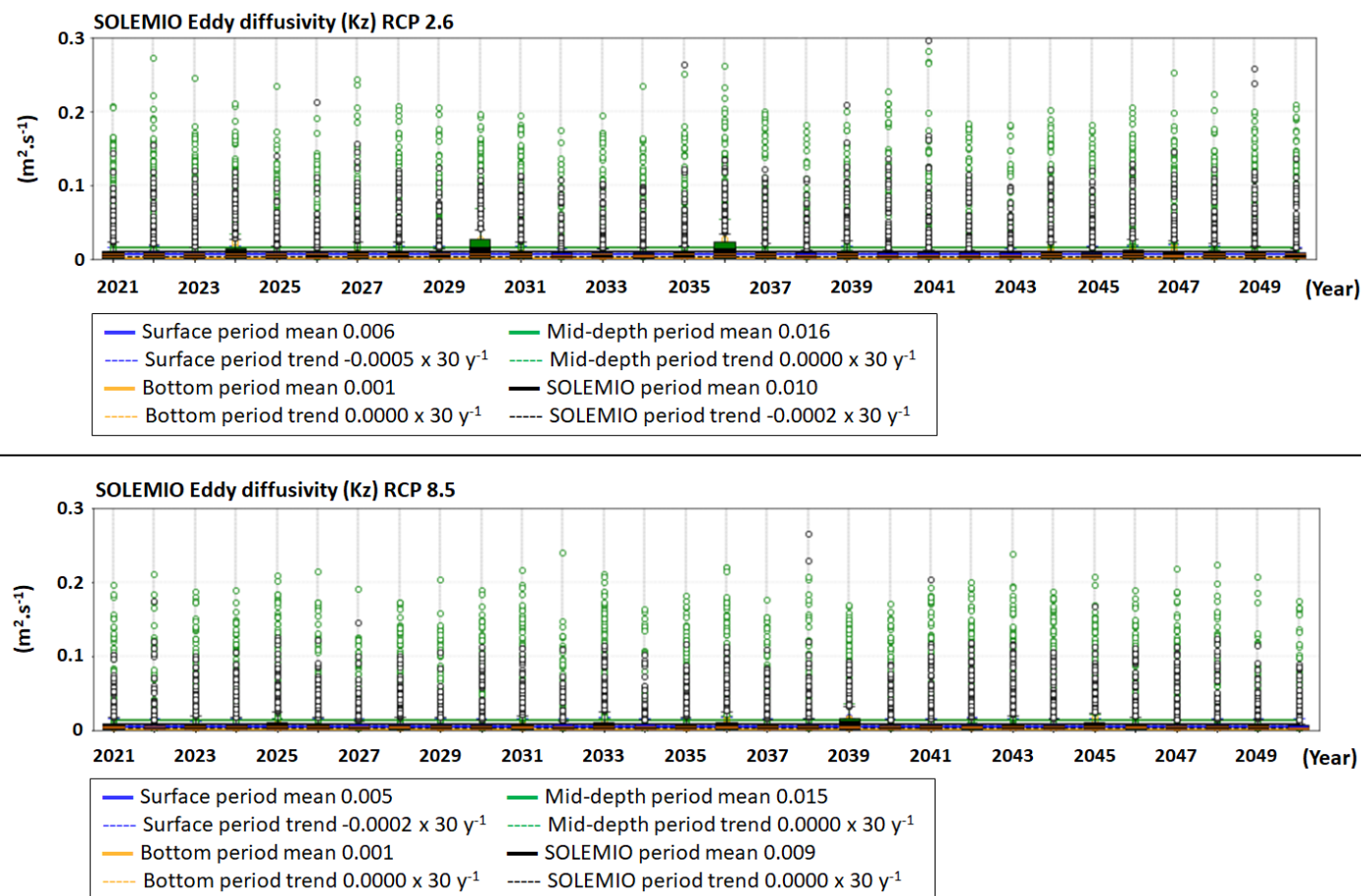


Figure 23 : Evolutions temporelles décennales de la diffusion turbulente (mélange, Kz) ($m^2 \cdot s^{-1}$) au point SOLEMIO en (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.1.2 Température

La Figure 24 montre les prévisions décennales de l'évolution temporelle de la température sur tout le domaine modélisé, et la Figure 25 au point SOLEMIO.

Les températures sont plus élevées dans le scénario pessimiste RCP 8.5 et plus particulièrement en surface (en bleu) qui est à la fois impactée par le flux radiatif plus important correspondant à ce scénario, mais également par la température du Rhône qui est plus élevée (Figure 24).

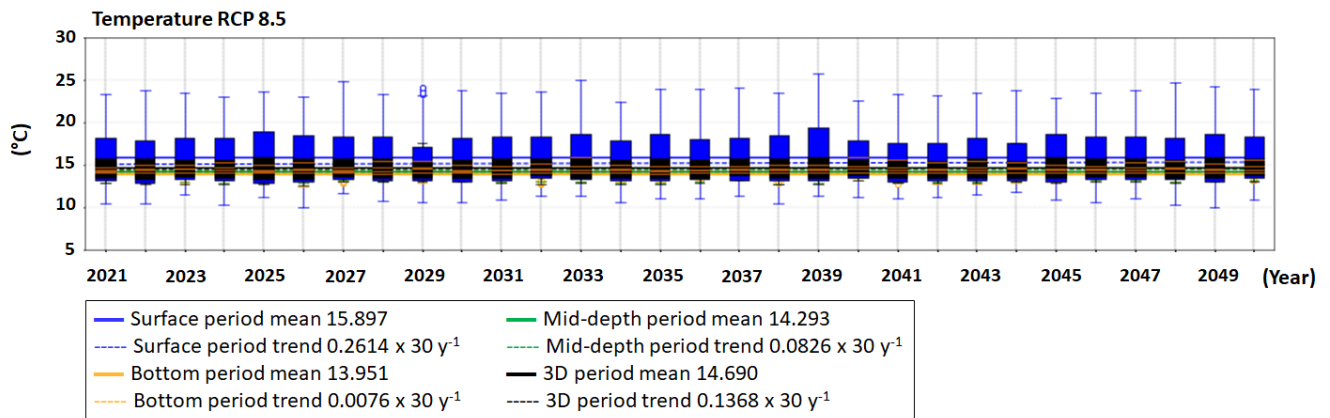
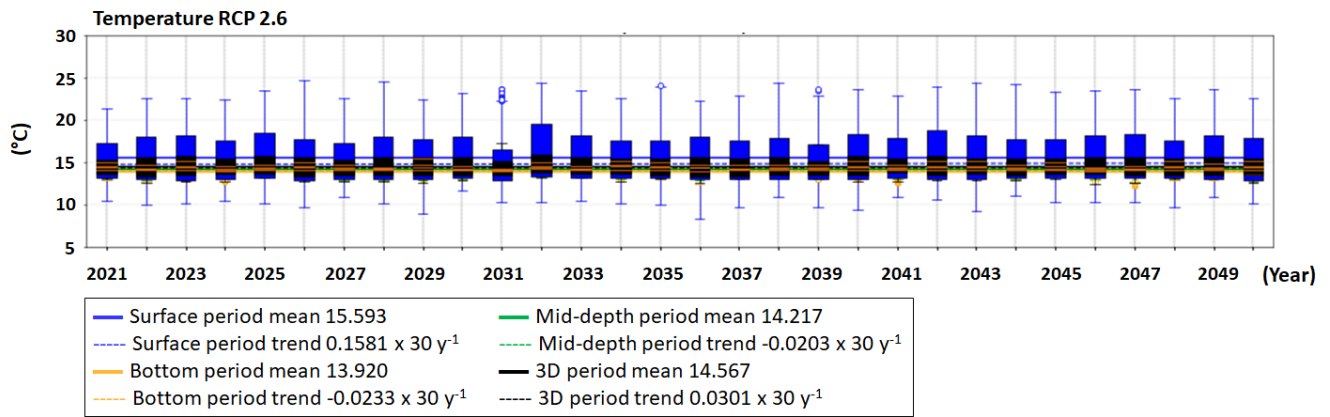


Figure 24 : Evolutions temporelles décennales de la température de l'eau (°C) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

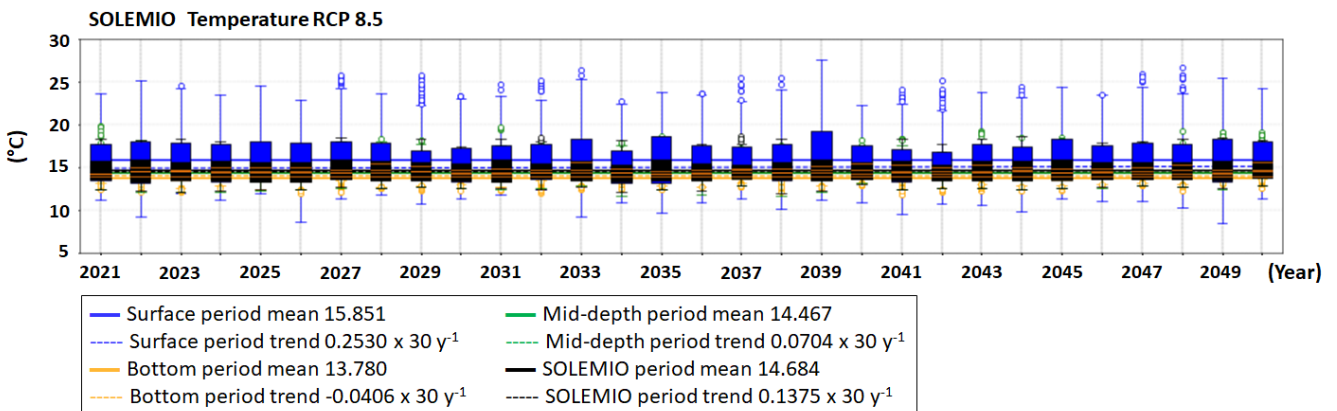
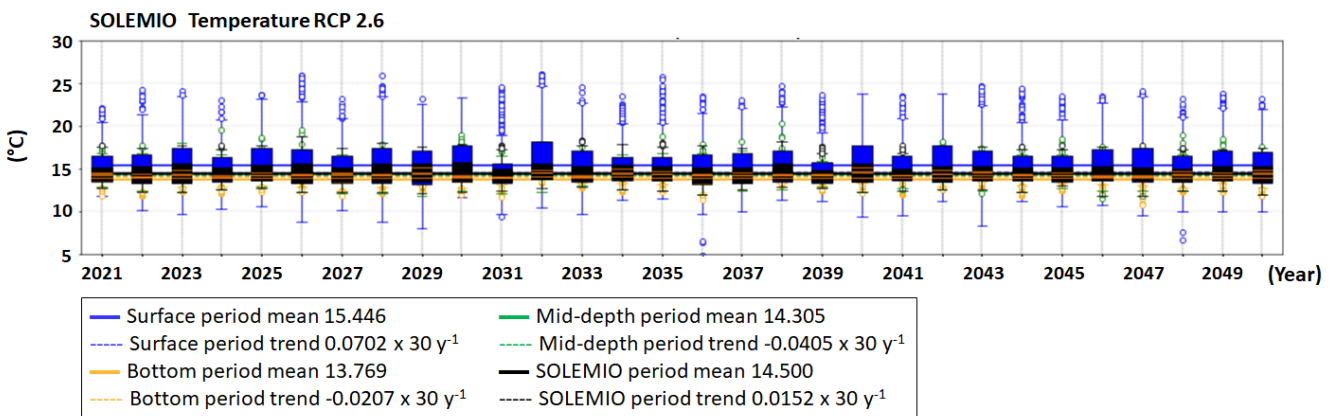


Figure 25 : Evolutions temporelles décennales de la température de l'eau (° C) au point SOLEMIO en (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

La mi-profondeur est impactée dans une moindre mesure du fait des processus hydrodynamiques qui peuvent conduire à des transferts de chaleur vers le milieu de la colonne d'eau. La couche du fond est très peu impactée par l'augmentation en surface et peut être même influencée par de l'eau froide remontant de plus profond lors d'épisodes d'upwelling. Les mêmes tendances se retrouvent au point SOLEMIO (Figure 25), cependant, étant plus éloigné de l'embouchure du Rhône et particulièrement impacté par les upwellings, le réchauffement est modéré (Figure 25).

Il est à noter une tendance à l'augmentation globalement faible de la température de surface de l'ensemble du domaine pour le scénario RCP 2.6 de $0.005 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$ (Tableau 6 et Figure 24 haut). Pour le RCP 8.5 cette augmentation est plus importante (Figure 24 bas). Les mêmes tendances sont observées au point SOLEMIO pour les deux scénarios, avec une diminution au fond liée aux processus d'upwelling bien présents à ce point (Figure 25).

3.2.1.3 Salinité

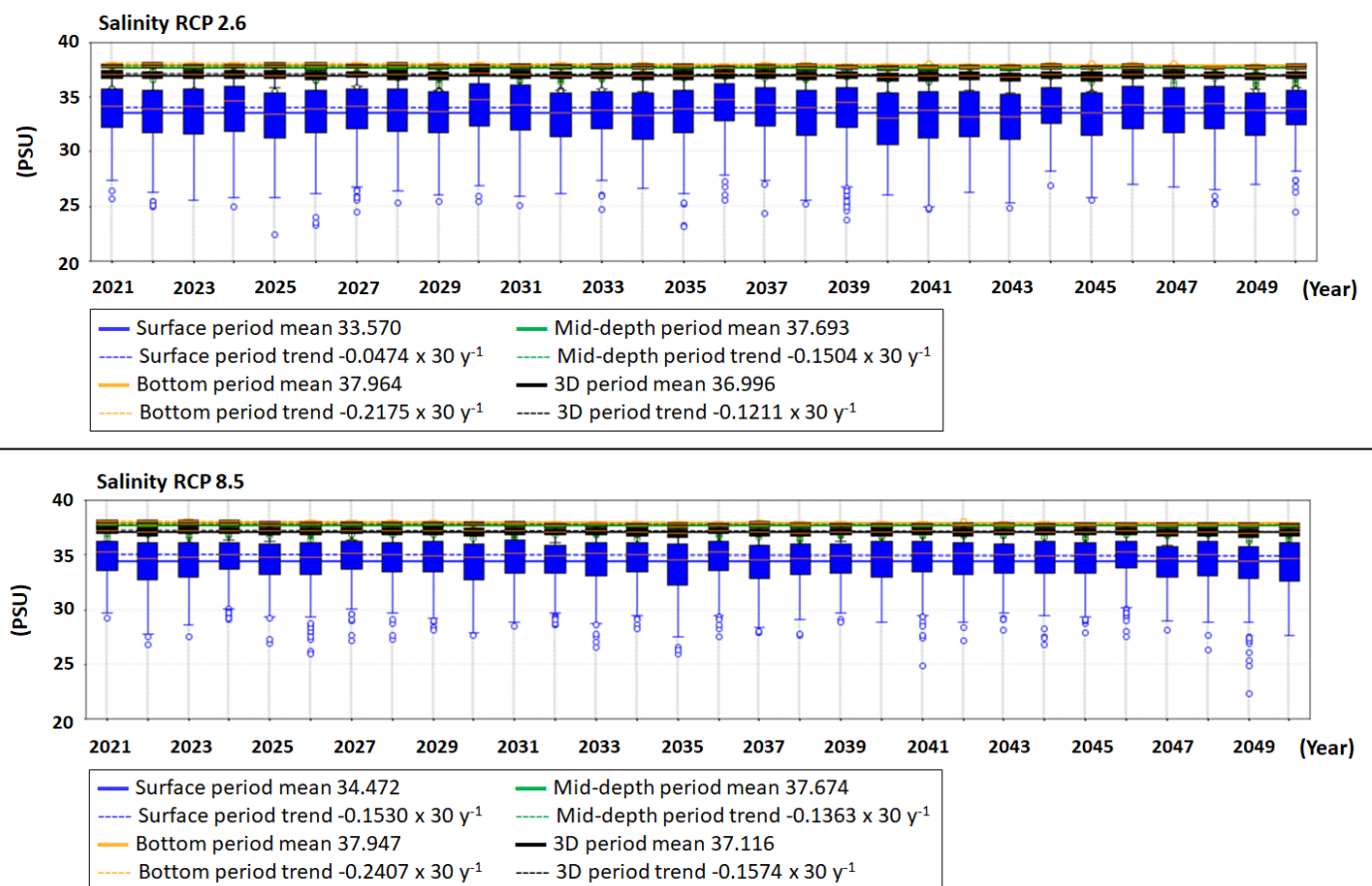


Figure 26 : Evolutions temporelles décennales de la salinité de l'eau (PSU) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

Sur l'ensemble du domaine modélisé, la salinité est plus forte pour le scénario RCP 8.5 qui présente en forçage selon les projections *Copernicus* C3S (2021), des débits moindres du Rhône que pour le scénario RCP 2.6 (Figure 15) ainsi que des pluies moins importantes (Figure 13). Cette différence de salinité est d'ailleurs principalement située en surface (Figure 26) car du fait de la stratification (haline et thermique dans les scénarios futurs), l'eau du panache impacte peu les couches situées plus en profondeur. La Figure 27 montre une salinité peu différente selon les deux scénarios au point SOLEMIO plus éloigné de l'embouchure du Rhône, sauf en surface où une dessalure peu apparaît lors d'intrusion d'eau dessalée provenant du Rhône jusque dans la baie de Marseille (Fraysse et al., 2014).

Par ailleurs, pour les deux scénarios, la variation de salinité reste faible (< 1%) et correspond principalement à une légère dessalure induite par les apports d'eau douce des cours d'eau et des pluies (Tableau 6). Il est à noter que les débits du Rhône en forçage sont surestimés et que la compensation de cette dessalure par des processus hydrodynamiques pouvant amener du sel (upwelling, intrusions du Courant Nord) est peut-être également sous-estimée dans le modèle.

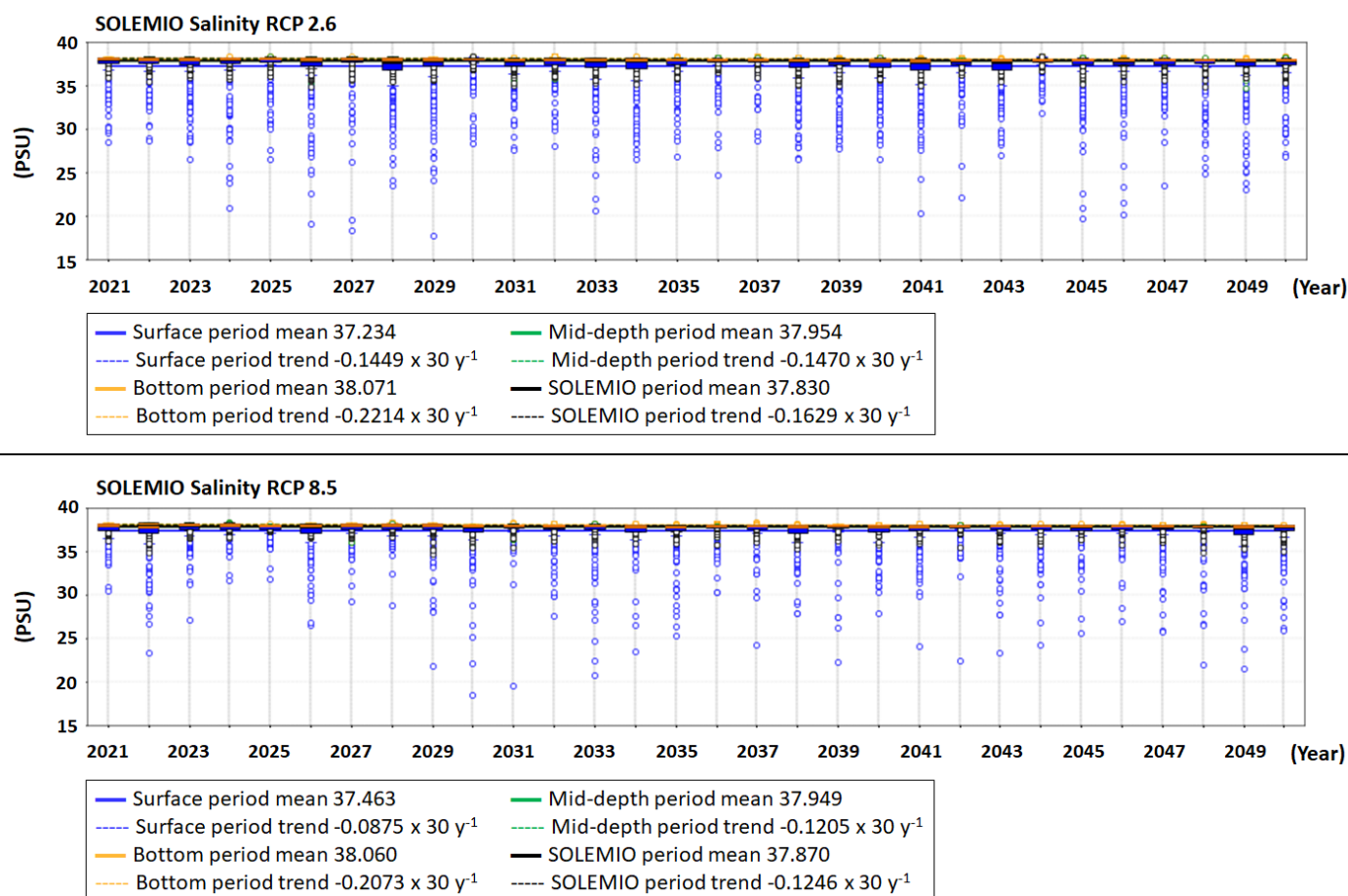


Figure 27 : Evolutions temporelles décennales de la salinité de l'eau (PSU) au point SOLEMIO en (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.2 Variables biogéochimiques

3.2.2.1 Oxygène

En raison de la plus faible solubilité de l'oxygène dans les eaux plus chaudes, il y a moins d'oxygène dissous dans l'ensemble du domaine (Figure 28) dans le scénario pessimiste RCP 8.5, et dans une moindre mesure au point SOLEMIO (Figure 29). Cependant, nous pouvons noter une bonne oxygénation en surface pour l'ensemble du domaine sans doute dû à l'aération avec l'atmosphère. Au fond, du fait d'une moindre productivité (et moins de mélange avec les couches de surface), les valeurs sont les plus faibles. C'est à la mi-profondeur, qui correspond souvent au maximum de chlorophylle profond, que de fortes valeurs sont observées.

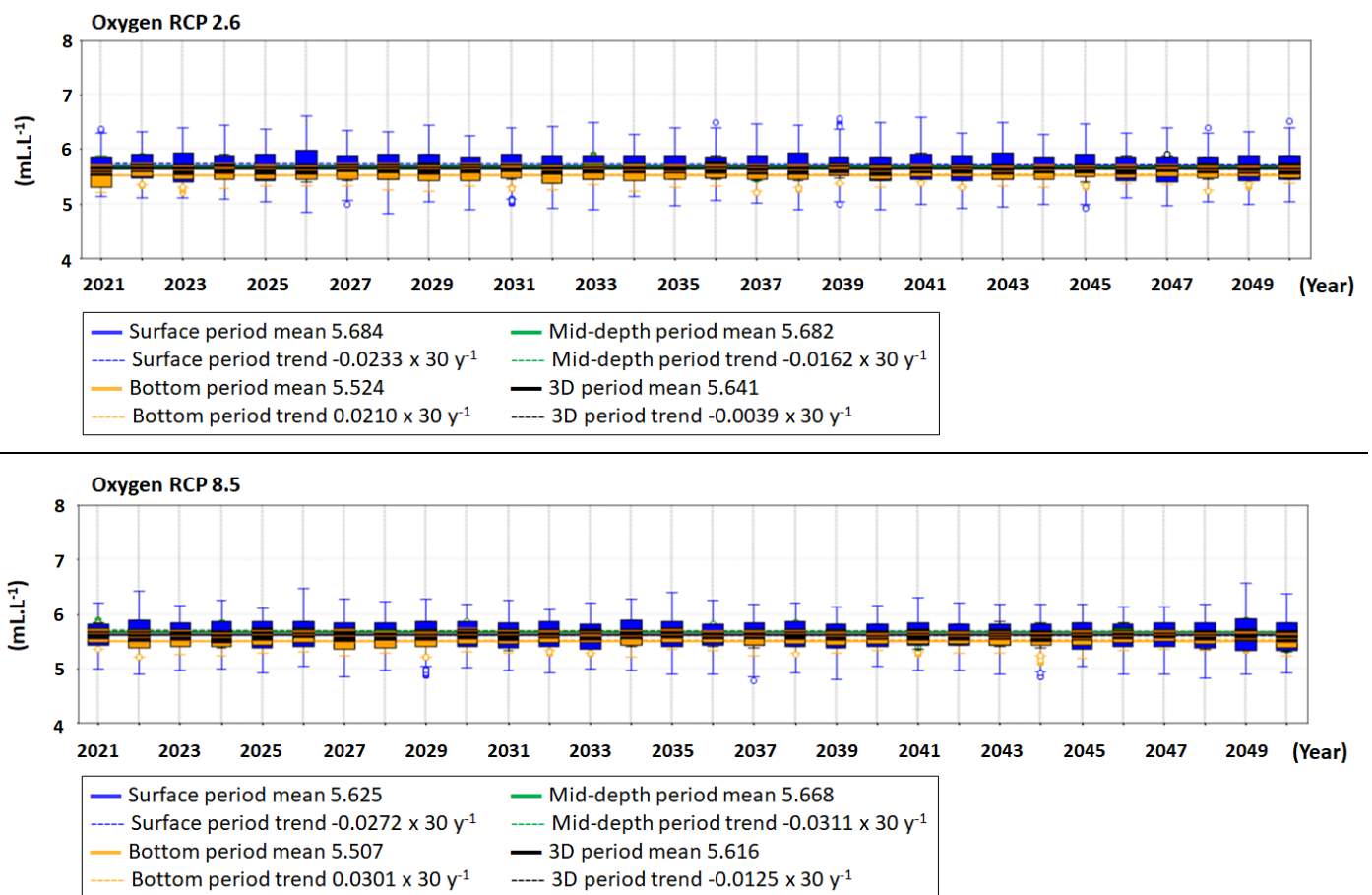


Figure 28 : Evolutions temporelles décennales de la concentration d'oxygène dissous dans l'eau (mL.L⁻¹) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

Au point SOLEMIO (Figure 29), qui a une profondeur maximum de 56 m, toute la colonne d'eau est dans la couche euphotique (éclairée) et donc la production primaire induit une plus forte concentration d'oxygène que pour l'ensemble du domaine. Cependant, l'intensité du vent en surface étant moindre pour le RCP 8.5 (Figure 12), l'aération de la couche de surface est moindre que pour l'ensemble du domaine.

L'évolution de l'oxygène dissous dans l'eau de mer montre qu'il y a une diminution au cours de la période décennale modélisée pour les deux scénarios pour l'ensemble du domaine excepté au fond. Au point SOLEMIO, toutes les tendances sont à la diminution (Tableau 7).

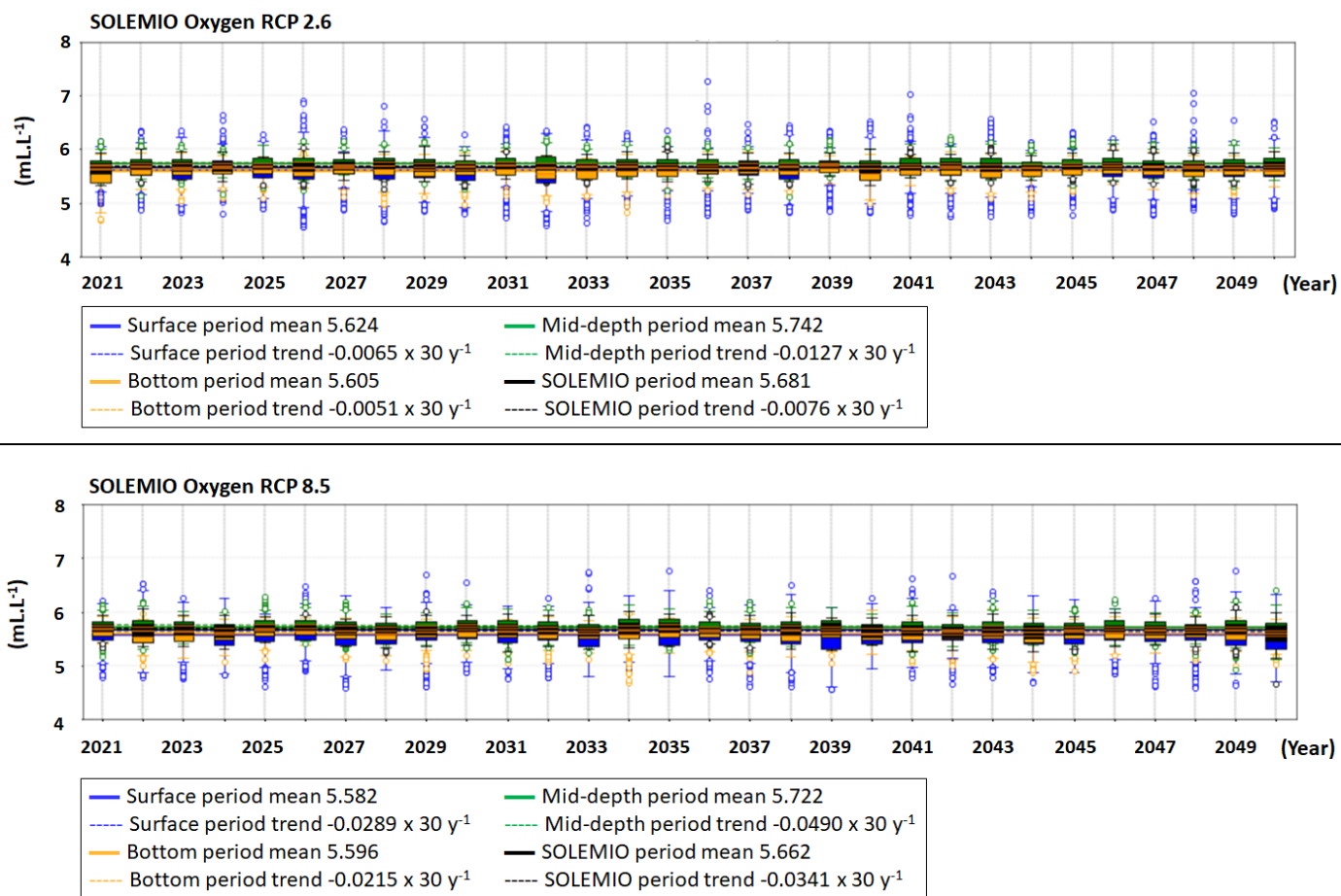


Figure 29 : Evolutions temporelles décennales de la concentration d'oxygène dissous dans l'eau (mL.L^{-1}) au point SOLEMIO en (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.2.2 Nutriments

Dans cette partie, seuls les diagrammes boxplot pour l'ensemble du domaine (incluant les apports de nutriments du Rhône) sont présentés. Les résultats à SOLEMIO (éloigné de l'embouchure du Rhône) sont très similaires. Les seules différences notables sont :

- Les valeurs ont tendance à être plus faibles (toujours très proches de la limite de détection sauf pour la surface) du fait de l'influence du Rhône, moins marquée mais toujours visible (nombreux événements extrêmes) à la station,
- Les tendances au fond obtenues à SOLEMIO sont généralement opposées à celles obtenues sur l'ensemble du domaine, sauf pour l'ammonium et le nitrate dans le cas du scénario RCP 8.5 (Tableau 7),

Outre ces différences, les mêmes observations peuvent s'appliquer. Tous les diagrammes boxplot réalisés pour la station SOLEMIO sont disponibles en informations supplémentaires sur ZENODO (Barré et al., 2024b S.I.)

Pour l'ensemble du domaine, les valeurs moyennes d'ammonium sont plus fortes pour le RCP 8.5 indiquant une plus forte production régénérée, principalement en surface, du fait des apports des fleuves et au fond du fait du néphéloïde benthique et des apports par le sédiment. A mi-profondeur où se trouve une grande partie de l'année le maximum de chlorophylle, les concentrations sont moins fortes s'approchant de la limite de détection (0.05 mmol m^{-3} (Aminot & Kerouel. 2007)) (Figure 30 et Tableau 7). Il est à noter que ces concentrations de nutriments sont plus faibles (sauf peut-être en surface) que les concentrations historiques mesurées à SOLEMIO car les forçages du Rhône prescrivent une diminution des apports en azote et en phosphore pour le RCP 2.6, et une augmentation pour le scénario RCP 8.5 sauf pour le phosphore (Tableau 5).

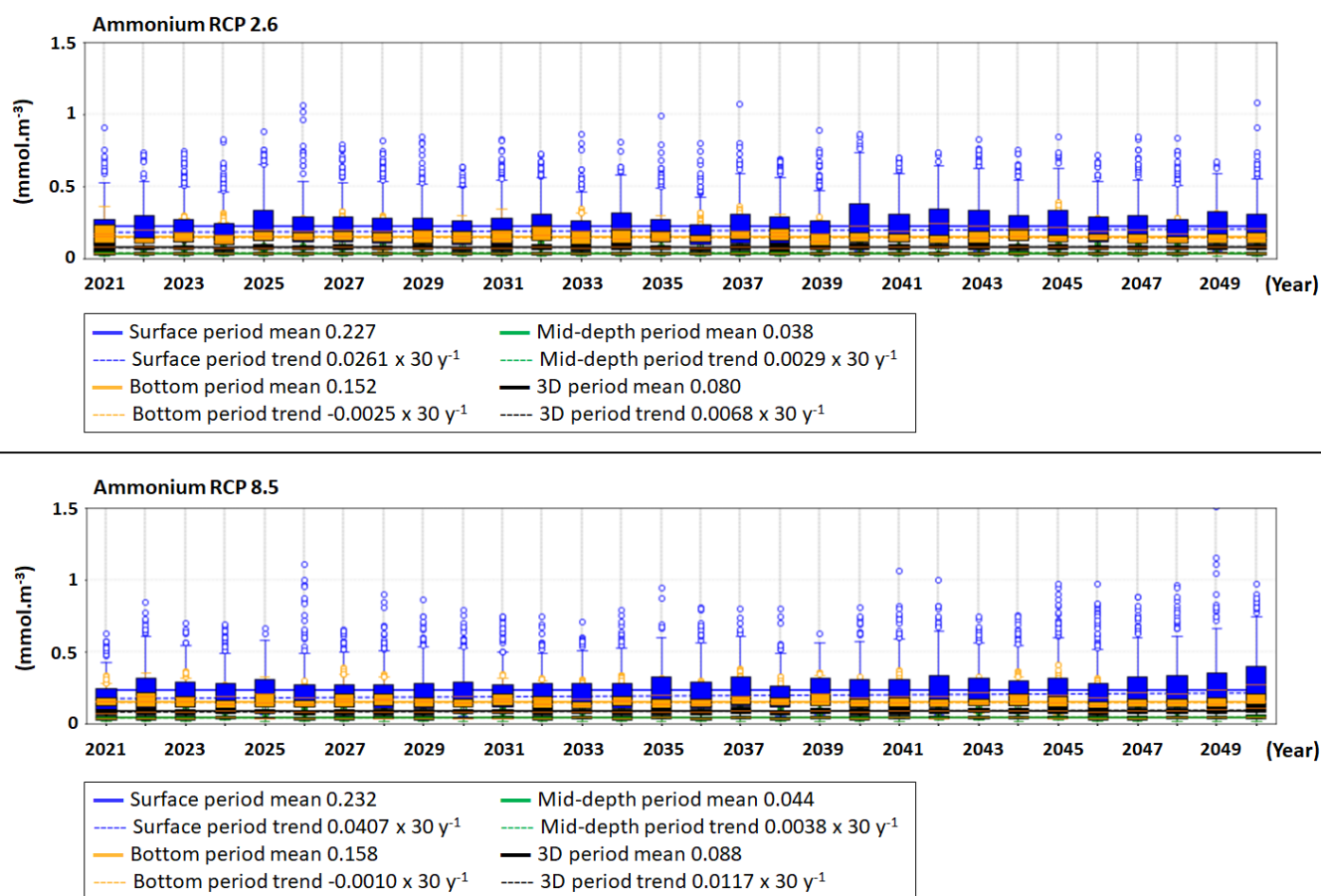


Figure 30 : Evolutions temporelles décennales de la concentration d'ammonium dans l'eau (mmol.m^{-3}) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

Cependant la tendance est à l'augmentation pour l'ensemble du domaine, ce qui correspond à l'augmentation des concentrations d'ammonium rejetées par le Rhône d'après les forçages après 2041 (Figure 17). Au fond, la tendance est à la diminution car la baisse des apports du Rhône va être plus sensible en

profondeur du domaine et c'est également au fond que la chlorophylle totale est plus abondante dans les deux scénarios (Figure 30).

Contrairement à l'ammonium, la concentration de nitrate dans l'ensemble du domaine est plus faible pour le RCP 8.5 que pour le RCP 2.6 (Figure 31), sans doute plutôt du fait qu'il y a moins d'oxygène globalement dans ce scénario, puisque les apports en azote du Rhône sont diminués de la même proportion pour la forme ammonium que pour la forme nitrate. Pour les deux scénarios, les concentrations les plus fortes se trouvent en surface, liées aux apports des fleuves avec de nombreux événements extrêmes qui sont liés aux crues annuelles.

La tendance est à l'augmentation en lien avec l'augmentation des concentrations prescrites pour le Rhône après 2041, sauf au fond pour l'ensemble du domaine avec le RCP 2.6 qui a les apports en azote les plus faibles (Figure 16) et une concentration d'oxygène au fond également faible (Figure 28).

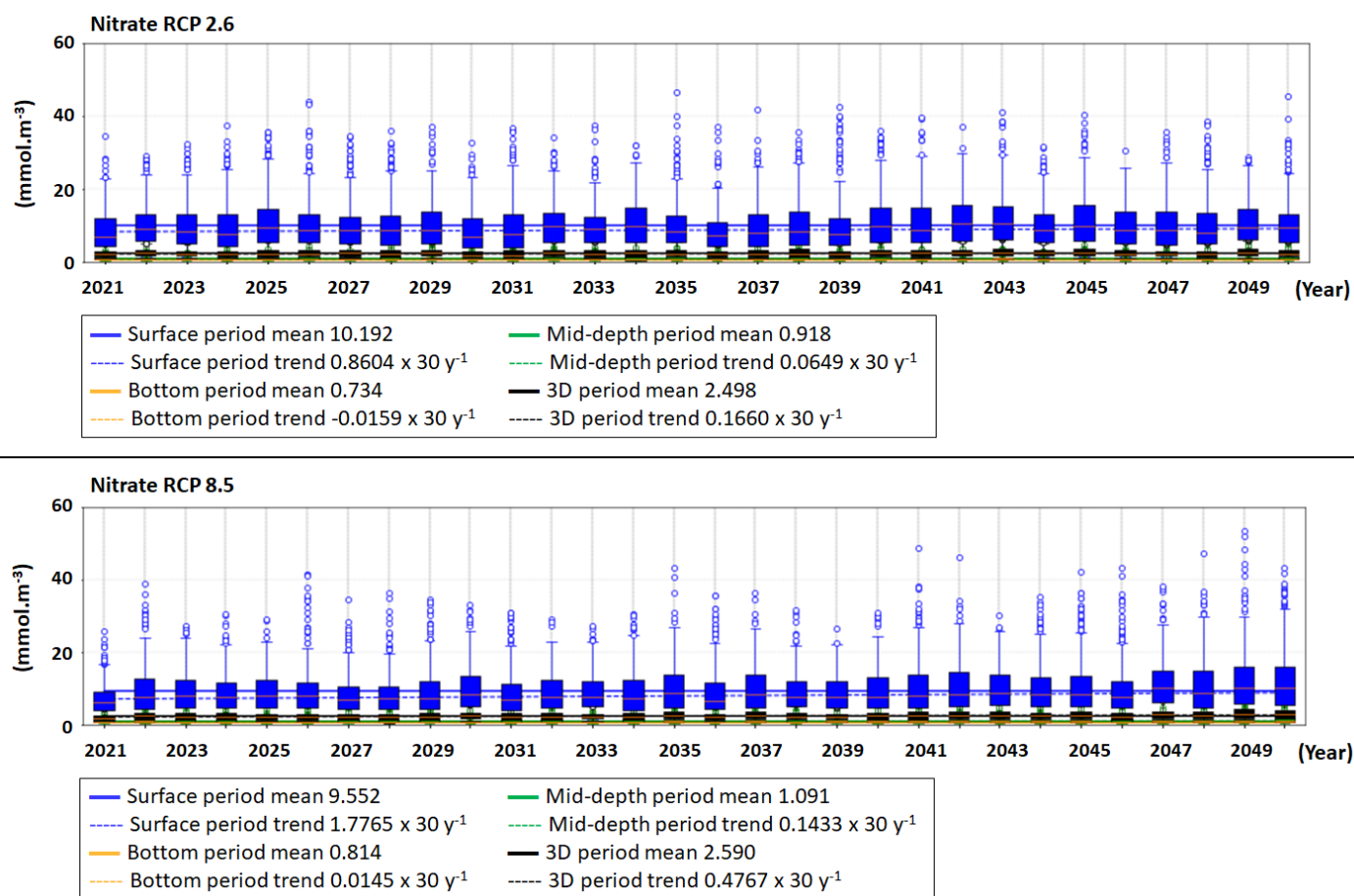


Figure 31 : Evolutions temporelles décennales de la concentration de nitrate dans l'eau (mmol.m^{-3}) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

Les valeurs de phosphate pour l'ensemble du domaine (Figure 32) sont équivalentes pour les deux scénarios, la différence se situant principalement en surface où les valeurs sont légèrement plus élevées pour le scénario RCP 2.6.

Les tendances sont à l'augmentation en lien avec les apports prescrits pour le Rhône à partir de 2041 (Figure 18), excepté comme pour les autres nutriments, au fond pour l'ensemble du domaine pour le RCP 2.6 qui a les apports les plus faibles.

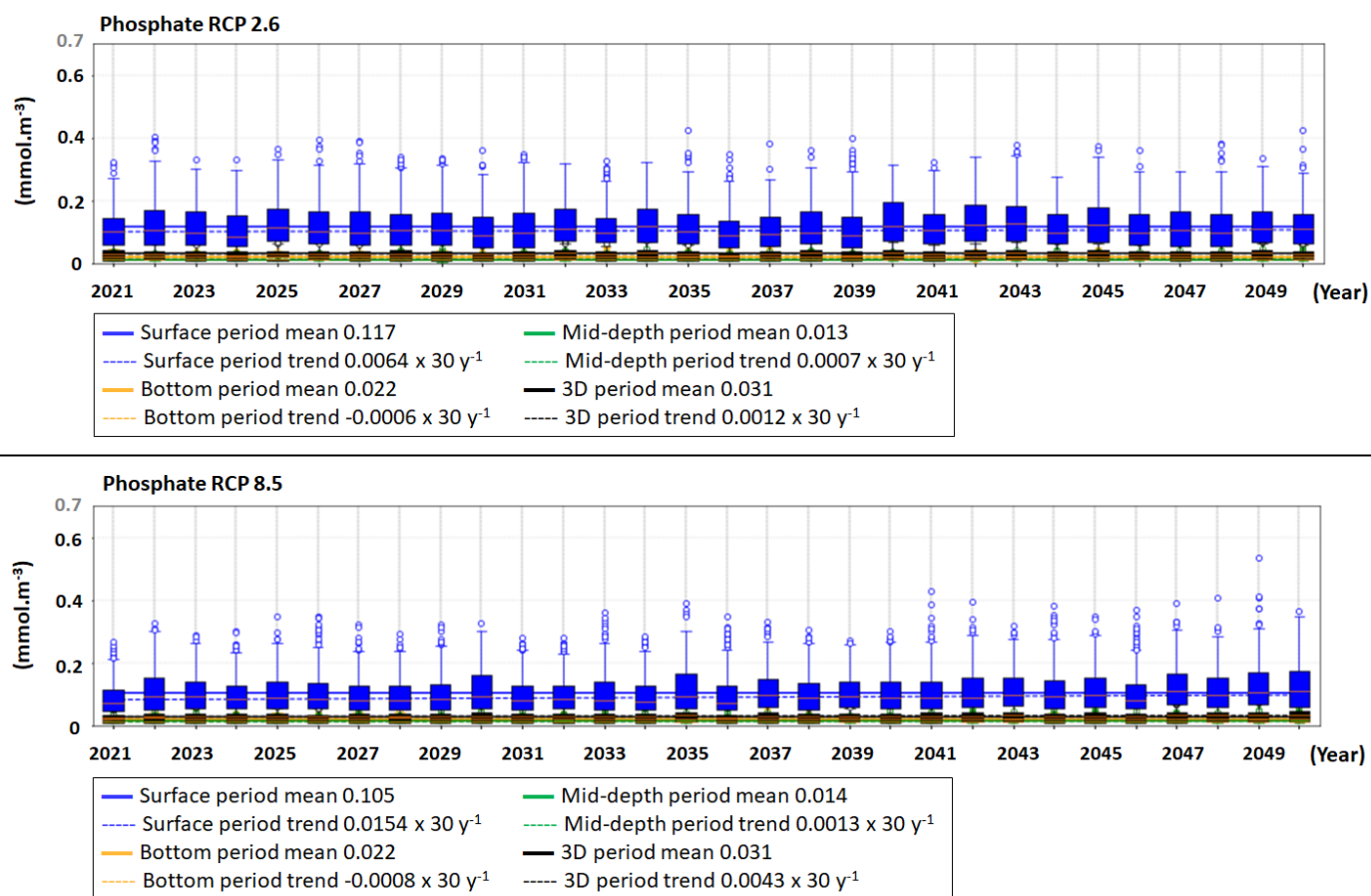


Figure 32 : Evolutions temporelles décennales de la concentration de phosphate dans l'eau (mmol.m^{-3}) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.3 Variables planctoniques

3.2.3.1 Concentration en chlorophylle des diatomées

Les concentrations en chlorophylle des diatomées sur l'ensemble du domaine présentent des valeurs proches pour les deux scénarios, légèrement plus faibles en surface pour le RCP 8.5 plus chaud, ce qui pourrait être lié à la température optimale des diatomées qui est relativement basse. Il est à noter une concentration plus forte au fond, qui pourrait être liée au forçage solaire qui en moyenne est équivalent au forçage historique, mais qui est appliqué en continu sans la variation diurne. Au fond, l'éclairement constant ne reproduit sans doute pas l'effet de limitation par la lumière sur la photosynthèse que peuvent avoir les conditions de faible éclairement en profondeur (nuages, aube et crépuscule). Les diatomées étant moins sensibles à la limitation par la lumière pourraient en tirer avantage pour croître en profondeur (Figure 33).

Au point SOLEMIO, la profondeur n'étant que de 56 m, le fond correspond au maximum de chlorophylle profond où la photosynthèse pourrait être accrue par cet éclaircissement plus important (Figure 34).

Les tendances sont toutes à l'augmentation, du fait d'une augmentation de la température et des nutriments au cours des trente ans pour chacun des scénarios. Au fond pour le scenario RCP 8.5 et à SOLEMIO pour le RCP 2.6, la tendance est à la diminution, ce qui pourrait être relié à la tendance à la diminution des nutriments également observée au cours du temps pour les deux scénarios au fond (cf.3.2.2).

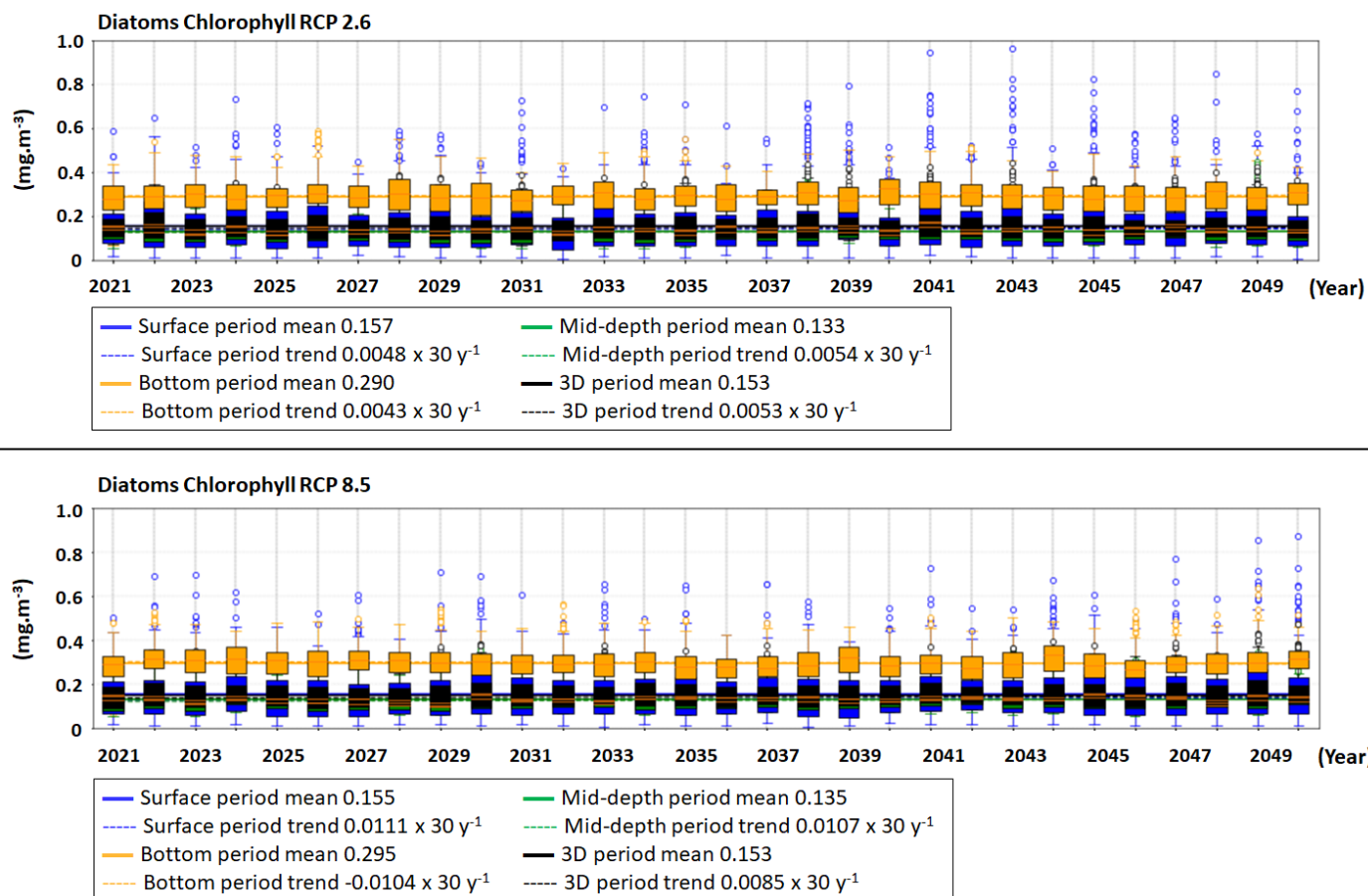


Figure 33 : Evolutions temporelles décennales de la concentration de chlorophylle des diatomées dans l'eau (mg.m^{-3}) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

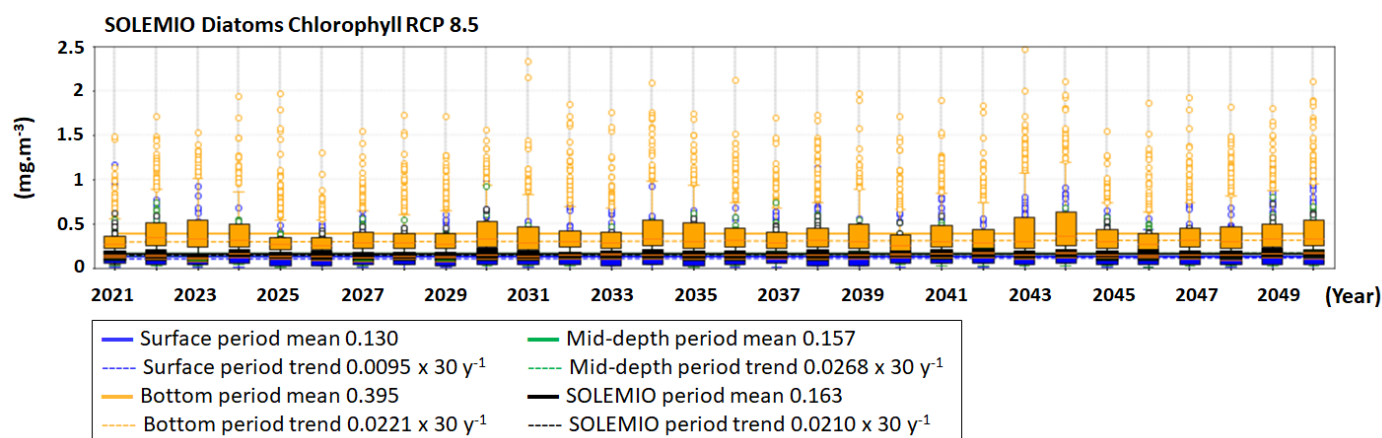
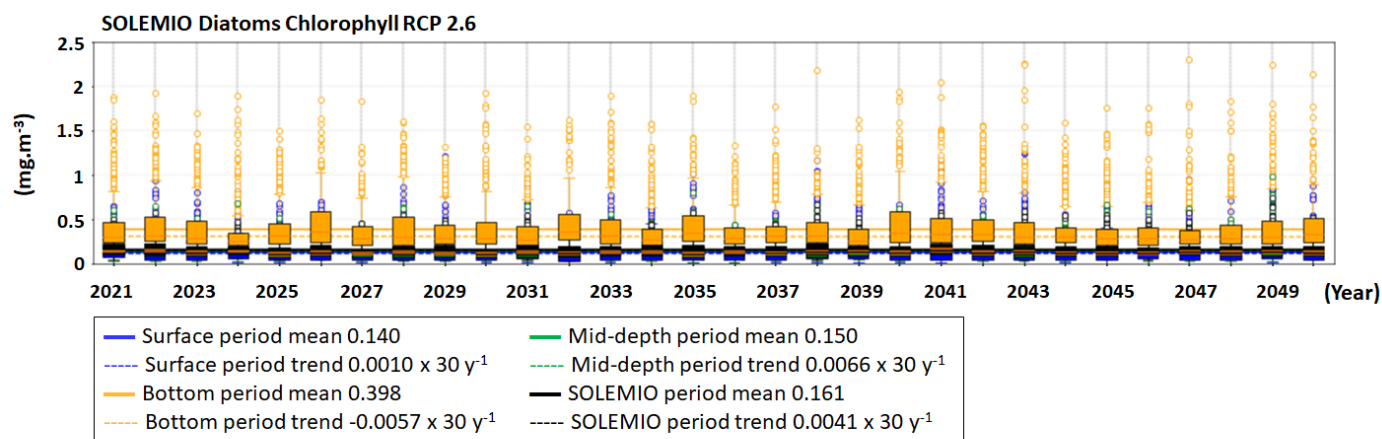


Figure 34 : Evolutions temporelles décennales de la concentration de chlorophylle des diatomées dans l'eau (mg.m^{-3}) au point SOLEMIO en (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.3.2 Concentration en chlorophylle du picophytoplancton

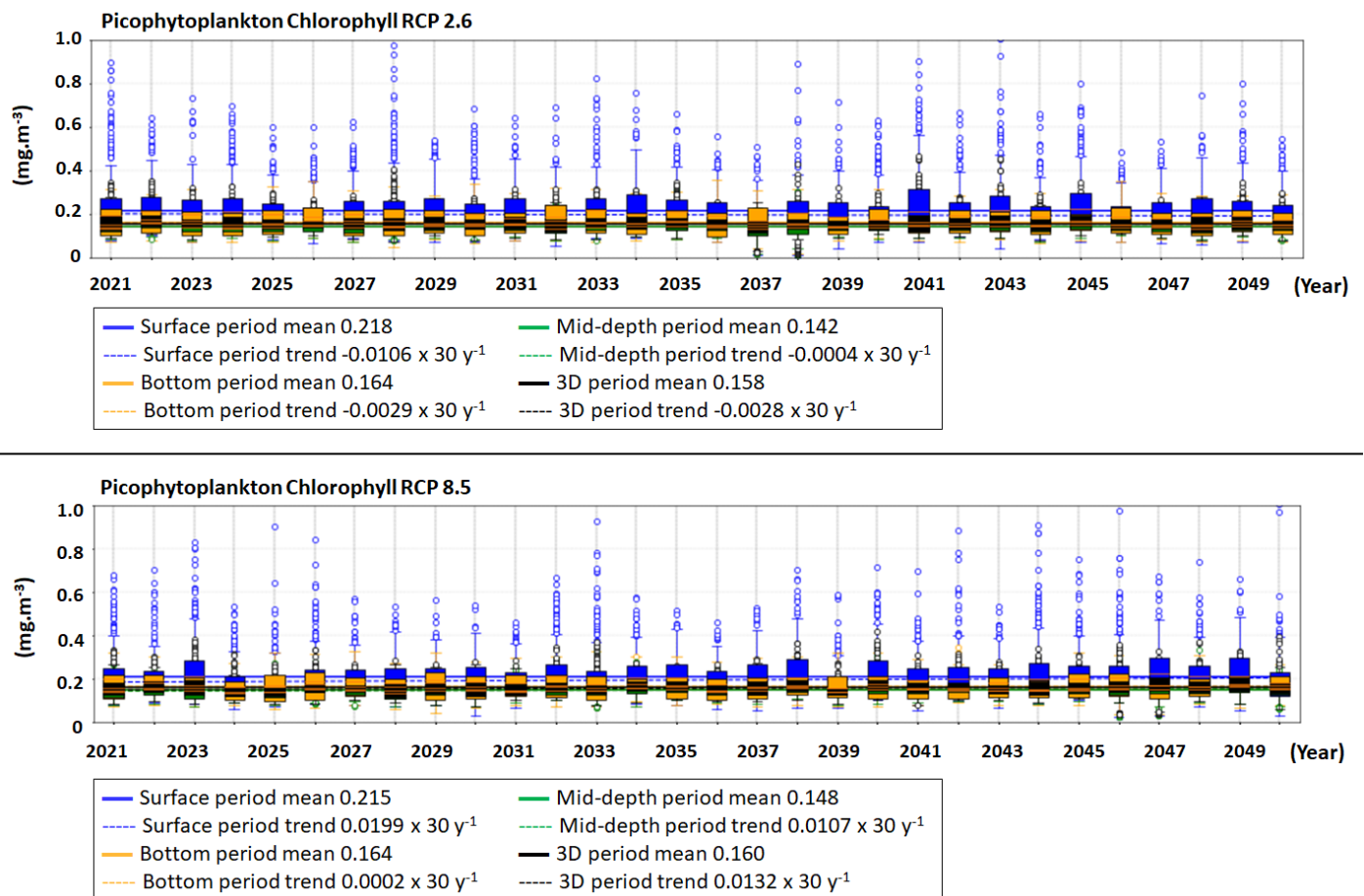


Figure 35 : Evolutions temporelles décennales de la concentration de chlorophylle du picophytoplancton dans l'eau (mg.m⁻³) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

Les concentrations en chlorophylle du picophytoplancton sur l'ensemble du domaine sont plus importantes que celles des diatomées, car ces organismes sont mieux adaptés aux conditions futures, principalement à une température plus élevée et moins de nutriments. Les concentrations les plus fortes se situent principalement en surface où la température et les nutriments sont les plus importants. La concentration assez forte au fond, pourrait être due, un peu comme pour les diatomées, au forçage journalier constant de la lumière (Figure 35).

Au point SOLEMIO ce n'est pas le cas, car le picophytoplancton ne tire pas autant avantage que les diatomées des apports de nutriments du sédiment lorsque la colonne d'eau est très stratifiée car la limitation par la lumière au fond est plus stricte pour ces organismes (Figure 36).

Les tendances pour l'ensemble du domaine de la chlorophylle du picophytoplancton sont globalement à la baisse pour le RCP 2.6 mais à la hausse pour le RCP 8.5.

Au point SOLEMIO, toutes les tendances sont à la hausse sauf en surface pour le RCP 2.6 qui pourrait être due à une limitation des nutriments.

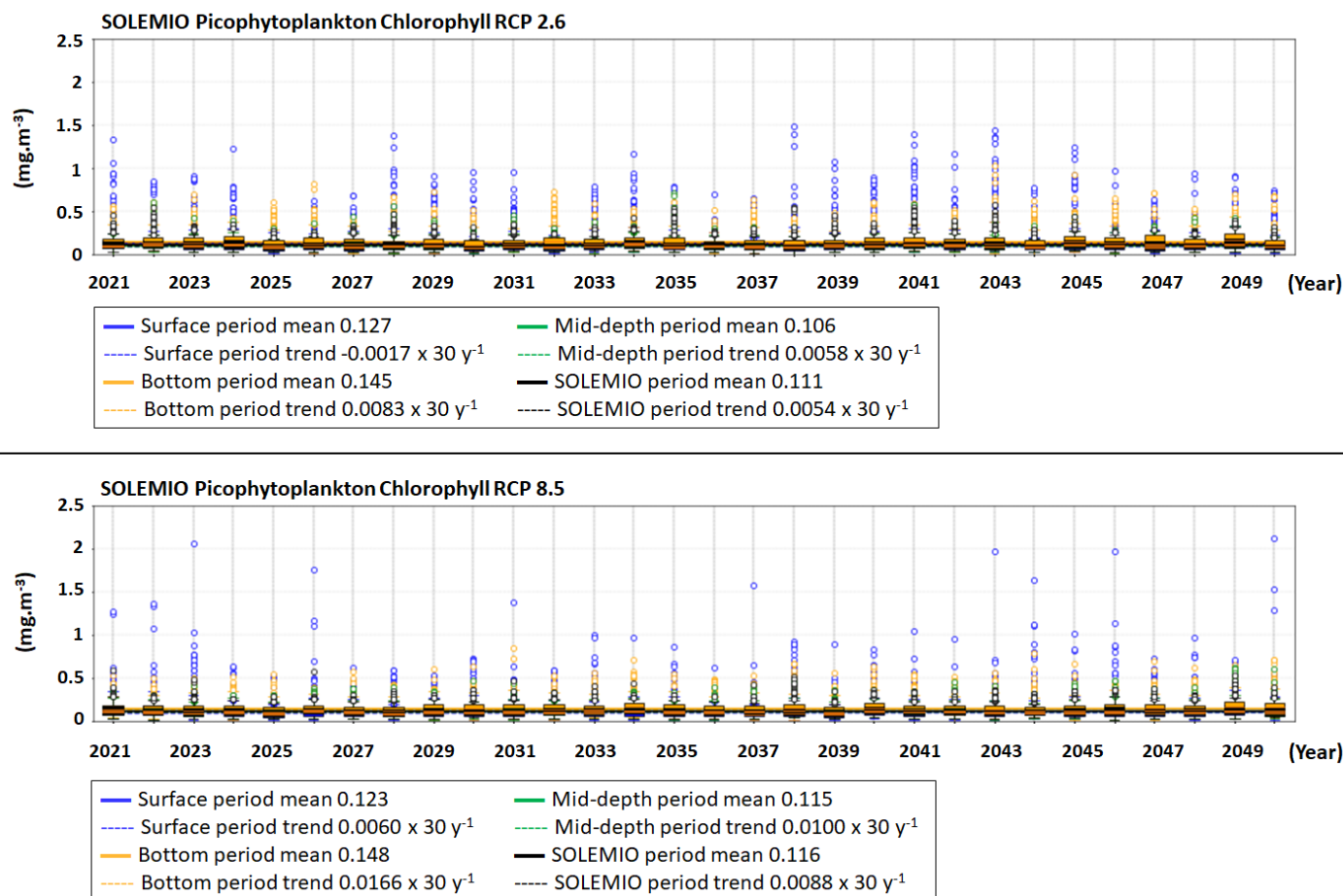


Figure 36 : Evolutions temporelles décennales de la concentration de chlorophylle du picophytoplancton dans l'eau (mg.m^{-3}) au point SOLEMIO en (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.3.3 Concentration en chlorophylle totale

Les concentrations de chlorophylle totale reflètent celles des diatomées et du picophytoplancton observées précédemment. Sur l'ensemble du domaine, ces concentrations sont relativement proches pour les deux scénarios, légèrement supérieures pour le RCP 8.5 qui bénéficie d'une température supérieure et d'un apport en nutriments supérieur (cf. 3.2.2). Il est à noter une concentration plus forte au fond, qui correspond à une forte concentration en chlorophylle des diatomées.

Au point SOLEMIO, les concentrations en chlorophylle totale sont également proches pour les deux scénarios, avec des valeurs plus faibles que les valeurs historiquement mesurées à SOLEMIO jusqu'ici. Il est à noter que les valeurs de surface et de mi-profondeur sont nettement plus faibles mais que les valeurs au fond sont plus fortes. A nouveau, l'hypothèse d'un éclaircissement journalier constant vs une variation journalière pourrait expliquer ces concentrations de chlorophylle au fond principalement dues aux diatomées.

Les tendances pour l'ensemble du domaine sont à la diminution pour le RCP 2.6 qui a moins d'apports en nutriments et une température plus faible sauf à mi-profondeur, alors que pour le RCP 8.5 elles sont à l'augmentation sauf au fond (Figure 37).

Au point SOLEMIO, les tendances sont à l'augmentation à relier avec l'augmentation de la température, sauf pour le RCP 2.6 en surface où la diminution des apports en nutriments se fait sentir (Figure 38).

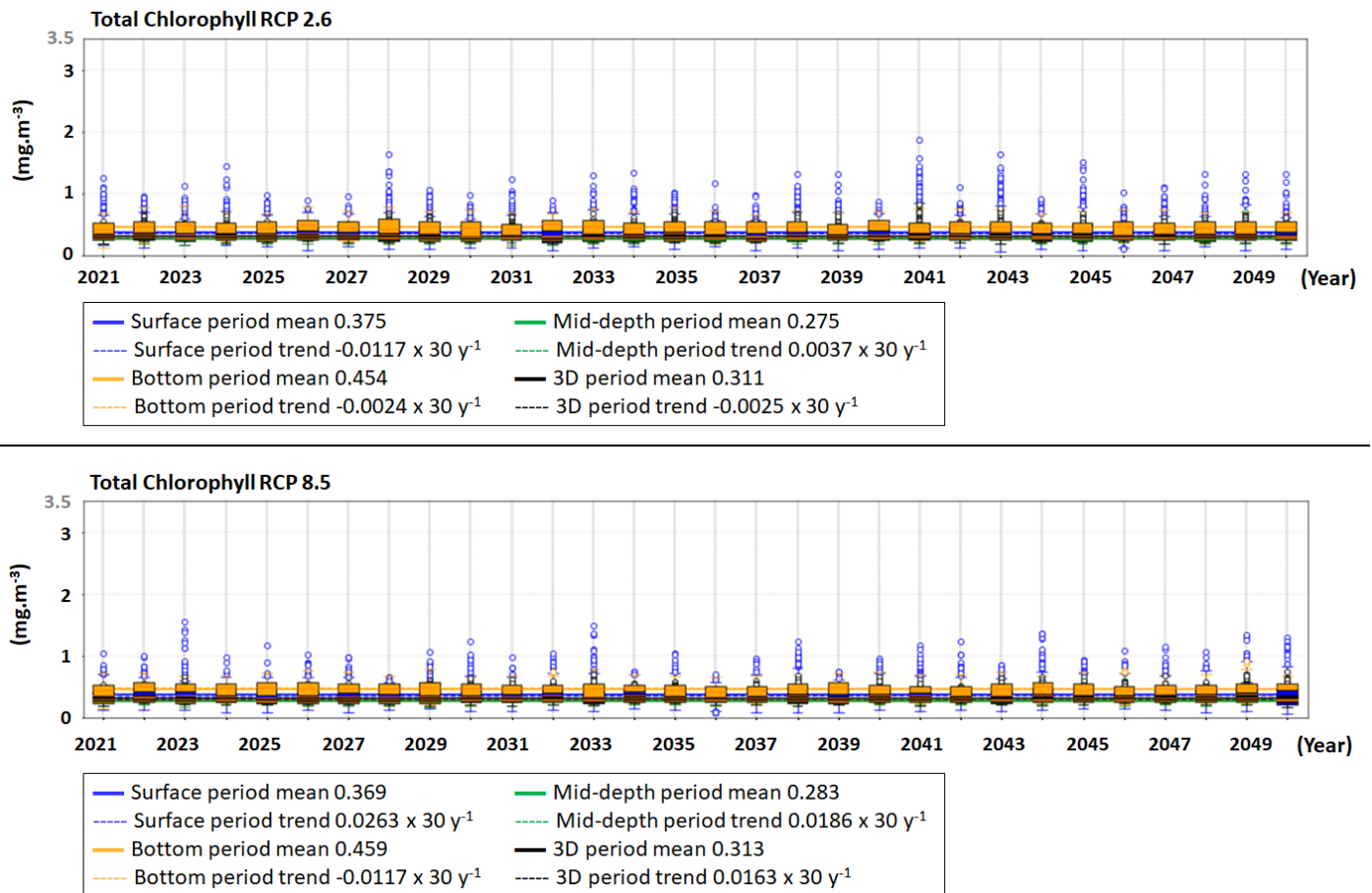


Figure 37 : Evolutions temporelles décennales de la concentration de chlorophylle totale dans l'eau (mg.m^{-3}) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

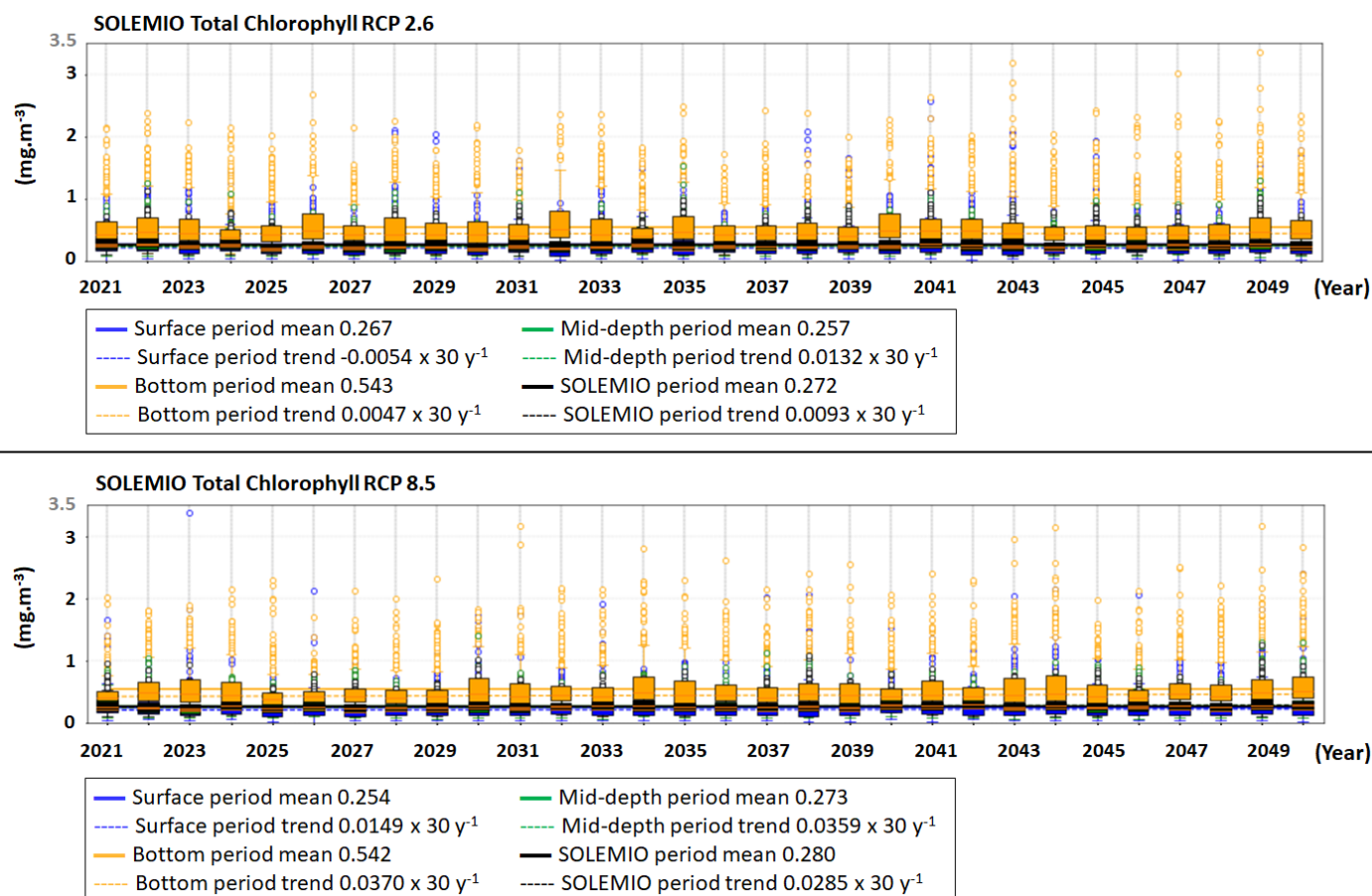


Figure 38 : Evolutions temporelles décennales de la concentration de chlorophylle totale dans l'eau (mg.m^{-3}) au point SOLEMIO en (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.4 Variables du système des carbonates

Dans cette partie, seuls les diagrammes boxplot pour l'ensemble du domaine sont présentés. Les résultats à SOLEMIO sont très similaires. Les légères différences sont dues à l'influence du Rhône, moins marquée à la station, et les tendances en accord avec celles obtenues pour tout le domaine, sont plus soutenues. Tous les diagrammes boxplot réalisés pour la station SOLEMIO sont disponibles en informations supplémentaires sur ZENODO (Barré et al., 2024b S.I.).

3.2.4.1 Alcalinité totale

L'alcalinité totale est légèrement plus élevée pour le RCP 2.6 et est plus importante en surface du fait des apports des fleuves (Figure 39). Cette petite différence peut être reliée aux concentrations des nutriments, car il y a plus de nitrate et de phosphate pour le RCP 2.6 en surface (Figure 31 et Figure 32). Les tendances sont généralement à la baisse, avec des valeurs plus importantes au fond.

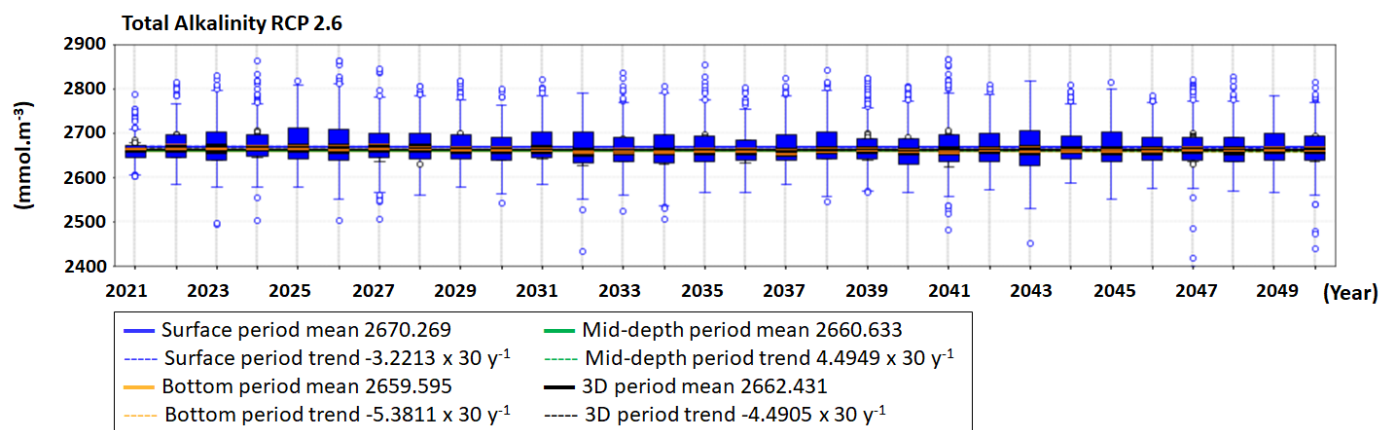


Figure 39 : Evolutions temporelles décennales de l'alcalinité totale de l'eau (mmol.m^{-3}) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.4.2 Carbone inorganique dissous

Les concentrations de carbone inorganique dissous sont en moyenne, sur toute la période, relativement proches pour les deux scénarios (Figure 40). En surface le scénario RCP 2.6 présente des valeurs de DIC supérieures au RCP 8.5 dans la première décade, qui peuvent être dues à la synergie (étant donné que la même tendance est observée à SOLEMIO) des apports des fleuves plus forts et du puits de CO_2 du même ordre de grandeur pour les deux scénarios dans la première décade (Figure 44 et Figure 45). Les tendances sont toutes à l'augmentation, mais avec une augmentation quasiment trois fois plus rapide pour le scénario pessimiste RCP 8.5 dû à la plus forte augmentation de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique (Figure 14).

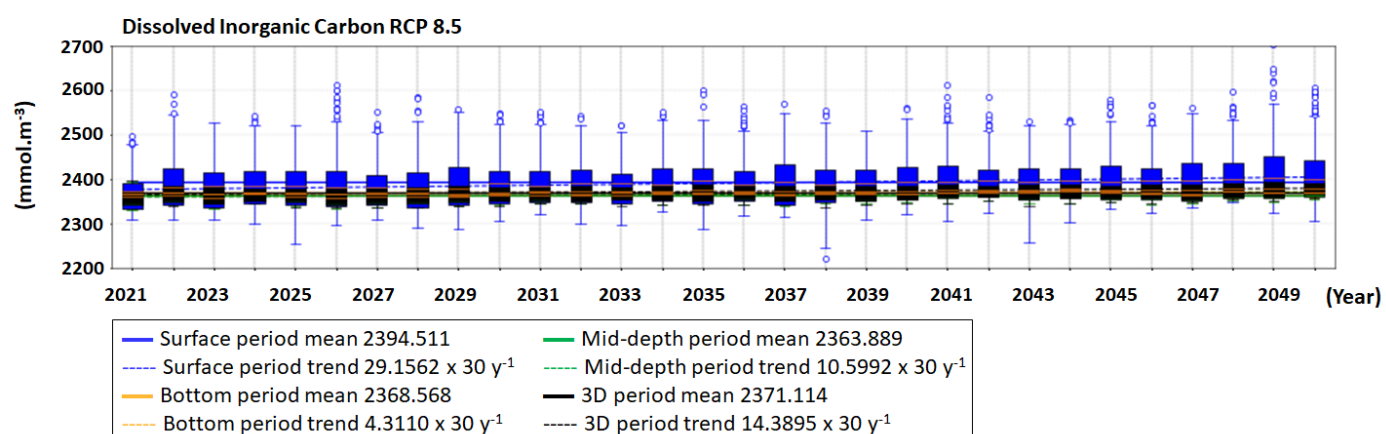
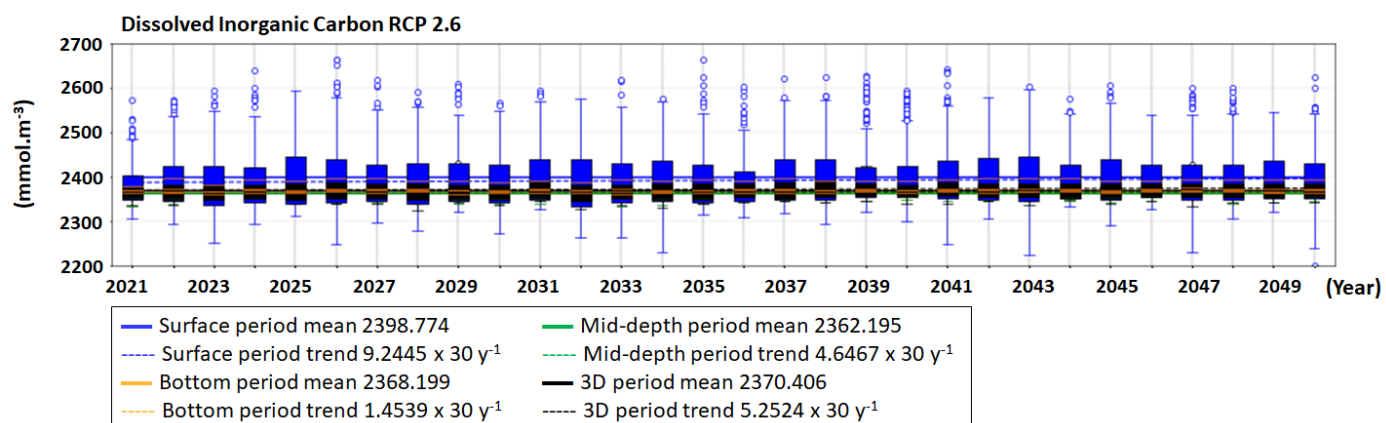


Figure 40 : Evolutions temporelles décennales du carbone inorganique dissous dans l'eau (mmol.m^{-3}) sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.4.3 pH

Les valeurs de pH sont en moyenne plus faibles pour le scénario RCP 8.5 que pour le scénario RCP 2.6 avec les valeurs les plus faibles en surface, zone pouvant être influencée à la fois par les apports des fleuves et surtout les flux de CO_2 air-mer (Figure 41). Les tendances sont toutes à la diminution avec les diminutions les plus importantes en surface.

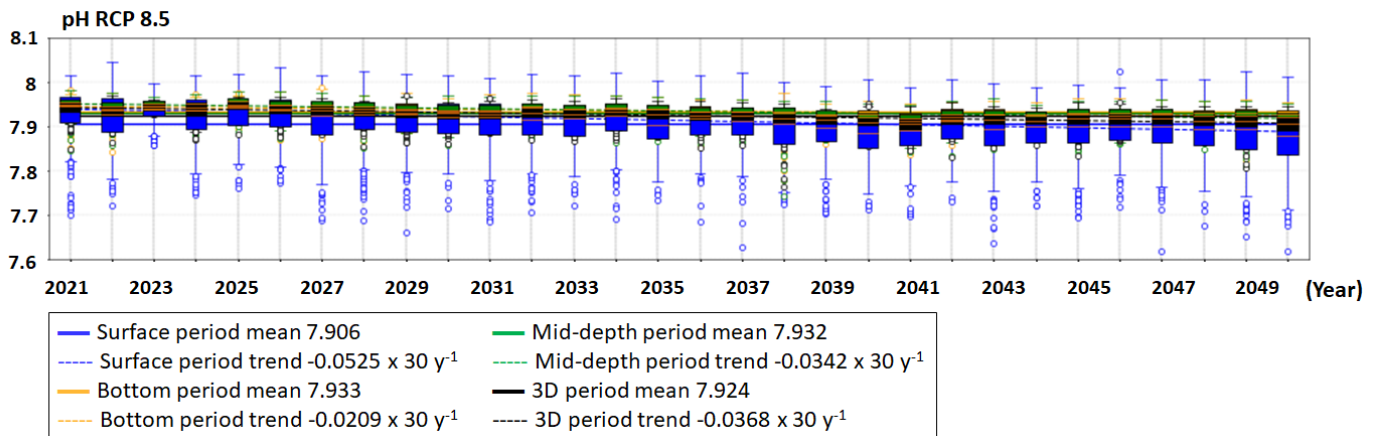
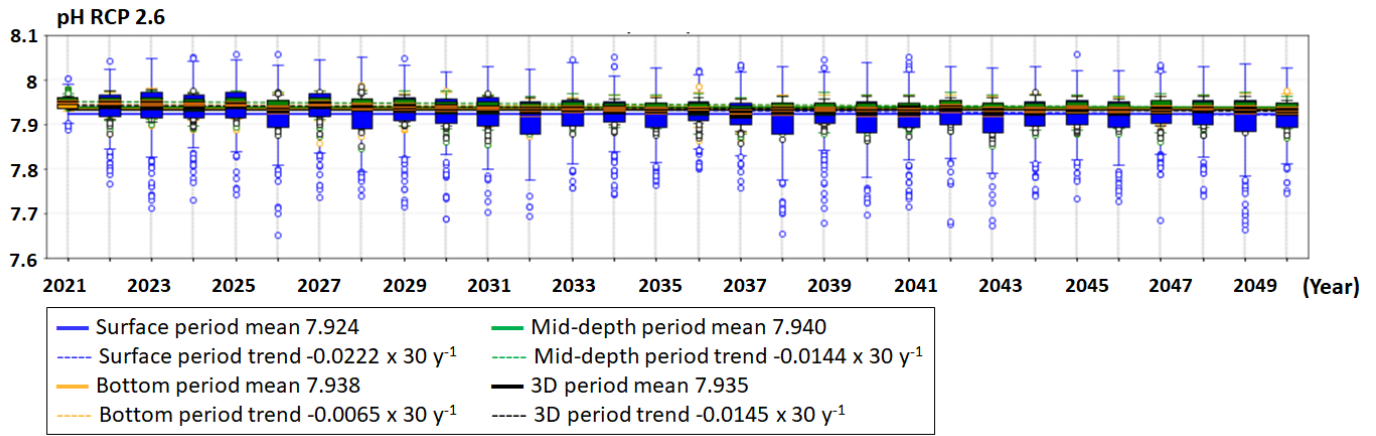


Figure 41 : Evolutions temporelles décennales du pH sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.4.4 Etat de saturation du CaCO_3

Les valeurs moyennes de l'état de saturation du CaCO_3 sont relativement proches pour les deux scénarios et supérieures à 1 (Figure 42). Cependant, les valeurs minimales de surface sont régulièrement en-dessous du seuil de dissolution de 1 (Figure 42). Les tendances sont toutes à la baisse et surtout importantes en surface et pour le RCP 8.5.

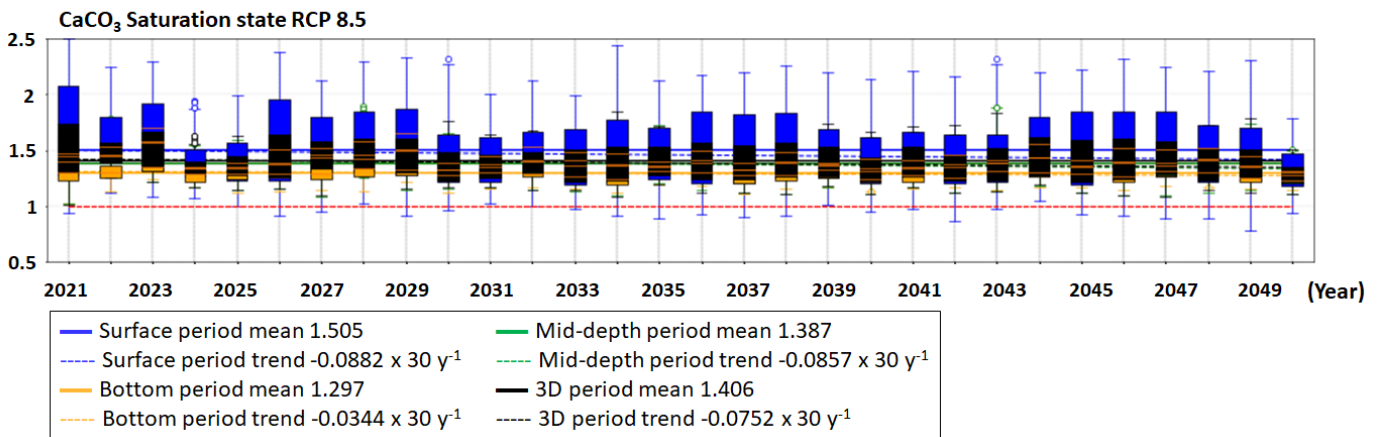
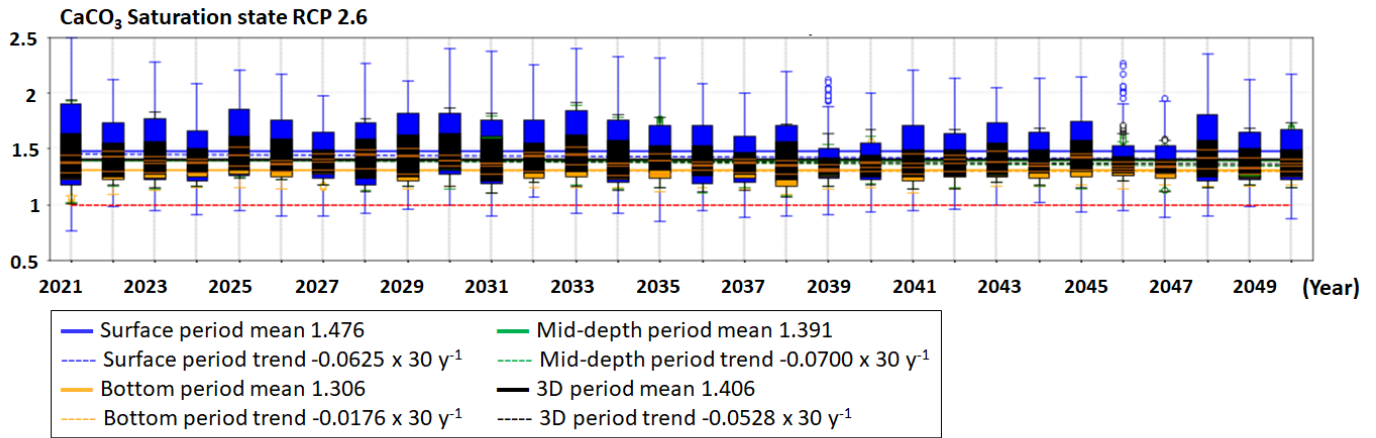


Figure 42 : Evolutions temporelles décennales de l'état de saturation du CaCO₃ sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5. En rouge, le seuil de dissolution/précipitation $\Omega=1$.

3.2.4.5 $p\text{CO}_2$

Les $p\text{CO}_2$ sont en moyenne plus fortes en surface car en interaction avec la $p\text{CO}_2$ atmosphérique qui est plus forte pour les deux scénarios (Figure 43). Il est à noter que comme cela a été montré dans les simulation historiques (Barré, 2023), la $p\text{CO}_2$ de surface est sous-estimée. Les tendances sont toutes à l'augmentation surtout en surface et surtout pour le scénario RCP 8.5 qui correspond à une $p\text{CO}_2$ atmosphérique plus forte.

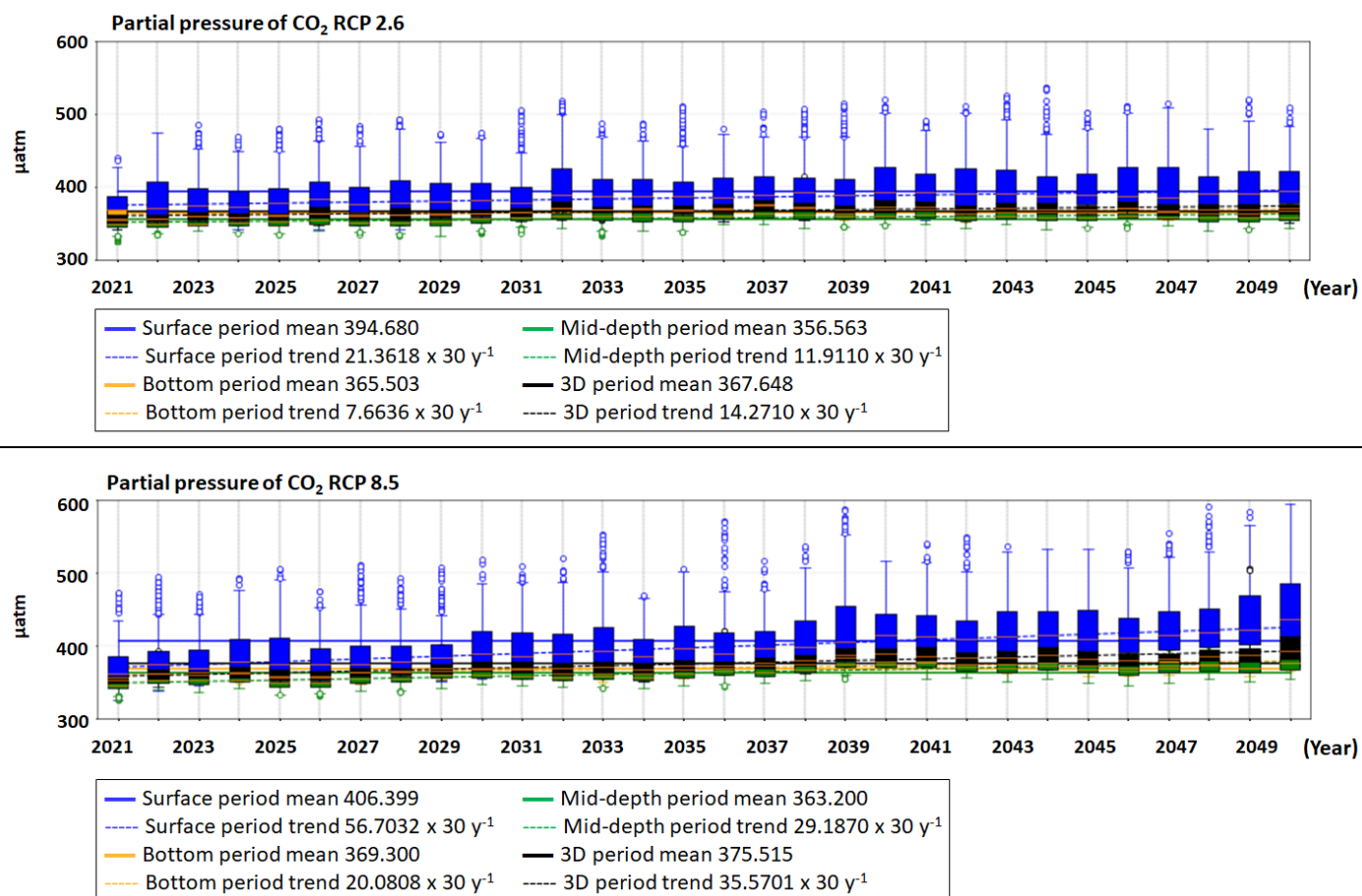


Figure 43 : Evolutions temporelles décennales de la pression partielle marine de CO₂ sur l'ensemble du domaine (noir), en surface (bleu), au fond (orange) et à mi-profondeur (vert) de 2021 à 2050 simulées pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5

3.2.5 Flux de CO₂ à l'interface air-mer

Les flux de CO₂ à l'interface air-mer sont calculés à partir de la différence entre la $p\text{CO}_2$ marine de surface et la $p\text{CO}_2$ atmosphérique. Les valeurs de $p\text{CO}_2$ d'ECO3M-CarbOx étant sous-estimées, l'intérêt ici n'est pas de considérer les valeurs absolues des flux modélisés mais plutôt leur tendance et les mettre en parallèle des tendances à l'augmentation des $p\text{CO}_2$ atmosphériques pour voir si le puits de CO₂ (valeurs de flux négatives) de la baie de Marseille va évoluer au cours de ces trente années selon les scénarios.

La baie de Marseille dans l'ensemble de son domaine agit comme un puits de CO₂ qui s'intensifie au cours des trente ans en lien avec l'augmentation de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique pour chacun des deux scénarios. La $p\text{CO}_2$ atmosphérique étant plus forte dans le RCP 8.5, les flux air-mer sont plus forts dans ce scénario (Figure 44). C'est également le cas pour le point SOLEMIO (Figure 45).

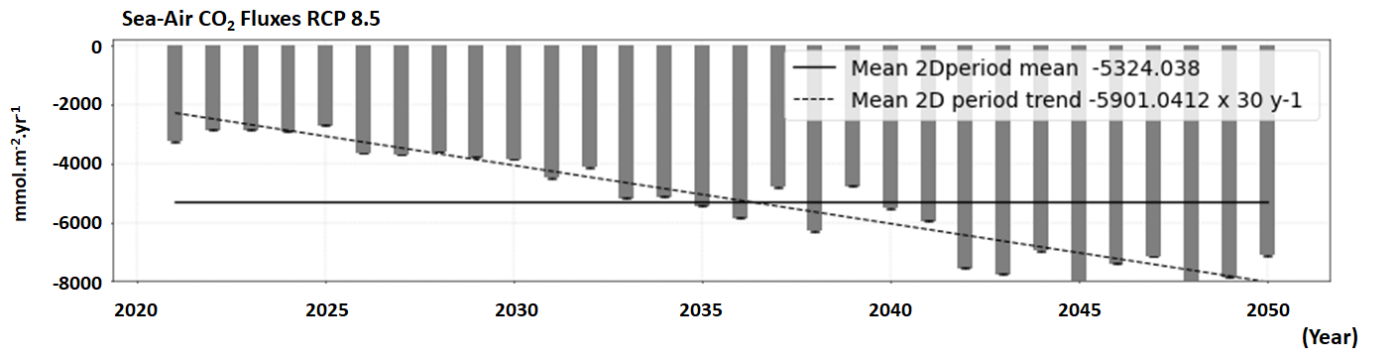
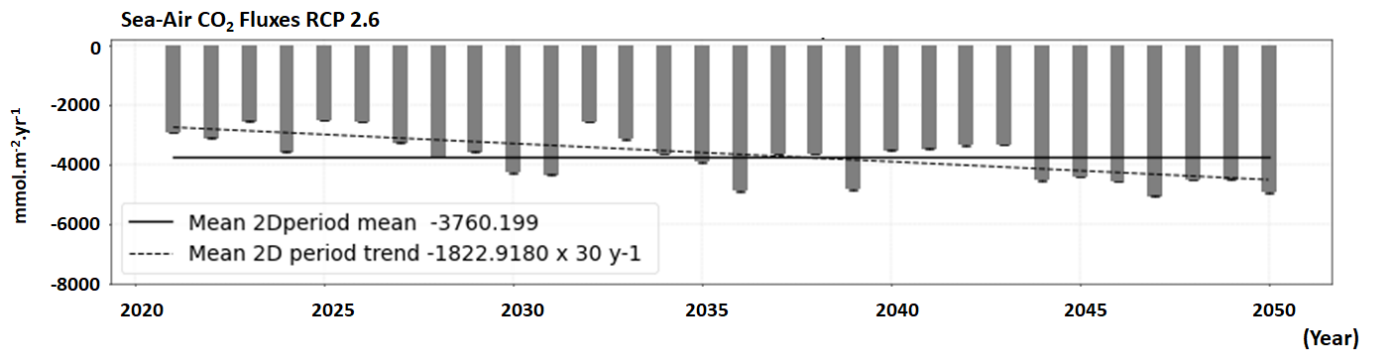


Figure 44 : Evolutions temporelles décennales des flux annuels de CO₂ sur l'ensemble du domaine de 2021 à 2050 simulées pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

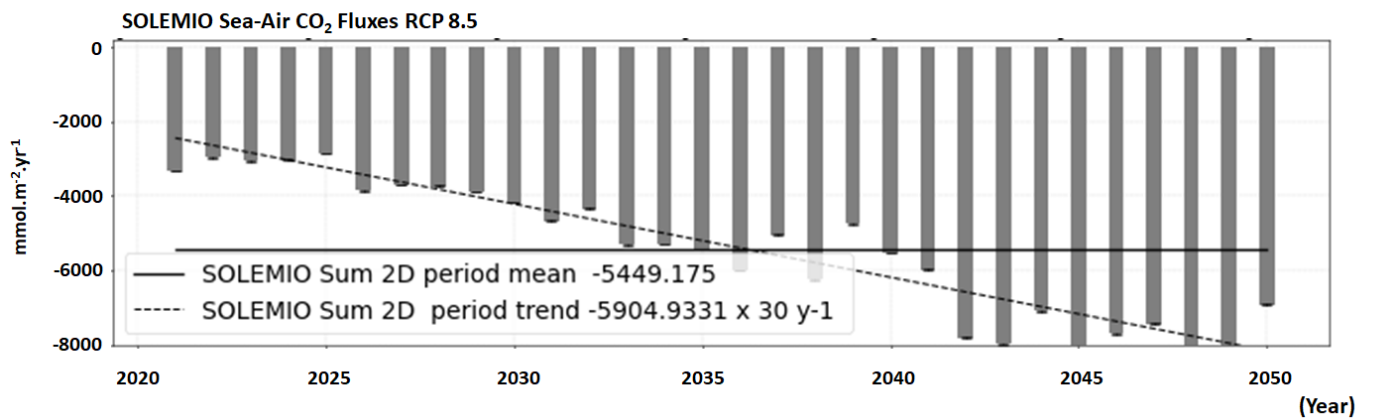
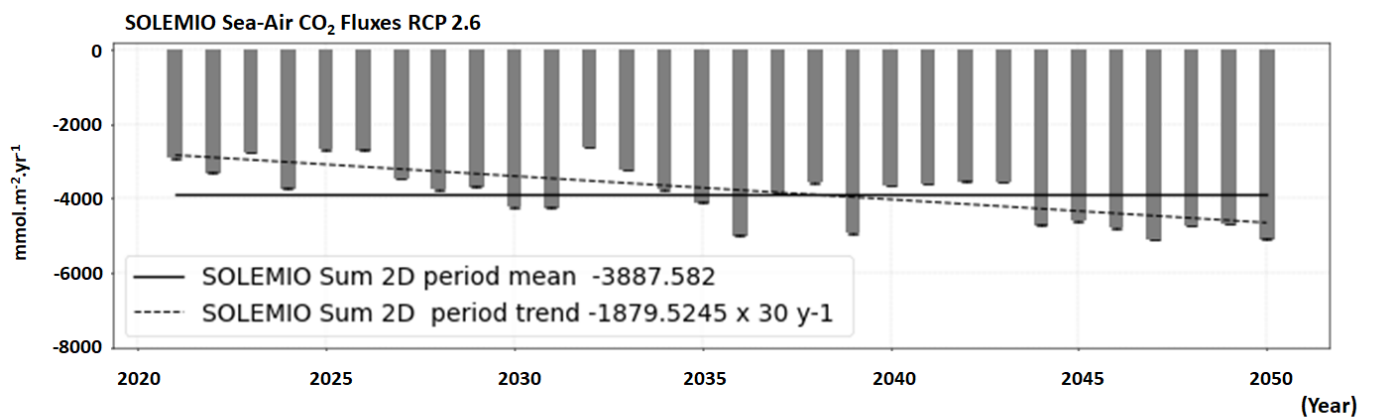


Figure 45 : Evolutions temporelles décennales des flux annuels de CO₂ au point SOLEMIO de 2021 à 2050 simulées pour les deux scenarios RCP 2.6 et 8.5

Le rapport des tendances entre les scénarios RCP 8.5 et 2.6 permet de comparer l'«efficacité» du puits pour ces deux scénarios. Ainsi ce rapport, environ égal à 3.1 pour l'ensemble du domaine (3.2 pour SOLEMIO), montre que dans la baie de Marseille, la mer incorporera environ trois fois plus de CO₂ dans le cas du scénario RCP 8.5. Cependant, pour être interprété correctement, ce résultat est à mettre en parallèle avec le rapport des tendances de *p*CO₂ atmosphérique obtenus pour les deux scénarios. Ce rapport est un peu plus faible (environ 2.6) (Figure 14). Les résultats ne mettent donc pas en évidence une atténuation du puits de CO₂, au contraire, celui-ci se maintient et semble s'accroître. Le calcul du flux air-mer de CO₂ est fortement dépendant de la vitesse du vent et de la différence de *p*CO₂ entre l'air et la mer (Ulses et al., 2023 ; Barré et al., 2024a). Pour l'ensemble du domaine, la différence de *p*CO₂ (Tableau 9 et Figure 14) est importante et l'intensité du vent augmente dans le scénario RCP 8.5 (Tableau 1) le rapport entre les deux scénarios est donc élevé. A SOLEMIO, c'est majoritairement la différence de *p*CO₂, plus grande que pour l'ensemble du domaine, qui explique ce rapport car l'intensité du vent ne varie presque pas (Tableau 1).

3.3 Variation relative des variables de 2021 à 2050

Tableau 6 : Variation relative par rapport à la valeur de référence (simulations et données SOLEMIO) des variables hydrodynamiques simulées durant la période 2021 à 2050 pour les RCP 2.6 et RCP 8.5. Pour les tendances et variations, les augmentations sont indiquées en rouge et les diminutions en bleu. **NB** : Pour Kz, la moyenne 2021 n'est calculée qu'à partir de résultats de modèle car il n'y a pas de mesure de cette variable à SOLEMIO.

Variable	Localisation	Valeur moyenne 2021	RCP 2.6				RCP 8.5			
			Valeur moyenne sur 30 ans	Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans	Valeur moyenne sur 30 ans	Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans
Kz (m ² .s ⁻¹)	Domaine 3D	0.011	0.015	+1.3×10 ⁻⁴	+0.004	+35.19%	0.017	+2×10 ⁻⁴	+0.005	+50%
	Domaine Surface	0.006	0.006	-1×10 ⁻⁵	-3×10 ⁻⁴	-4.55%	0.006	-6.6×10 ⁻⁵	-2×10 ⁻⁴	-3.03%
	Domaine Fond	0.003	0.002	+3.3×10 ⁻⁶	+1×10 ⁻⁴	+3.85%	0.002	+1×10 ⁻⁵	+3×10 ⁻⁴	+11.54%
	SOLEMIO colonne d'eau	0.012	0.010	-6.6×10 ⁻⁵	-2×10 ⁻⁴	-1.71%	0.009	0	0	0
	SOLEMIO Surface	0.007	0.006	-1.6×10 ⁻⁵	-5×10 ⁻⁴	-7.58%	0.005	-6.6×10 ⁻⁵	-2×10 ⁻⁴	-3.03%
	SOLEMIO Fond	0.002	0.001	0	0	0	0.001	0	0	0
Température (° C)	Domaine 3D	14.886	14.567	+0.001	+0.030	+ 0.20 %	14.690	+0.005	+0.137	+0.92%
	Domaine Surface	15.875	15.593	+0.005	+0.158	+1.00 %	15.897	+0.009	+0.261	+1.65 %
	Domaine Fond	13.894	13.920	-8×10 ⁻⁴	-0.023	-0.17%	13.951	+3×10 ⁻⁴	+0.008	+0.05%
	SOLEMIO colonne d'eau	14.985	14.500	+5×10 ⁻⁴	+ 0.014	+ 0.10%	14.684	+0.005	+0.139	+0.93 %
	SOLEMIO Surface	15.934	15.446	+0.002	+ 0.069	+ 0.43%	15.851	+0.008	+0.255	+1.60%
	SOLEMIO Fond	13.897	13.769	-7×10 ⁻⁴	- 0.021	-0.15%	13.780	-0.001	-0.039	-0.28%
Salinité (PSU)	Domaine 3D	37.680	36.996	-0.004	-0.121	-0.32%	37.116	-0.005	-0.157	-0.41%
	Domaine Surface	35.986	33.570	-0.002	-0.047	-0.13%	34.472	-0.005	-0.153	-0.43%
	Domaine Fond	38.225	37.964	-0.007	-0.217	-0.57%	37.947	-0.008	-0.241	-0.02%
	SOLEMIO colonne d'eau	38.218	37.830	-0.005	-0.163	-0.43%	37.870	-0.004	-0.125	-0.33%
	SOLEMIO Surface	37.975	37.234	-0.005	-0.145	-0.38%	37.463	-0.003	-0.087	-0.23%
	SOLEMIO Fond	38.353	38.071	-0.007	-0.221	-0.58%	38.060	-0.007	-0.207	-0.54%

Tableau 7 : Variation relative par rapport à la valeur de référence (simulations et données SOLEMIO) des variables biogéochimiques simulées durant la période 2021 à 2050 pour les RCP 2.6 et RCP 8.5. Pour les tendances et variations, les augmentations sont indiquées en rouge et les diminutions en bleu.

Variable	Localisation	Valeur moyenne 2021	RCP 2.6				RCP 8.5			
			Valeur moyenne sur 30 ans	Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans	Valeur moyenne sur 30 ans	Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans
Oxygène (mL.L ⁻¹)	Domaine 3D	5.570	5.641	-2×10 ⁻⁴	-0.005	-0.09%	5.616	-4×10 ⁻⁴	-0.012	-0.22%
	Domaine Surface	5.589	5.684	-8×10 ⁻⁴	-0.024	-0.43%	5.625	-9×10 ⁻⁴	-0.027	-0.49%
	Domaine Fond	5.496	5.524	+7×10 ⁻⁴	+0.021	+0.38%	5.507	+0.001	+0.030	+0.55%
	SOLEMIO colonne d'eau	5.597	5.681	-3×10 ⁻⁴	-0.008	-0.14%	5.662	-0.001	-0.034	-0.61%
	SOLEMIO Surface	5.551	5.624	-2×10 ⁻⁴	-0.006	-0.12%	5.582	-9×10 ⁻⁴	-0.029	-0.52%
	SOLEMIO Fond	5.560	5.605	-2×10 ⁻⁴	-0.005	-0.09%	5.596	-7×10 ⁻⁴	-0.021	-0.39%
Ammonium (mmol.m ⁻³)	Domaine 3D	0.094	0.080	+2×10 ⁻⁴	+0.007	+7.26 %	0.088	+4×10 ⁻⁴	+0.012	+12.50%
	Domaine Surface	0.163	0.227	+9×10 ⁻⁴	+0.026	+16.00 %	0.232	+0.001	+0.041	+24.95 %
	Domaine Fond	0.162	0.152	-1×10 ⁻⁴	-0.002	-1.54%	0.158	-3×10 ⁻⁵	-0.001	-0.62%
	SOLEMIO colonne d'eau	0.046	0.013	+1×10 ⁻⁵	+3×10 ⁻⁴	+ 0.65%	0.014	+1×10 ⁻⁵	+3×10 ⁻⁴	+ 0.65%
	SOLEMIO Surface	0.045	0.019	+1×10 ⁻⁵	+3×10 ⁻⁴	+ 0.66%	0.022	+7×10 ⁻⁶	+2×10 ⁻⁴	+0.44%
	SOLEMIO Fond	0.069	0.033	+4×10 ⁻⁵	+0.001	+1.59%	0.032	-1×10 ⁻⁵	-3×10 ⁻⁴	-0.43%
Nitrate (mmol.m ⁻³)	Domaine 3D	1.768	2.498	+0.005	+0.166	+9.39%	2.590	+0.016	+0.478	+26.96%
	Domaine Surface	5.709	10.192	+0.029	+0.860	+15.07%	9.552	+0.059	+1.776	+31.12%
	Domaine Fond	0.913	0.734	-5×10 ⁻⁴	-0.016	-1.74%	0.814	+5×10 ⁻⁴	+0.014	+1.59%
	SOLEMIO colonne d'eau	0.366	0.406	+5×10 ⁻⁴	+0.014	+3.83%	0.326	+0.001	+0.030	+8.31%
	SOLEMIO Surface	0.687	1.460	+3×10 ⁻⁴	+0.005	+0.76%	1.018	+5×10 ⁻⁴	+0.015	+2.12%

	SOLEMIO Fond	0.403	0.222	$+5 \times 10^{-4}$	+0.013	+3.32%	0.240	$+7 \times 10^{-4}$	+0.021	+5.13%
Phosphate (mmol.m⁻³)	Domaine 3D	0.026	0.031	$+4 \times 10^{-5}$	+0.001	+4.69%	0.031	$+1.4 \times 10^{-4}$	+0.004	+16.80%
	Domaine Surface	0.065	0.117	$+2.1 \times 10^{-4}$	+0.006	+9.82%	0.105	$+5.1 \times 10^{-4}$	+0.015	+23.62%
	Domaine Fond	0.024	0.022	-2×10^{-5}	-6×10^{-4}	-2.54%	0.022	-3×10^{-5}	-8×10^{-4}	-3.39%
	SOLEMIO colonne d'eau	0.009	0.005	$+1 \times 10^{-6}$	$+2 \times 10^{-4}$	+2.22%	0.004	$+1 \times 10^{-6}$	$+2 \times 10^{-4}$	+2.22%
	SOLEMIO Surface	0.011	0.013	$+1 \times 10^{-6}$	$+2 \times 10^{-4}$	+1.85%	0.010	$+1 \times 10^{-6}$	$+2 \times 10^{-4}$	+1.85%
	SOLEMIO Fond	0.013	0.008	$+2 \times 10^{-5}$	$+6 \times 10^{-4}$	+4.65%	0.008	$+1 \times 10^{-6}$	$+2 \times 10^{-4}$	+1.55%

Tableau 8 : Variation relative par rapport à la valeur de référence (simulations et données SOLEMIO) des variables planctoniques simulées durant la période 2021 à 2050 pour les RCP 2.6 et RCP 8.5. Pour les tendances et variations, les augmentations sont indiquées en rouge et les diminutions en bleu.

Variable	Localisation	Valeur moyenne 2021	RCP 2.6				RCP 8.5			
			Valeur moyenne sur 30 ans	Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans	Valeur moyenne sur 30 ans	Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans
Chlorophylle diatomées (mg.m ⁻³)	Domaine 3D	0.125	0.153	+2×10 ⁻⁴	+0.005	+4.25 %	0.153	+3×10 ⁻⁴	+0.008	+6.82%
	Domaine Surface	0.117	0.157	+2×10 ⁻⁴	+0.005	+4.11%	0.155	+4×10 ⁻⁴	+0.011	+9.50%
	Domaine Fond	0.227	0.290	+1×10 ⁻⁴	+0.004	+1.90%	0.295	-3×10 ⁻⁴	-0.010	-4.59%
	SOLEMIO colonne d'eau	0.148	0.161	+1×10 ⁻⁴	+0.004	+2.76%	0.163	+7×10 ⁻⁴	+0.021	+14.15%
	SOLEMIO Surface	0.119	0.140	+3×10 ⁻⁵	+0.001	+0.84%	0.130	+3×10 ⁻⁴	+0.009	+7.96%
	SOLEMIO Fond	0.290	0.398	-2×10 ⁻⁴	-0.006	-1.96%	0.395	+7×10 ⁻⁴	+0.022	+7.61%
Chlorophylle picophytoplancton (mg.m ⁻³)	Domaine 3D	0.172	0.158	-9×10 ⁻⁵	-0.003	-1.63%	0.160	+4×10 ⁻⁴	+0.013	+7.69%
	Domaine Surface	0.207	0.218	-4×10 ⁻⁴	-0.011	-5.13%	0.215	+7×10 ⁻⁴	+0.020	+9.63%
	Domaine Fond	0.168	0.164	-1×10 ⁻⁴	-0.003	-1.72%	0.164	+1×10 ⁻⁵	+2×10 ⁻⁴	+0.12%
	SOLEMIO colonne d'eau	0.146	0.111	+2×10 ⁻⁴	+0.005	+3.69%	0.116	+3×10 ⁻⁴	+0.009	+6.01%
	SOLEMIO Surface	0.150	0.127	-6×10 ⁻⁵	-0.002	-1.14%	0.123	+2×10 ⁻⁴	+0.006	+4.01%
	SOLEMIO Fond	0.180	0.145	+3×10 ⁻⁴	+0.008	+4.60%	0.148	+4×10 ⁻⁴	+0.017	+9.21%
Chlorophylle totale (mg.m ⁻³)	Domaine 3D	0.299	0.311	-8×10 ⁻⁵	-0.002	-0.84 %	0.313	+5×10 ⁻⁴	+0.016	+5.46%
	Domaine Surface	0.325	0.375	-4×10 ⁻⁴	-0.012	-3.60%	0.369	+9×10 ⁻⁴	+0.026	+8.09%
	Domaine Fond	0.394	0.454	-8×10 ⁻⁵	-0.002	-0.61%	0.459	-4×10 ⁻⁴	-0.012	-2.97%
	SOLEMIO colonne d'eau	0.297	0.272	+3×10 ⁻⁴	+0.009	+0.03%	0.280	+9×10 ⁻⁴	+0.028	+9.58%
	SOLEMIO Surface	0.271	0.267	-2×10 ⁻⁴	-0.005	-1.99%	0.254	+5×10 ⁻⁴	+0.015	+5.49%
	SOLEMIO Fond	0.469	0.543	+2×10 ⁻⁴	+0.005	+1.00%	0.542	+0.001	+0.037	+7.89%

Tableau 9 : Variation relative par rapport à la valeur de référence (simulations et données SOLEMIO) des variables du système des carbonates simulées durant la période 2021 à 2050 pour les RCP 2.6 et RCP 8.5. Pour les tendances et variations, les augmentations sont indiquées en rouge et les diminutions en bleu.

Variable	Localisation	Valeur moyenne 2021	RCP 2.6				RCP 8.5			
			Valeur moyenne sur 30 ans	Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans	Valeur moyenne sur 30 ans	Tendance par an	Variation sur 30 ans	% variation sur 30 ans
Alcalinité totale (mmol.m ⁻³)	Domaine 3D	2666.455	2662.431	-0.150	-4.490	-0.17 %	2660.007	-0.258	-7.746	-0.29%
	Domaine Surface	2678.631	2670.269	-0.107	-3.221	-0.12%	2666.241	-0.119	-3.562	-0.13%
	Domaine Fond	2664.640	2659.595	-0.179	-5.381	-0.20%	2657.604	-0.328	-9.846	-0.37%
	SOLEMIO colonne d'eau	2662.670	2659.750	-0.160	-4.799	-0.18%	2657.035	-0.305	-9.160	-0.34%
	SOLEMIO Surface	2664.909	2669.138	-0.169	-5.059	-0.19%	2655.791	-0.296	-8.896	-0.33%
	SOLEMIO Fond	2663.579	2659.483	-0.167	-4.997	-0.19%	2657.486	-0.328	-9.856	-0.37%
DIC (mmol.m ⁻³)	Domaine 3D	2365.185	2370.406	+0.175	+5.252	+0.22 %	2371.114	+0.258	+14.389	+0.61%
	Domaine Surface	2385.762	2398.774	+0.308	+9.244	+0.39%	2394.511	+0.972	+29.156	+1.22%
	Domaine Fond	2364.665	2368.199	+0.048	+1.454	+0.20%	2368.568	+0.144	+4.311	+0.18%
	SOLEMIO colonne d'eau	2356.985	2362.289	+0.175	+5.245	+0.22%	2362.904	+0.502	+15.072	+0.64%
	SOLEMIO Surface	2358.506	2365.520	+0.239	+7.179	+0.30%	2364.812	+0.721	+21.629	+0.92%
	SOLEMIO Fond	2361.719	2366.166	+0.042	+1.248	+0.05%	2366.017	+0.182	+5.471	+0.23%
pH	Domaine 3D	7.932	7.935	-5×10 ⁻⁴	-0.014	-0.18 %	7.924	-0.001	-0.037	-0.46%
	Domaine Surface	7.917	7.924	-7×10 ⁻⁴	-0.022	-0.28%	7.906	-0.002	-0.052	-0.66%
	Domaine Fond	7.952	7.938	-2×10 ⁻⁴	-0.006	-0.08%	7.933	-7×10 ⁻⁴	-0.021	-0.26%
	SOLEMIO colonne d'eau	8.114	8.113	-5×10 ⁻⁴	-0.014	-0.17%	8.104	-0.001	-0.038	-0.47%
	SOLEMIO Surface	8.103	8.100	-6×10 ⁻⁴	-0.019	-0.23%	8.086	-0.002	-0.049	-0.61%
	SOLEMIO Fond	8.123	8.115	-3×10 ⁻⁴	-0.008	-0.10%	8.112	-8×10 ⁻⁴	-0.023	-0.29%

Etat de saturation de CaCO₃	Domaine 3D	1.219	1.406	-0.002	-0.053	-4.33%	1.406	-0.002	-0.075	-6.17%
	Domaine Surface	1.250	1.476	-0.002	-0.062	-5.00%	1.505	-0.003	-0.088	-7.06%
	Domaine Fond	1.155	1.306	-6×10 ⁻⁴	-0.018	-1.52%	1.297	-0.001	-0.034	-2.98%
	SOLEMIO colonne d'eau	1.300	1.530	-0.003	-0.097	-7.48%	1.526	-0.004	-0.119	-9.14%
	SOLEMIO Surface	1.368	1.640	-0.003	-0.096	-6.99%	1.662	-0.004	-0.126	-9.18%
	SOLEMIO Fond	1.184	1.530	-0.002	-0.065	-5.51%	1.320	-0.002	-0.065	-5.53%
pCO₂ (µatm)	Domaine 3D	364.326	367.648	+0.476	+14.271	+3.92 %	375.515	+1.186	+35.570	+9.76%
	Domaine Surface	384.107	394.680	+0.712	+21.362	+5.56%	406.399	+1.890	+56.703	+14.76%
	Domaine Fond	355.240	365.503	+0.255	+7.664	+2.16%	369.300	+0.669	+20.081	+5.65%
	SOLEMIO colonne d'eau	369.329	370.482	+0.471	+14.139	+3.83%	379.164	+1.286	+38.567	+10.44%
	SOLEMIO Surface	381.616	385.469	+0.633	+18.994	+4.98%	400.432	+1.699	+50.962	+13.35%
	SOLEMIO Fond	360.154	367.729	+0.279	+8.372	+2.32%	370.426	+0.753	+22.380	+6.27%

4 Synthèse et Perspectives

4.1 Synthèse des principaux résultats

Les résultats obtenus dans cette étude (dont les limitations sont décrites dans la partie 4.3) sont les premiers effectués à l'échelle de la baie de Marseille avec un modèle local éprouvé lors de nombreuses applications dans la période actuelle. Cela permet d'avoir des prévisions décennales à plus petite échelle spatiale horizontale mais aussi verticale.

Il est possible d'en synthétiser les principaux points :

- Le mélange turbulent dans la baie de Marseille est plus lié au vent qu'aux stratifications thermohalines. Ainsi, la tendance est à la stabilité ou à une faible augmentation, sauf en surface et quand le forçage du vent diminue nettement comme à SOLEMIO pour le RCP 8.5, alors la stratification thermique et/ou haline domine ;
- La température de surface est à l'augmentation faible ($+0.006^{\circ}\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$) pour le RCP 2.6 et plus marquée ($+0.008^{\circ}\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$) pour le RCP 8.5 jusqu'en 2050. Elle présente des diminutions au fond, plus éloigné du réchauffement radiatif de surface et lieu d'upwelling d'eau profonde plus froide ;
- La salinité de surface est plus faible pour le RCP 2.6 que pour le RCP 8.5 qui a moins d'apports d'eau douce, les tendances sont à la diminution $\leq 0.008 \text{ PSU}\cdot\text{an}^{-1}$ pour le RCP 8.5 ;
- L'oxygène est plus faible pour le RCP 8.5 que pour le RCP 2.6, la tendance est à la diminution à toutes les profondeurs au point SOLEMIO, en surface en lien avec des diminutions liées aux intrusions du Rhône et la plus forte température, et au fond à cause du trop faible mélange jusqu'au fond en fin d'été ;
- Les nutriments sont très liés au forçage des apports par le Rhône, qui sont en diminution du fait des politiques de diminution des rejets de nutriments dans les rivières, encore présentes dans le RCP 2.6. Les nutriments sont en plus faibles concentrations qu'actuellement au point SOLEMIO, avec des valeurs proches des limites de détection (pour les valeurs mesurées actuellement à SOLEMIO se référer au tableau 5.7 de Barré, 2023). Cependant, la tendance est à l'augmentation durant les trente ans de la période simulée suivant les forçages des prévisions décennales, en particulier pour le RCP 8.5 (diminution de la quantité de nutriments rejetée par le Rhône moins soutenue à partir de 2040 pour le RCP 2.6 et augmentation de plus en plus soutenue pour le RCP 8.5) ;
- La chlorophylle totale reflète l'évolution des diatomées et du picophytoplancton. Les tendances sont à relier aux nutriments, qui sont à la diminution pour le RCP 2.6, alors que pour le RCP 8.5 ils sont à l'augmentation sauf au fond ;
- L'alcalinité totale est à la diminution, avec une diminution plus marquée pour le RCP 8.5 et au point SOLEMIO ;

- Le carbone inorganique dissous est à l'augmentation, avec une augmentation quasiment trois fois plus importante pour le scénario pessimiste RCP 8.5 ;
- Le pH est à la diminution, baisses surtout importantes en surface et pour le RCP 8.5, et relativement plus accentuées au point SOLEMIO ;
- L'indice de saturation du carbonate de calcium (défini par rapport à l'aragonite dans la présente étude, Encadré 1) présente des valeurs minimales de surface régulièrement en-dessous du seuil de dissolution de 1. La tendance est à la diminution sur l'ensemble du domaine et encore plus accentuée au point SOLEMIO, et surtout importantes en surface et pour le RCP 8.5 ;
- La $p\text{CO}_2$ marine est à l'augmentation surtout en surface et surtout pour le scénario RCP 8.5 qui correspond à une $p\text{CO}_2$ atmosphérique plus forte ;
- Le puits de CO_2 est à l'augmentation pour les deux scénarios, trois fois plus pour le RCP 8.5. Les tendances d'évolution temporelle des $p\text{CO}_2$ atmosphériques sur les trente ans pour les deux scénarios indiquent un rapport plus faible (2.6). Les résultats obtenus ne mettent donc pas en évidence un ralentissement du puits océanique de CO_2 dans la baie de Marseille dans les prévisions décennales d'ici 2050.

4.2 Comparaison des résultats obtenus sur la baie de Marseille avec la littérature

Dans cette partie, les tendances obtenues (Tableau 6 à Tableau 9) sont comparées aux résultats des études menées en Méditerranée occidentale. La majorité de ces études est effectuée pour la couche de surface, les comparaisons sont donc effectuées pour les tendances obtenues en surface.

4.2.1 Variables hydrodynamiques

4.2.1.1 Température (SST) modélisée

La température de surface dans la baie de Marseille est à l'augmentation d'environ $+0.25\text{ }^\circ\text{C}$ jusqu'en 2050 pour le RCP 8.5 qui est plus faible mais d'un ordre de grandeur en accord avec l'augmentation entre les valeurs déjà mesurées dans les observations entre 2000 et 2017 ($+0.74\text{ }^\circ\text{C}$) et les prévisions Med-Cordex pour le RCP 8.5 ($+1.3-0.74 = +0.56\text{ }^\circ\text{C}$), sachant que la zone de la baie de Marseille se trouve dans la fourchette (mode) basse où le réchauffement sera inférieur à l'ensemble du bassin Méditerranéen (MedECC, 2020a).

La tendance de la température de surface est à l'augmentation faible ($+0.005\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$) pour le RCP 2.6 et plus marquée ($+0.009\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$) pour le RCP 8.5 jusqu'en 2050. L'augmentation pour le RCP8.5 est en accord avec celle d'environ $+0.009\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{an}^{-1}$ pour cette zone en surface (MedECC 2020a ; Solidoro et al., 2022)

4.2.1.2 Salinité

Les salinités simulées dans l'ensemble du domaine et au point SOLEMIO sont plus importantes pour le RCP 2.6 que pour le RCP 8.5, ce qui est cohérent avec des apports en eau douce (fleuves, pluie) plus faibles pour le RCP 8.5. Les diminutions de salinité $\leq 0.008\text{ PSU}\cdot\text{an}^{-1}$ sont dans la fourchette prévue par les projections

Med-Cordex. Ces projections de tendances pour la salinité sont très incertaines et inhomogènes (positives ou négatives selon les modèles) comme le souligne le rapport du MedECC (2020a).

4.2.1.3 Coefficient de mélange vertical (Kz)

En Méditerranée, il existe peu de valeurs de coefficient de mélange vertical pour les années à venir. Cependant, le coefficient Kz est fortement lié au vent. L'étude des tendances obtenues dans la zone pour l'intensité et la fréquence des épisodes de Mistral peuvent donc donner une première indication sur l'évolution du coefficient Kz dans le futur.

Pour les vents locaux comme le Mistral, il est plus difficile d'obtenir des tendances pour les années à venir. Cependant, les modèles climatiques régionaux s'accordent sur le fait que dans les années à venir de faibles changements sont attendus pour ce dernier (Obermann-Hellhund et al. 2018 ; MedECC, 2020). En baie de Marseille, le mélange turbulent est plus lié au vent qu'aux stratifications thermohalines. On peut donc supposer que si les épisodes de Mistral sont aussi fréquents et intenses, peu de variations sur Kz devraient être observées dans les années à venir. Les variations obtenues dans cette étude paraissent donc justifiées.

4.2.2 Variables biogéochimiques

4.2.2.1 Oxygène

L'oxygène est plus faible pour le RCP 8.5 que pour le RCP 2.6, et la tendance est à la diminution à toutes les profondeurs au point SOLEMIO, en lien en surface avec des diminutions liées aux intrusions du Rhône et la plus forte température, et au fond à un trop faible mélange jusqu'au fond en fin d'été. Les résultats obtenus montrent donc une désoxygénation mais plus faible dans la baie de Marseille qu'en surface pour le bassin ouest de la Méditerranée où est observée une diminution de -5.7% en surface (Solidoro et al., 2020), ou encore d'environ 5 mmol.m⁻³ jusqu'en 2050 ($= > 0.1119 \text{ mL.L}^{-1}$) (Reale et al, 2022). Cette divergence peut être expliquée par la localisation de la baie de Marseille proche de l'embouchure du Rhône et donc particulièrement productive, mais aussi par les biais constatés dans notre modèle concernant la température située dans la fourchette basse et la production primaire qui est accentuée par un forçage de la lumière constant sur toute la journée (sans alternance jour/nuit).

4.2.2.2 Nutriments

Les résultats concernant les nutriments montrent des valeurs basses par rapport à la période actuelle, avec des valeurs plus fortes pour le RCP 8.5 pour l'ammonium mais plus faibles pour les nitrates et les phosphates, pouvant indiquer ainsi une production régénérée prédominante. Cependant, du fait des forçages du Rhône indiquant une tendance à l'augmentation au cours de la période simulée, les tendances suivent.

Pour les phosphates, pour le RCP 8.5 les valeurs de obtenues en surface (SOLEMIO : 1.85% - ensemble du domaine 23.62%) sont dans la même gamme d'augmentation publiée dans la littérature : 8.25% (Solidoro et al., 2020) et 13% (Reale et al., 2022).

Nous n'observons pas de diminution des nitrates au cours de la période, avec pourtant des valeurs plus faibles pour le RCP 8.5. Ceci est en accord avec Pages et al. (2020) qui n'observe pas de tendance claire pour les nutriments dans le bassin ouest de la Méditerranée jusqu'en 2050 ou également Reale et al. (2022) qui indique d'abord jusqu'en 2035 une augmentation ou une stabilité des nutriments, puis une diminution des nutriments qui ne commence qu'après 2050.

Pour l'ammonium, en surface, une tendance à l'augmentation comprise entre +0.44 et +24.95 % est obtenue sur la période étudiée. Cette tendance est différente de ce qui a déjà pu être obtenu en Méditerranée occidentale. Par exemple, Temino-Boes et al. (2021), n'observe pas de tendance claire pour l'ammonium dans les années à venir. Cette différence peut être expliquée par la présence du Rhône avec une tendance à l'augmentation du forçage de la concentration en NH_4 et qui influence fortement les résultats obtenus pour le domaine (mais beaucoup moins ceux obtenus à SOLEMIO, tendances inférieures à 1%).

4.2.3 Chlorophylle

L'augmentation de chlorophylle totale observée dans cette étude en surface est comprise dans une fourchette entre 5.46 % et +8.09 % (13.52 % à mi-profondeur = 23 m à SOLEMIO) est en accord avec la valeur d'environ 8.25 % montré en surface (0-25 m) par Solidoro et al. (2020).

Dans Reale et al. (2022), la chlorophylle est plutôt à la stabilité (faible diminution) au début de la simulation, puis à la nette diminution après 2035 (pour la couche 0-100 m) liée à la faible diminution des nutriments simulée dans leur étude (plutôt reliée à la convection profonde qui s'essouffle).

4.2.4 Variables du système des carbonates

Le phénomène d'acidification est particulièrement étudié en Méditerranée, ainsi les études proposant un suivi de l'évolution du pH de surface sont de plus en plus répandues (Goyet et al., 2016 ; Reale et al., 2020 ; Solidoro et al., 2022). Toutes s'accordent sur une tendance à la diminution du pH pour les prochaines années. Cependant, les valeurs de tendances obtenues dans ces études sont généralement plus marquées que la tendance obtenue ici. Par exemple, Goyet et al. (2016) indiquent une diminution du pH comprise entre -1.8×10^{-3} et -3.73×10^{-3} unité $\text{pH}\cdot\text{an}^{-1}$. Solidoro et al. (2020) indiquent également une diminution d'environ -1.2%. Dans les deux cas, ces tendances sont plus soutenues que la diminution obtenue ici (comprise entre -6×10^{-4} et -1.8×10^{-3} unité $\text{pH}\cdot\text{an}^{-1}$; comprise entre -0.23 et -0.66%). Cette observation peut également s'appliquer à Ω (diminution comprise entre -0.01 et $-0.03\cdot\text{an}^{-1}$ dans l'étude de Goyet et al. (2016) vs entre $-2.1 \times 10^{-3}\cdot\text{an}^{-1}$ et $-4.2 \times 10^{-3}\cdot\text{an}^{-1}$ dans cette étude).

Pour les autres variables, les tendances de la baie de Marseille sont également moins soutenues mais du même ordre de grandeur que celles obtenues en Méditerranée occidentale :

- Sur la période étudiée, la diminution d'alcalinité totale est comprise dans la fourchette de -0.13 % à - 0.33 %, plus faible que la valeur obtenue par Solidoro et al. (2020) d'environ - 0.485 %,

- L'augmentation de DIC est comprise dans la fourchette de +0.92 % à +1.22 %, plus faible que la valeur obtenue par Solidoro et al. (2020) d'environ +1.98%.

Dans la littérature actuelle, les études présentant des tendances de $p\text{CO}_2$ marine pour les années à venir sont beaucoup moins nombreuses. Cependant, Reale et al. (2022) indiquent également une tendance à l'augmentation de la $p\text{CO}_2$ marine soutenue.

4.2.5 Flux/puits de CO_2

L'estimation des flux de CO_2 sont sujets à de nombreuses incertitudes (Ulses et al., 2023). Les flux de CO_2 sont très dépendants du vent et un vent plus fort dans les prévisions peut augmenter l'effet de puits l'hiver (les vents les plus forts étant prévus plutôt l'hiver). Le RCP8.5 a tendance à être un puits plus intense de CO_2 car la $p\text{CO}_2$ atmosphérique est plus importante dans ce scénario ce qui favorise le flux de l'air vers la mer, la variabilité du vent est moins forte, mais l'intensité plus forte en moyenne sur l'ensemble du domaine, l'effet de la température ne se fait pas encore trop sentir jusqu'en 2050. Dans Barré et al. (2024a), il a déjà été montré que le flux de CO_2 air-mer est principalement lié à la différence de $p\text{CO}_2$ entre l'air et la mer (l'atmosphère et l'océan). Comme le modèle ECO3M-CarbOx est connu pour sous-estimer la $p\text{CO}_2$ (Barré, 2023), ces flux lors des prévisions décennales où la $p\text{CO}_2$ atmosphérique augmente, sont surestimés et il ne faut donc pas considérer leurs valeurs absolues. Cependant, il est très intéressant de regarder si ce puits de CO_2 va diminuer et dans quelles proportions comme l'indiquait Gattuso et al. (2015). Dans nos simulations, jusqu'en 2050 le rapport de la tendance d'évolution du puits de CO_2 dans l'océan entre les deux scénarios RCP 8.5 et RCP 2.6 considérés suit le rapport des tendances d'augmentation de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique, donc il n'y a pas encore de ralentissement du puits de CO_2 observé dans le scénario le plus pessimiste.

4.3 Limitations de ce travail de modélisation

Il faut garder à l'esprit, lorsque l'on considère les résultats de ce travail de prévisions décennales, qu'il est assujéti à de nombreuses incertitudes et donc que sa portée s'en trouve limitée. Tout d'abord, le modèle utilisé ECO3M-CarbOx reproduisait bien la dynamique saisonnière de la plupart des variables considérées ici mais présentait également certaines sur ou sous-estimation des variables modélisées. Les principales étaient une sous-estimation de la température, de la chlorophylle, de la $p\text{CO}_2$ et une surestimation de l'alcalinité totale et du carbone inorganique dissous (Barré, 2023).

De plus, le modèle a été développé pour reproduire des événements historiques à partir d'un forçage avec une fréquence horaire, permettant de reproduire la très forte variabilité des phénomènes se produisant dans la baie de Marseille et ainsi les comparer aux observations pour pouvoir quantifier la fiabilité des résultats, notamment sur la période 2017 à 2021 (Barré, 2023). Pour effectuer des prévisions décennales de trente ans, le modèle doit utiliser le forçage disponible pour les scénarios futurs qui est journalier. Ce forçage journalier ne rend pas compte de la forte variabilité diurne des forçages (notamment la lumière, le vent) et

peut accentuer certains phénomènes. Le modèle ECO3M-CarbOx qui a été développé pour des forçages dynamiques réalistes, changeant à haute fréquence bien inférieure à l'échelle diurne, a du mal à rester stable dans des conditions de forçage intenses prolongées. Notamment, lors de conditions nuageuses (journalières) ou de stratification thermique estivales prolongées qui conduisent à une diminution de l'oxygène, lorsque la photosynthèse est faible par rapport à la respiration. Ou encore lorsque les conditions de forts vents sont prolongées pendant plusieurs jours d'affilée, les conditions hydrodynamiques intenses et marquées en décollant, maintenues sur la durée peuvent induire des divergences de certaines variables. Lors de conditions lumineuses classiques, le fait de ne pas reproduire l'alternance jour-nuit, même avec un éclairage solaire moyen équivalent, va induire une poussée du phytoplancton au fond, qui ne serait pas possible (car limité par la lumière) si la nuit, l'aube et le crépuscule étaient simulés.

Le modèle de forçage atmosphérique choisi est celui du CNRM qui a participé au projet MED-Cordex (MedECC, 2020a et b). C'est la moyenne du membre r1i1p1 de la simulation d'ensemble qui a été utilisée car il n'était pas possible techniquement à cette échelle de résolution de faire tourner plusieurs jeux de forçages. De plus, le modèle du CNRM comparé aux autres modèles de projections climatiques est connu pour être dans la fourchette basse des projections des écarts à la normale de température de l'atmosphère et de leur variabilité. En effet, la Figure 46 montre que le modèle du CNRM choisi sous-estime les températures de surface de l'atmosphère par rapport au modèle de l'IPSL pour le RCP 8.5 et que jusqu'en 2050, l'effet des gaz à effet de serre sur l'augmentation de la température de surface reste faible comparé aux 50 années suivantes. Cette sous-estimation induit un forçage dans la fourchette basse de la température de surface de la mer à la bouée Lion (42.1°N, 4.7°E) par exemple (Ruti et al., 2016).

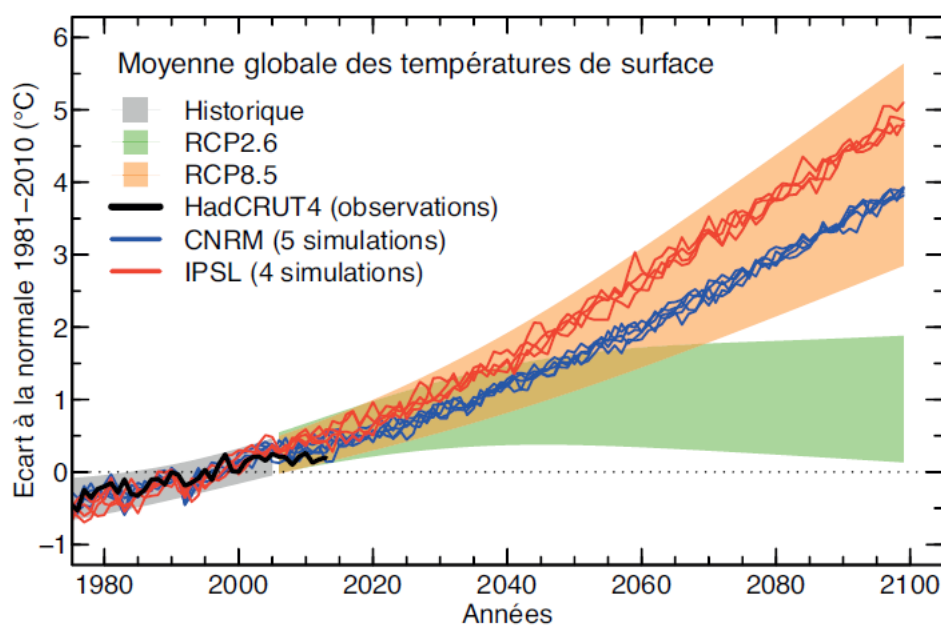


Figure 46 : Ecart à la normale 1981-2020 de la moyenne des températures de surface (°C) pour la fin du XXe siècle (gris), le scénarios RCP 2.6 (vert) et le scénario RCP 8.5 (orange). Les enveloppes tracées

(lissées par des fonctions splines) correspondent à un intervalle de confiance de 95% pour l'ensemble des modèles de climat ayant participé à l'exercice CMIP5, d'après (Boucher et al., 2015).

Les débits du Rhône en forçage présentent également moins de variabilité avec moins de points extrêmes (étiage et crues) mais sont globalement surestimés pour les deux scénarios, ce qui induit dans les prévisions futures beaucoup plus d'intrusions d'eau diluée du Rhône et une plus faible salinité associée. Les intrusions du Rhône en plein été avec des dessalures fortes sont très différentes de celles qui sont observées jusqu'à présent. Ce résultat est à prendre avec précaution, car pourrait être à relier aux incertitudes sur les forçages.

Cependant, les résultats montrent des tendances intéressantes sur la période de trente ans de prévisions décennales, mais qui restent faibles en général relativement aux erreurs intrinsèques du modèle, et qu'il faut donc prendre avec d'autant plus de précaution.

4.4 Conclusions et perspectives d'amélioration

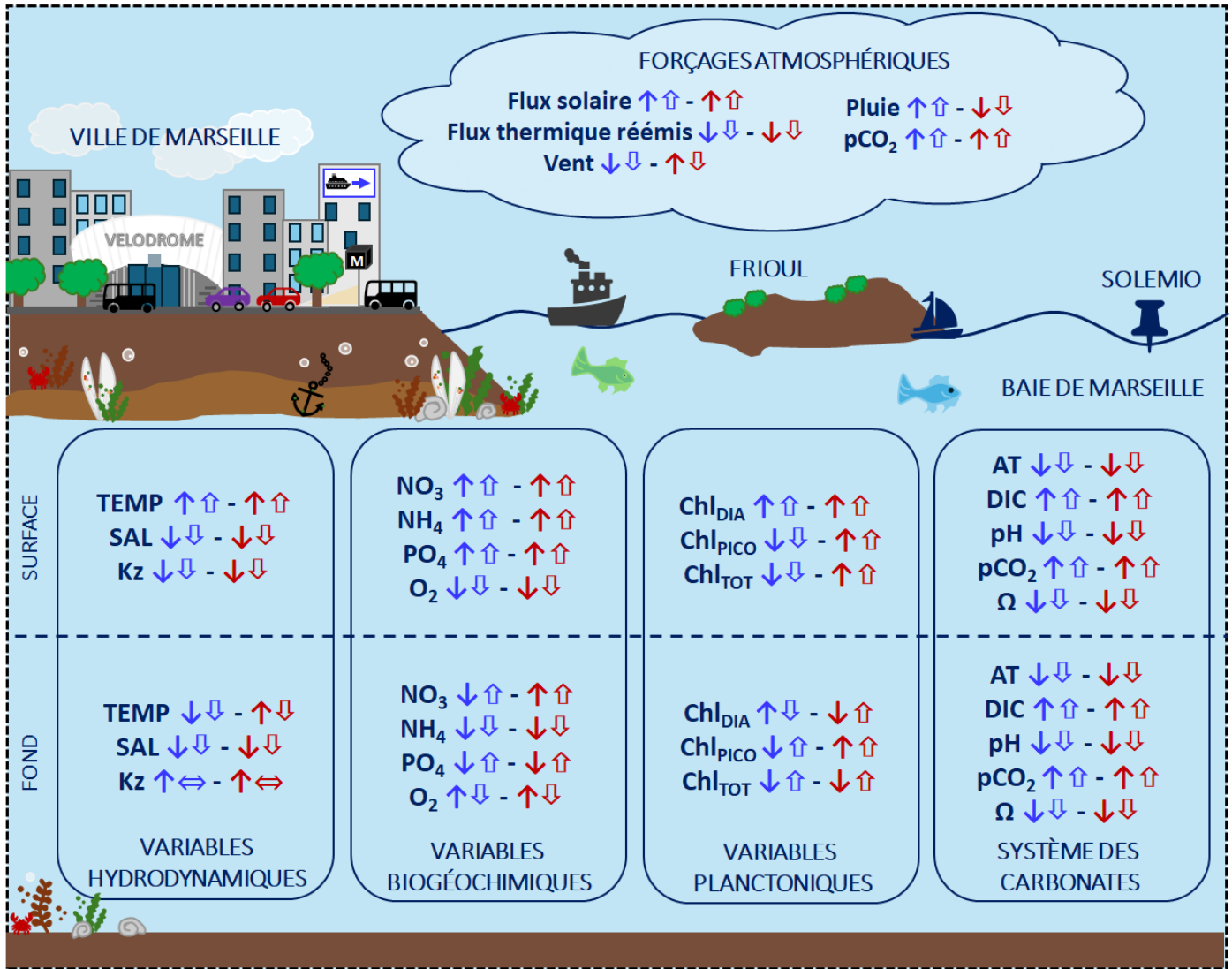
Les conclusions principales de ce travail sont rappelées par la Figure 47. Les résultats obtenus dans cette étude sont particulièrement intéressants car ce sont les premiers effectués à l'échelle de la baie de Marseille avec un modèle local éprouvé lors de nombreuses applications dans la période actuelle. Ainsi, cette étude nous a permis d'obtenir des prévisions décennales à plus petite échelle spatiale horizontale mais aussi verticale. Cependant, ces résultats doivent être utilisés en tenant compte des différentes limitations du modèle, mises en évidence dans la partie 4.3 et rappelées par la Figure 47 et peuvent donc être améliorés. Pour chacune des limitations, une perspective d'amélioration est proposée ci-dessous :

- **Correction des biais de modèle** : Le modèle utilisé dans cette étude a déjà été largement testé et amélioré (Barré, 2020 ; Barré, 2023). Cependant, des biais persistent sur la période historique (2017 – 2021). Ils sont difficiles à corriger car ils ne sont pas forcément visibles sur la version adimensionnelle du modèle (version préférentiellement utilisée pour la mise en place du modèle et la correction des biais) et n'interviennent qu'en 3D où de nombreuses variables entrent en jeu. Il est donc plus difficile d'identifier clairement l'origine de ces biais. Cependant, des hypothèses ont déjà pu être émises concernant la température, la chlorophylle et la $p\text{CO}_2$ (Barré, 2023).
- **Fréquence et stabilité du modèle** : Le modèle utilisé dans cette étude a été développé pour reproduire des événements historiques avec une fréquence de forçage horaire. Pour effectuer les prévisions décennales de trente ans, seul un forçage journalier était disponible. Ce forçage journalier ne rend pas compte de la forte variabilité diurne des forçages (notamment la lumière, le vent) et peut accentuer certains phénomènes, affectant ainsi la stabilité du modèle. Dans un premier temps, utiliser des fichiers de forçages tenant compte de l'alternance jour/nuit, pourrait permettre d'affecter la stabilité du modèle de façon moins importante.

- **Forçage atmosphérique** : Le choix du modèle de forçage atmosphérique est particulièrement important car les résultats obtenus en sont très dépendants. Ainsi, l'utilisation du modèle de forçage atmosphérique du CNRM, associé à l'augmentation de la température atmosphérique la plus faible, pourrait affecter les résultats obtenus dans cette étude. Utiliser un autre modèle de forçage atmosphérique permettrait d'obtenir un deuxième jeu de simulation à comparer avec celui obtenu dans cette étude afin d'évaluer l'effet du choix du modèle de forçage atmosphérique sur les résultats.
- **Plus de précision** : Pour obtenir des résultats plus précis dans la zone, la multiplication des jeux de simulation est indispensable. Ainsi, le modèle utilisé dans cette étude pourrait être lancé avec un modèle de forçage atmosphérique différent (Figure 46) ou un autre modèle utilisant le même modèle de forçage atmosphérique pourrait également être lancé dans la zone. De cette manière, les résultats sont plus nombreux et il est plus facile de savoir si un résultat n'est pas pertinent (ex : si plusieurs modèles s'accordent sur une tendance mais qu'un autre donne une tendance opposée).

Techniquement, ces perspectives d'amélioration peuvent être difficiles à mettre en place. Par exemple, le lancement de nouveaux jeux de simulation n'est pour le moment pas d'actualité car très chronophage (création des nouveaux fichiers de forçages, lancement des simulation année par année, correction des problèmes technique qui peuvent survenir...) et difficilement réalisable sur le cluster de calcul utilisé dans cette étude. A titre d'exemple, seulement pour les simulations de prévision décennales présentées dans cette étude trois années de travail dont une uniquement dédiée au lancement des simulations, année après année pour les deux scénarios, ont été nécessaires.

Des premiers résultats intéressants...



... à utiliser avec précaution

- ⚠ Des biais de modèle identifiés
- ⚠ Un modèle de forçage atmosphérique relativement faible
- ⚠ Une fréquence plus faible qui impacte la stabilité du modèle

↑↓ Variation pour tout le domaine
 ↑↓ Variation à SOLEMIO
 ↔ Pas de variations
 — RCP 2.6
 — RCP 8.5

Figure 47: Schéma récapitulatif des tendances obtenues pour tout le domaine et SOLEMIO, en surface et au fond et rappel des principales limitations de ce travail de modélisation.

5 Remerciements

Nos remerciements vont à tous les acteurs qui ont permis la réalisation de ce projet :

- L'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse qui a financé ces travaux,
- L'Institut Méditerranéen d'Océanographie (MIO, France) qui a fourni un cadre de travail interdisciplinaire. Il a été mené en collaboration avec les Drs. Frédéric DIAZ (MIO-AMU) et Christel PINAZO (MIO-AMU) ayant pour spécialité la modélisation couplée physique et biogéochimique. Une interaction cruciale a eu lieu avec le Thibaut WAGENER (MIO-AMU) spécialisé dans les mesures *in situ* des paramètres physico-chimiques du système des carbonates. Cette collaboration a permis à Lucille Barré de mener à bien son travail de Doctorat.
- Le Service d'Observation en MILieu Littoral (SOMLIT) qui a autorisé l'utilisation des données SOLEMIO, les membres de l'équipage du RV Antedon II (DT-INSU), l'équipe de la plateforme SAM (Service Atmosphère Mer) du MIO pour l'aide sur le terrain et a Michel Lafont et Véronique Lagadec de la Plateforme Analytique de Chimie des Environnements Marins (PACEM) du MIO, qui ont réalisé les analyses,
- Le service SNAPO-CO₂ de LOCEAN (CNRS-INSU et OSU Ecce-Terra) pour les analyses des variables du système des carbonates,
- Le réseau TMEDNET, en particulier à Dorian Guillemain, pour les données de température à Planier,
- La plateforme "Cluster de calcul intensif HPC" de l'OSU Institut Pytheas (Aix-Marseille Université, INSU-CNRS), en particulier Julien Lecubin,
- Le programme national MOOSE (Mediterranean Oceanic Observing System on Environment) et la compagnie Nationale du Rhône qui ont fourni toutes les données nécessaires à la paramétrisation du Rhône (débits et concentrations),
- La métropole Aix- Marseille Provence MAMP et SERAMM pour les données de concentrations et débits des rejets urbains et sur la gestion du réseau de traitement des eaux usées (www.seram-metropole.fr),
- METEOFRANCE pour les données météorologiques,
- La société régionale travaillant sur la qualité de l'air, ATMOSUD (<https://www.atmosud.org>),
- MED-Cordex : Les simulations atmosphériques utilisées dans ce travail (notamment les composantes des vecteurs vitesse du vent) ont été téléchargées depuis la base de données Med-CORDEX <https://www.medcordex.eu>. Med-CORDEX est une contribution coordonnée à CORDEX qui est soutenue par les programmes internationaux HyMeX www.hymex.org et MedCLIVAR.
- Nous remercions le Programme mondial de recherche sur le climat qui, par l'intermédiaire de son groupe de travail sur la modélisation couplée, a coordonné et promu le CMPI5 et le CMIP6. Nous remercions les groupes de modélisation climatique d'avoir produit et mis à disposition leurs

résultats de modèle, la Earth System Grid Federation (ESGF) d'avoir archivé les données et d'en avoir fourni l'accès, ainsi que les multiples agences de financement qui soutiennent les CMIP5, CMIP6 et l'ESGF.

6 Références bibliographiques

- Alcaïno, A., Vidal, L., Licari, L., Paillès, C., Conrod, S., Dauvier, J., Chevalier, C., Pinazo, C., Grelaud, M., & Ziveri, P. (2024). Influence of the Rhone River intrusion on microplastic distribution in the Bay of Marseille. *Regional Studies in Marine Science*, 73, 103457, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103457>.
- Aminot, A., & Kérouel, R. (2007). *Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines: méthodes en flux continu*. Editions Quae.
- 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. Supplement information: Figures of the IAMM Project Report. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13807735>
- Barré, L., Diaz, F., Wagener, T., & Pinazo, C. (2024c). 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. 1-13, <https://hal.science/hal-04702002>.
- 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>.

- Bednaršek, N., Tarling, G. A., Bakker, D. C., Fielding, S., & Feely, R. A. (2014). Dissolution dominating calcification process in polar pteropods close to the point of aragonite undersaturation. *PloS one*, 9(10), e109183, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109183>.
- Berg, P., Photiadou, C., Bartosova, A., Biermann, J., Capell, R., Chinyoka, S., Fahleson, T., Franssen, W., Hundecha, Y., Isberg, K., Ludwig, F., Mook, R., Muzuusa, J., Nauta, L., Rosberg, J., Simonsson, L., Sjökvist, E., Thuresson, J., & van der Linden, E. (2021). Hydrology related climate impact indicators from 1970 to 2100 derived from bias adjusted European climate projections. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, DOI: 10.24381/cds.73237ad6 (Last Access on 12-06-2024).
- 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.
- Borges, A. V., & Gypensb, N. (2010). Carbonate chemistry in the coastal zone responds more strongly to eutrophication than ocean acidification. *Limnology and Oceanography*, 55(1), 346-353, <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.1.0346>.
- Borges, A. V. (2011). Present day carbon dioxide fluxes in the coastal ocean and possible feedback under global change. *Oceans and the atmospheric carbon content*, 47-77, doi: 10.1007/978-90-481-9821-4_3.
- 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).
- Chevalier, C., Vandenberghe, M., Pagano, M., Pellet, I., Pinazo, C., Onrubia, J. A. T., Guilloux, L. & Carlotti, F. (2023). Investigation of dynamic change in microplastics vertical distribution patterns: The seasonal effect on vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin*, 189, 114674, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114674>.
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2021): CMIP6 climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.c866074c (Last Access on 07-06-2024).
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2019): CORDEX regional climate model data on single levels. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.bc91edc3 (Accessed on 10-06-2024).
- 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>.

- Dore, J. E., Lukas, R., Sadler, D. W., Church, M. J., & Karl, D. M. (2009). Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(30), 12235-12240, <https://doi.org/10.1073/pnas.0906044106>.
- 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>.
- 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., Luijkx, 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>.
- Frayse, M., Pinazo, C., Faure, V. M., Fuchs, R., Lazzari, P., Raimbault, P., & Pairaud, I. (2013). Development of a 3D coupled physical-biogeochemical model for the Marseille coastal area (NW Mediterranean Sea): what complexity is required in the coastal zone?. *PLoS One*, *8*(12), e80012, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080012>.
- 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, doi:10.1002/2014JC010022.

- 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).
- Hassoun, A. E. R., Bantelman, A., Canu, D., Comeau, S., Galdies, C., Gattuso, J. P., Giani, M., Grelaud, M., Hendricks, I. E., Ibello, V., Idrissi, M., Krasakopoulou, A., Shaltout, N., Solidoro, C., Swarzenski, P. W., & Ziveri, P. (2022). Ocean acidification research in the Mediterranean Sea: Status, trends and next steps. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 892670, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.892670>.
- 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. Doi : <https://doi.org/10.5194/gmd-14-295-2021>
- Laruelle, G. G., Dürr, H. H., Slomp, C. P., & Borges, A. V. (2010). Evaluation of sinks and sources of CO₂ in the global coastal ocean using a spatially-explicit typology of estuaries and continental shelves. *Geophysical Research Letters*, *37*(15), <https://doi.org/10.1029/2010GL043691>.
- 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>.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F. M., Hoppema, M., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Johannessen, T., Jones, C. D., Kato, E., Keeling, R. F., Goldewijk, K. K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregon, A., Peters, W., Peylin, P., Pfiel, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., Wright, R., Zaehle, S., & Zheng, B. (2018). Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, *10*(4), 2141-2194, <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>.

- Le Masson J. 1995 . Mesures de pollution par temps de pluie à Marseille. Rapport SERAM. 20pp.
- Le Masson J. 1997. Mesures de pollution par temps de pluie à Marseille entre 1992 et 1996 --Synthèse -- Rapport SERAM. 34pp
- Le Masson J. 1998. Mesures de pollution par temps de pluie à Marseille. Rapport SERAM. 17pp
- Livanou, E., Oikonomou, A., Psarra, S., & Lika, K. (2021). Role of mixotrophic nanoflagellates in the Eastern Mediterranean microbial food web. *Marine Ecology Progress Series*, 672, 15-32, <https://doi.org/10.3354/meps13782>.
- Luyten, P., & De Mulder, T. (1992). A module representing surface fluxes of momentum and heat. MUMM's contribution to MAST-0050-C. Technical report 9. *Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea and Scheldt Estuary*.
- 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 laMediterranée, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, 35pp.
- Meier, K. J. S., Beaufort, L., Heussner, S., & Ziveri, P. (2014). The role of ocean acidification in *Emiliania huxleyi* coccolith thinning in the Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 11(10), 2857-2869, <https://doi.org/10.5194/bg-11-2857-2014>.
- 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, [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(90\)90065-T](https://doi.org/10.1016/0278-4343(90)90065-T).
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi K., & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. doi:10.5194/gmd-9-3461-2016.

- Obermann-Hellhund, A., Conte, D., Somot, S., Torma, C. Z., & Ahrens, B. (2018). Mistral and Tramontane wind systems in climate simulations from 1950 to 2100. *Climate dynamics*, 50, 693-703, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3635-8>.
- Oikonomou, A., Livanou, E., Mandalakis, M., Lagaria, A., & Psarra, S. (2020). Grazing effect of flagellates on bacteria in response to phosphate addition in the oligotrophic Cretan Sea, NE Mediterranean. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(6), f1aa086, <https://doi.org/10.1093/femsec/f1aa086>.
- Ólafsson, J., Ólafsdóttir, S. R., Benoit-Cattin, A., Danielsen, M., Arnarson, T. S., & Takahashi, T. (2009). Rate of Iceland Sea acidification from time series measurements. *Biogeosciences*, 6(11), 2661-2668, <https://doi.org/10.5194/bg-6-2661-2009>.
- Pagès, R., Baklouti, M., Barrier, N., Ayache, M., Sevault, F., Somot, S., & Moutin, T. (2020). Projected effects of climate-induced changes in hydrodynamics on the biogeochemistry of the Mediterranean Sea under the RCP 8.5 regional climate scenario. *Frontiers in Marine Science*, 7, 563615. doi: 10.3389/fmars.2020.563615.
- Pairaud, I. L., Gatti, J., Bensoussan, N., Verney, R., & Garreau, P. (2011). Hydrology and circulation in a coastal area off Marseille: Validation of a nested 3D model with observations. *Journal of marine systems*, 88(1), 20-33, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.02.010>.
- 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>
- Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O., Liss, P., Riebesell, U., Shepherd, J., Turley, C., & Watson, A. (2005). *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*. The Royal Society.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.022>.
- Rossi, V., Lo, M., Legrand, T., Ser-Giacomi, E., de Jode, A., Thierry De Ville D'avray, L., Pairaud, I., Faure, V., Fraysse, M., Pinazo, C., & Chenuil, A. (2020). Small-scale connectivity of coralligenous habitats: insights from a modelling approach within a semi-opened Mediterranean bay. *Vie et milieu-life and environment*, 70(3-4), 161-174, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00680/79225/>.

Ruti, P. M., Somot, S., Giorgi, F., Dubois, C., Flaounas, E., Obermann, A., Dell'Aquila, A., Pisacane, G., Harzallah, A., Lombardi, E., Ahrens, B., Akhtar, N., Alias, A., Arsouze, T., Aznar, R., Bastin, S., Bartholy, J., Béranger, K., Beuvier, J., Bouffies-Cloch e, S., Brauch, J., Cabos, W., Calmanti, S., Calvet, J.-C., Carillo, A., Conte, D., Coppola, E., Djurdjevic, V., Drobinski, P., Elizalde-Arellano, A., Gaertner, M., Galán, P., Gallardo, C., Gualdi, S., Goncalves, M., Jorba, O., Jord a, G., L'Heveder, B., Lebeaupin-Brossier, C., Li, L., Liguori, G., Lionello, P., Maci as, D., Nabat, P., Onol, B., Raikovic, B., Ramage, K., Sevault, F., Sannino, G., Struglia, M. V., Sanna, A., Torma, C., Vervatis, V. (2016). MED-CORDEX initiative for Mediterranean Climate studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97(7), 1187-1208, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176.1>.

Schaeffer, A., Garreau, P., Molcard, A., Frauni e, P., & Seity, Y. (2011). Influence of high-resolution wind forcing on hydrodynamic modeling of the Gulf of Lions. *Ocean Dynamics*, 61, 1823-1844, <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0442-3>.

Schmidt, N., Fauvelle, V., Castro-Jiménez, J., Lajaunie-Salla, K., Pinazo, C., Yohia, C., & Sempere, R. (2019). Occurrence of perfluoroalkyl substances in the Bay of Marseille (NW Mediterranean Sea) and the Rhône River. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110491. Sen, P. K., 1968: Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379–1389, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110491>.

Solidoro, C., Cossarini, G., Lazzari, P., Galli, G., Bolzon, G., Somot, S., & Salon, S. (2022). Modeling carbon budgets and acidification in the Mediterranean Sea ecosystem under contemporary and future climate. *Frontiers in Marine Science*, 8, 781522, doi: 10.3389/fmars.2021.781522.

Somot, S., Ruti, P., Ahrens, B., Coppola, E., Jord a, G., Sannino, G., & Solmon, F. (2018). Editorial for the Med-CORDEX special issue. *Climate Dynamics*, 51, 771-777, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4325-x>

Speich, S., Reverdin, G., Mercier, H., & Jeandel, C. (2015). L'océan, r eservoir de chaleur. In OCEAN ET CLIMAT, 2015 – Fiches scientifiques océan-climat, 128 pp. <https://ocean-climate.org/presentation-des-fiches-scientifiques-ocean-et-climat/>, p: 8-13.

Temino-Boes, R., García-Bartual, R., Romero, I., & Romero-Lopez, R. (2021). Future trends of dissolved inorganic nitrogen concentrations in Northwestern Mediterranean coastal waters under climate change. *Journal of Environmental Management*, 282, 111739, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111739>.

Ulses, C., Estournel, C., Marsaleix, P., Soetaert, K., Fourier, M., Coppola, L., Lefèvre, D., Touratier, F., Goyet, C., Guglielmi, V., Kessouri, F., Testeur, P., & Durrieu de Madron, X. (2023). Seasonal dynamics and annual budget of dissolved inorganic carbon in the northwestern Mediterranean deep-convection region. *Biogeosciences*, 20(22), 4683-4710, <https://doi.org/10.5194/bg-20-4683-2023>.