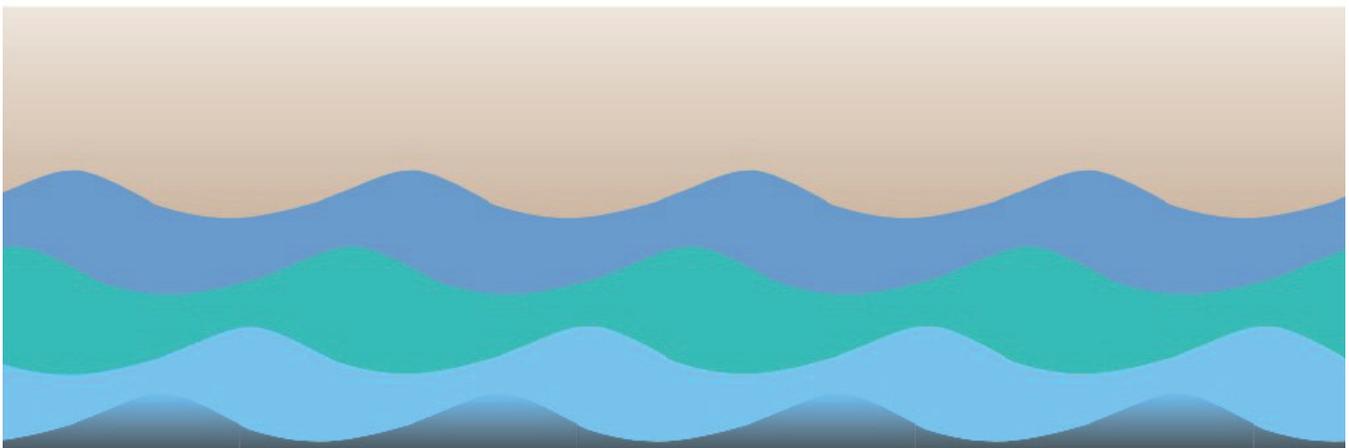


# COMITÉ SCIENTIFIQUE CONSULTATIF DE MÉTÉO-FRANCE



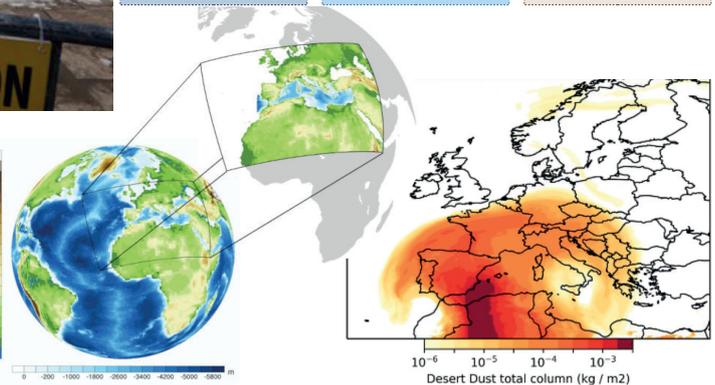
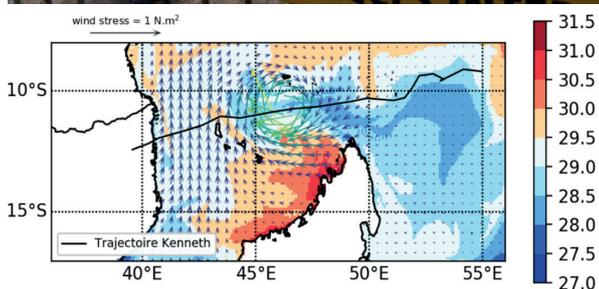
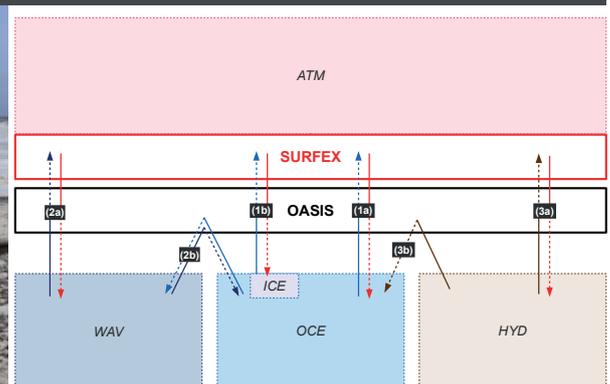
**Application de la Recherche à l'Opérationnel pour l'assemblage d'AROME avec des Systèmes Environnementaux**

Cindy Lebeau-pin Brossier, Vincent Guidard, CNRM, Météo-France - CNRS, Toulouse, France

avec la contribution de nombreux collègues participant aux projets transverses AROBASE et ACCALMIE



# 2023



## Résumé

Dans le cadre de son objectif d'amélioration constante des outils de prévision et systèmes de modélisation pour la compréhension, le suivi et l'anticipation des phénomènes météorologiques et du climat, Météo-France a engagé plusieurs actions transverses au travers du CNRM, dont l'une vise plus particulièrement à progresser dans le réalisme des simulations par l'assemblage et la représentation fine des interactions complexes entre différents compartiments du système environnemental à l'échelle kilométrique. Ce document présente le contexte, les verrous et les étapes de développement permettant les couplages du modèle de prévision numérique du temps à échelle kilométrique, AROME, avec des systèmes environnementaux, pour des applications de la recherche à l'opérationnel.

Le projet transverse AROBASE<sup>1</sup> a pour objectif l'assemblage autour d'AROME d'un système de modélisation multi-couplé à fine échelle de l'atmosphère, de l'océan (incluant potentiellement la glace de mer et la biogéochimie marine), des vagues et des surfaces continentales (sol, végétation, villes, neige, lacs et rivières). Pour le couplage physico-chimique de l'atmosphère, AROBASE s'appuie sur le projet transverse ACCALMIE<sup>2</sup> qui vise la construction d'une interface standard permettant de coupler un modèle d'aérosols avec les émissions et le dépôt, la chimie gazeuse conduisant à la formation de certains aérosols, le transport (résolu et sous-maille) des espèces, la microphysique nuageuse et le transfert radiatif.

L'outil numérique de recherche développé vise à améliorer la compréhension et la représentation des processus d'échanges entre les compartiments du système météorologique et environnemental à l'échelle kilométrique. Les critères importants de développement sont le caractère transportable du modèle multi-couplé régional et l'aspect modulaire de l'assemblage de manière à insérer les composantes environnementales pertinentes selon différentes applications. Les choix des modèles inclus ont été définis à partir de l'expertise en interne ou grâce à des collaborations inscrites dans le projet transverse, et également de manière à conserver un continuum sans couture de modélisations couplées au CNRM. Le système assemblé préparera ainsi les couplages de la nouvelle génération du modèle de climat régional.

Le système s'inscrit comme un nouvel outil pour la prévision numérique, en s'insérant dans les outils de productions, les méthodes d'analyse et les utilisations dédiés. Cette application rend particulièrement nécessaire d'assurer la performance du système et de garantir sa pertinence pour la surveillance et l'anticipation des phénomènes météorologiques et de leurs conséquences. Le projet devra par ailleurs faciliter au mieux l'insertion de nouvelles méthodes de calcul et anticiper l'utilisation de nouvelles architectures de calcul intensif. Le nouveau système numérique couplé offrira enfin de nouvelles opportunités pour des applications aval à valeur ajoutée, plus intégrées et plus cohérentes, une plus large exploitation des observations existantes des composantes du système Terre et la préparation de l'arrivée de nouvelles observations et de leur assimilation.

---

1. *Application de la Recherche à l'Opérationnel pour l'assemblage d'AROME avec des Systèmes Environnementaux*

2. *Approche Coordonnée pour la Chimie et les Aérosols dans Les Modèles du CNRM, Inline et offline*

# Sommaire

<b>1 Motivations</b>	<b>1</b>
<b>2 État de l'art</b>	<b>5</b>
2.1 Systèmes couplés régionaux et enseignements sur l'impact des couplages . . . . .	5
2.1.1 Le système couplé UKC4 du MetOffice (Royaume-Uni) . . . . .	5
2.1.2 Le système couplé de recherche COAWST (États-Unis d'Amérique) . . .	7
2.1.3 La plateforme RegIPSL . . . . .	8
2.1.4 Couplages avec le modèle MESO-NH . . . . .	10
2.2 Modélisation du climat à Météo-France . . . . .	13
2.3 État actuel des couplages dans les systèmes de prévision numérique à Météo-France	16
2.3.1 Prévision saisonnière et sub-saisonnière . . . . .	16
2.3.2 Prévision numérique du temps . . . . .	16
2.3.3 Prévision marine . . . . .	18
2.3.4 Composition atmosphérique . . . . .	18
2.4 Couplages au CEPMMT . . . . .	19
2.4.1 Atmosphère-Vagues-Océan . . . . .	19
2.4.2 Chimie en ligne et aérosols interactifs : . . . . .	19
<b>3 Développement du système AROBASE</b>	<b>21</b>
3.1 Développements en cours de systèmes couplés à fine échelle basés sur AROME .	21
3.2 Plan de travail du projet AROBASE . . . . .	28
3.2.1 Assemblage d'un outil de recherche . . . . .	28
3.2.2 Système pour la prévision numérique . . . . .	31
3.2.3 Synergie avec les observations . . . . .	32
3.3 Moyens, cadre programmatique et projets structurants . . . . .	34
3.3.1 ACCORD . . . . .	34
3.3.2 PEPR TRACCS . . . . .	35
3.3.3 Autres projets de recherche et cadres collaboratifs . . . . .	36
<b>4 Perspectives</b>	<b>38</b>
<b>Références</b>	<b>40</b>
<b>A Glossaire</b>	<b>47</b>

## Avant-propos

L'ajout de la représentation de processus d'interactions de plus en plus complexes est une voie importante pour gagner en réalisme dans les systèmes numériques quelle que soit l'échelle considérée.

Ce document vise à décrire des étapes pour l'assemblage autour du modèle AROME de différents modèles régionaux représentant différentes composantes environnementales à échelle kilométrique.

L'assemblage consiste à formaliser des échanges d'information entre deux (ou plus) outils numériques (ou modèles).

À l'échelle régionale, on parlera de *systèmes multi-couplés* et de *compartiments* du système Terre ou environnemental; le terme "modèle du système Terre" (ESM, pour '*Earth System Model*') est ici uniquement réservé à une catégorie spécifique de modèles *globaux* (au sens *planétaires*) représentant de manière fermée les cycles bio-géochimiques et principalement celui du carbone.

Pour plus de clarté, le terme *couplage (interactif)* désigne ici l'échange d'information bidirectionnel entre deux systèmes numériques résolvant différents systèmes d'équations. Dans le cas d'échanges unidirectionnels, on parlera de *forçage(s)*. Ainsi (et sauf pour des cas très spécifiques d'emboîtement appelé dans la communauté de modélisation '*two-way nesting*'), un modèle à aire limitée est *forcé* à ses limites latérales par un modèle de plus grande emprise.

Un *coupleur* désigne ici un outil numérique facilitant les échanges d'information entre au moins deux systèmes numériques distincts.

Un système de modélisation couplé pourra parfois aussi être qualifié de *système intégré*, notamment dans le cas où l'assemblage passe par l'intégration de codes ressources en un seul code.

Pour plus de clarté, un glossaire est disponible à la fin du document (annexe A) pour introduire les noms explicites des différents modèles cités, ainsi que les différents sigles utilisés dans le texte.

# 1 Motivations

Les aléas météorologiques et environnementaux induisent des risques majeurs auxquels est confrontée la société. En France, neuf évènements dommageables sur dix résultent de phénomènes météorologiques (vents forts, inondations, submersions marines, érosion côtière, mouvements de terrain, avalanches, feux de forêt)<sup>3</sup>. Les situations météorologiques qui en sont à l'origine (tempêtes et cyclones, orages et évènements fortement précipitants, canicules et sécheresses) s'intensifient pour la plupart sous l'effet du changement climatique. Par ailleurs, et malgré une tendance à l'amélioration de la qualité de l'air au cours des 20 dernières années, la pollution atmosphérique continue d'exercer une forte influence sur la santé et l'environnement, qui engendrent des coûts élevés pour la société. Les polluants de l'air proviennent en minorité de phénomènes d'origine naturelle (soulèvement de poussières (désertiques) par le vent, érosion des sols, émissions bio-organiques (pollens), éruptions volcaniques...) et en majorité des activités humaines (industrie, agriculture, transport, résidentiel).

La vulnérabilité de la société à l'ensemble de ces aléas est en évolution croissante, plus particulièrement dans les zones sensibles et à enjeux que constituent notamment les zones insulaires et côtières, et les zones urbaines du fait de leur densité de population et les activités économiques associées (transport, production d'énergie, tourisme...). Il existe donc de plus en plus d'attentes concernant la précision des prévisions de ces phénomènes, en terme de localisation, de chronologie et de sévérité, en intégrant les impacts.

Certains évènements récents ont montré l'incapacité de nos systèmes de prévision actuels à répondre pleinement à certaines de ces attentes du fait de l'absence de prise en compte des interactions entre ces compartiments météorologiques et environnementaux. Par exemple, l'absence dans nos modèles de prévision numérique du temps d'une représentation explicite des poussières désertiques n'a pas permis de prendre en compte leur impact radiatif lors des nombreux évènements au printemps 2022 sur la France métropolitaine, conduisant à des erreurs dans l'estimation du rayonnement solaire incident ainsi qu'en terme de prévision de température.

Les études sur les cyclones tropicaux ont largement démontré le rôle important du contenu de chaleur océanique qui joue sur l'alimentation en énergie de ces systèmes tout le long de leur cycle de vie. Dans ces situations, une représentation trop simplifiée de l'océan ne permet pas de reproduire les évolutions rapides liées notamment aux processus de remontées océaniques profondes conduisant à du refroidissement intense jusqu'en surface. L'absence des interactions avec les vagues, pourtant à l'origine de la formation locale d'embruns et de sels marins, est également une source importante d'erreurs pour la représentation de la structure microphysique et précipitante des cyclones, comme pour la prévision d'autres phénomènes de vent fort telles que les tempêtes des moyennes- et hautes-latitudes pour lesquelles les échanges de quantité de mouvement, de chaleur et d'eau sont essentiels, notamment au moment de leur intensification.

---

3. Source : MTES/DGPR/SRNH et BARPI, BD Gaspar, derniers arrêtés pris en compte, publiés au Journal officiel le 24/09/2017; AFP; CCR; FFSA/GEMA; Météo-France. Données accessibles sur le portail citoyens <https://www.notre-environnement.gouv.fr/rapport-sur-l-etat-de-l-environnement/themes-ree/risques-nuisances-pollutions/risques-naturels/vue-d-ensemble/article/les-risques-naturels-majeurs-en-france>

Dans les situations de vent faible, une mauvaise représentation des contrastes air-mer-continent conduit à de larges incertitudes pour la représentation des échanges verticaux et horizontaux, avec des conséquences sur la capacité des modèles à reproduire les circulations locales (phénomènes de brise parfois accompagnés de convection) ou la formation/dissipation de nuages bas et brouillards côtiers.

A l'échelle climatique, il existe différentes illustrations des manques actuels, comme la non prise en compte de l'impact indirect des aérosols sur le cycle de vie des nuages, l'absence de représentation des vagues jouant sur les échanges sous forme turbulente ou encore la non-représentation des effets anthropiques de surface (e.g. villes, barrages, irrigation, agriculture) sur les cycles énergétiques, hydrologiques et biogéochimiques.

Dans l'objectif de progresser vers de nouvelles générations de systèmes numériques et répondre aux besoins croissants d'informations météorologiques et climatiques, et parmi plusieurs pistes complémentaires possibles d'amélioration (par exemple par la réalisation de simulations d'ensemble ou une augmentation de la résolution), l'ajout d'une représentation des processus en forte interaction avec l'atmosphère est une voie importante permettant un gain en réalisme, au travers d'une meilleure estimation des échanges et des rétroactions. Pour ces raisons, et en cohérence avec la stratégie scientifique de Météo-France pour la période 2022-2030, le Contrat d'Objectifs et de Performance (COP) de Météo-France pour la période 2022-2026 prévoit que : *"Pour ce qui concerne la modélisation numérique, l'établissement développera un modèle régional intégré (Système Terre), basé sur AROME à l'échelle kilométrique, couplant les divers compartiments (atmosphère, surfaces continentales, océans, vagues, composition atmosphérique...) de notre environnement. Ce système s'interfacera avec les outils de modélisation et prévision à échelle planétaire"*. Notons par ailleurs que cette perspective est cohérente avec les perspectives scientifiques 2017-2022 de la communauté nationale de recherche Océan-Atmosphère : *"Les modèles développés dans la communauté vont vers une meilleure représentation des couplages entre chimie et météorologie, mais également à l'interface avec la surface. Outre cette approche couplée, la nécessité d'une meilleure intégration des échelles pour une meilleure représentation du transport, de l'évolution de la composition chimique des panaches au cours du transport et de leurs impacts (sur les bilans de pollutions et les bilans radiatifs sur une échelle régionale, voire globale) paraît toujours primordiale. Un effort doit être fourni pour améliorer et valider la modélisation des événements précipitants, y compris leur effet sur les flux de matière et le lessivage des polluants de l'atmosphère"*. Les textes de prospective 2023-2027 sont actuellement en phase de finalisation.

Le développement autour d'AROME d'un système multi-couplé à échelle kilométrique, nommé AROBASE, a pour objectif de répondre à ces besoins, dans le but de mieux anticiper les aléas météorologiques, ainsi que les impacts et risques associés, tout comme leur évolution future sous l'action du changement climatique. Le projet AROBASE, décrit dans ce document, vise à mettre en œuvre cet engagement de Météo-France dans le cadre de son COP, qui s'inscrit dans un cadre de collaborations avec d'autres acteurs académiques.

Les modèles de climat, en particulier les modèles du système Terre (ESM), intègrent déjà de nombreux couplages qui permettent de prendre en compte les interactions et les boucles de rétroactions complexes entre les différentes composantes des cycles climatiques. Cependant, leur résolution spatiale (typiquement 100 km) induit une représentation plutôt grossière de la surface – le relief, le trait de côtes mais aussi de l’occupation des sols (les différentes zones naturelles, les zones agricoles, urbanisées,...) – et les phénomènes météorologiques d’échelle inférieure à la maille ne peuvent être explicitement reproduits mais seulement paramétrés. Les modèles régionaux de climat (RCM), de résolution typique entre 10 et 20 km, permettent d’obtenir une information climatique plus détaillée, mais peuvent être encore limités pour appréhender certains événements extrêmes et rares. En progressant vers une échelle kilométrique et en adaptant leurs schémas physiques, les RCM pourront mieux représenter les phénomènes intenses, en particulier les systèmes convectifs/orageux, et les surfaces dont les différents types (villes, lacs et rivières, mer, montagne) peuvent conduire à des gradients locaux très marqués avec des rétroactions importantes sur l’atmosphère (îlot de chaleur urbain, phénomène de brise). Grâce à de nouveaux couplages, les RCM pourront également mieux représenter les impacts composés (qualité de l’air, biodiversité, ressources en eau) du changement climatique et de ses extrêmes et ainsi permettre l’élaboration de stratégies d’adaptation, de l’échelle locale à régionale, associées au changement climatique.

Pour la prévision numérique (prévision du temps, de la qualité de l’air, prévision marine, prévision océanographique), les modèles mis en œuvre sont actuellement des outils fortement spécialisés, représentant du mieux possible l’état d’un compartiment d’intérêt et estimant son (ou ses) évolution(s) probable(s) sur quelques jours. Les interactions avec d’autres compartiments sont pour certaines absentes ou plus généralement introduites au travers de forçages climatologiques ou issus d’autres types de prévisions, ce qui peut conduire à de fortes incohérences (en particulier spatiales en raison de résolutions différentes) et incertitudes, et empêche la prise en compte de boucles de rétroactions rapides comme dans le cas de situations météorologiques intenses et à enjeux telles que citées précédemment. A haute résolution, la capacité des modèles de prévision à représenter les phénomènes intenses pourrait donc encore être améliorée par les couplages qui permettent une plus-value en terme de réalisme, à la fois à l’état initial (dès lors que les résolutions des différents états environnementaux sont proches et les questions de spin-up ou choc sont résolues) et au cours de la prévision.

En s’appuyant sur les expertises du CNRM concernant la modélisation couplée, telle que faite depuis de longues années en climat et prévision saisonnière d’un côté, et de l’autre sur les développements et travaux de recherche réalisés pour la compréhension des phénomènes de petite échelle et leur prévision, le couplage autour du modèle AROME de différents compartiments du système environnemental au sein d’un système à échelle kilométrique modulaire va permettre de progresser dans la représentation détaillée des processus d’échanges de chaleur, de quantité de mouvement et d’eau, ainsi que ceux d’espèces chimiques gazeuses d’intérêt et aérosols.

L’assemblage d’un tel système multi-couplé ouvre de larges perspectives pour plusieurs applications d’intérêt au CNRM :

- les études de processus au travers d'un laboratoire numérique multi-composantes à échelle fine, en particulier pour la compréhension des interactions et boucles de rétroactions pouvant intervenir dans le déclenchement et le cycle de vie de situations météorologiques à enjeux et leurs impacts ;
- l'utilisation du système numérique pour l'évaluation de paramétrisations de modèle en mode couplé, par la revisite de schémas existants ou par la mise au point de paramétrisations plus intégrées notamment pour la résolution des zones limites à proximité des interfaces ;
- la mise au point et l'évaluation d'un démonstrateur de prévision météorologique et environnementale permettant de fournir une information élargie, cohérente à haute-résolution tout en qualifiant les degrés d'amélioration permis par les différents couplages ;
- le soutien à des campagnes de mesure et pour l'installation de nouveaux capteurs ou structures innovantes particulièrement sensibles aux conditions météorologiques et environnementales ;
- l'étude intégrée du système climatique régional à fine échelle en prenant en compte des informations et des processus supplémentaires (en particulier des événements locaux, extrêmes et rares) et des rétroactions locales tout en quantifiant les incertitudes associées.

Ce large spectre d'applications permet également de définir les critères principaux pour l'assemblage de modèles des différents compartiments du système environnemental. Premièrement, la *modularité* du système doit être assurée afin de pouvoir inclure (ou supprimer) des modules selon les applications envisagées. Le critère de *transportabilité* est également nécessaire pour ouvrir les perspectives de modélisations couplées à résolution kilométrique sur différentes régions en fonction des intérêts et opportunités. La priorité est par ailleurs donnée aux modèles avec une *expertise* en interne ou accessible par des collaborations. La *proximité* entre les systèmes courants de la prévision numérique (PNT, prévision marine et composition atmosphérique), l'outil de recherche et de prévision numérique AROBASE, et les modèles climatiques couplés actuels et futurs doit être assurée de manière à pouvoir disposer d'un continuum "sans couture" de modèles couplés permettant de répondre à une large gamme de questions scientifiques, mais aussi à des fins de cohérence pour certaines problématiques partagées et de rationalisation d'un point de vue technique et des ressources humaines et de calcul. Satisfaire ces quatre critères constitue donc une ligne forte qui guide le développement du système AROBASE et aidera à sa maintenance sur le long-terme, avec pour objectif principal de répondre au mieux aux besoins des futures utilisations.

## 2 État de l’art

### 2.1 Systèmes couplés régionaux et enseignements sur l’impact des couplages

Des systèmes couplés océan-atmosphère à échelle fine (kilométrique) sont apparus entre la fin des années 1990 et le début des années 2000 (Hodur, 1997; Powers & Stoelinga, 2000; Loglisci *et al.*, 2004), puis ont progressivement inclus le compartiment vagues, avec pour principales motivations l’étude des interactions air-mer associés à des événements intenses notamment pour les cyclones tropicaux et tempêtes, ainsi que pour l’étude des effets très locaux notamment près des îles et en région côtière complexe (Pullen *et al.*, 2017). Des modèles de chimie en-ligne sont également apparus vers les années 2000 (Tulet *et al.*, 2003; Grell *et al.*, 2005), en complément des modèles de chimie-transport (CTM) complexes (e.g. Brasseur *et al.*, 1998; Bey *et al.*, 2001), pour reproduire une chimie détaillée à fine résolution.

Sans être exhaustif, des exemples de systèmes couplés régionaux développés à l’international ou dans la communauté de recherche nationale sont présentés ici pour illustrer différentes stratégies de couplage et les résultats obtenus. Les détails des modélisations discutées ici sont rassemblés dans le Tableau 1. Pour plus de détails, on pourra se référer aux publications associées.

#### 2.1.1 Le système couplé UKC4 du MetOffice (Royaume-Uni)

Le service météorologique national du Royaume-Uni (UK MetOffice) a développé en collaboration avec les agences en charge de prévision environnementale, le système couplé régional UKC3 (Lewis *et al.*, 2019c), désormais UKC4 (Gentile *et al.*, 2021). La construction de ce système répond à l’objectif d’introduire de plus nombreuses interactions et rétroactions entre les différents compartiments physiques et biogéochimiques de l’environnement en couplant des systèmes de prévision régionaux à une résolution kilométrique. Le système couplé UKC4 (Fig. 1) intègre des modèles de l’atmosphère (UM, Met Office Unified Model), de la surface continentale avec le routage fluvial (JULES), de l’océan (NEMO) et des vagues (WW3). Le couplage entre les différents modèles des compartiments environnementaux est réalisé au travers du coupleur OASIS (développé et maintenu par le CERFACS, Craig *et al.*, 2017).

Les résultats de différentes expériences de sensibilité, chacune d’une durée d’un mois environ, ont été examinés pour caractériser les bénéfices apportés par le couplage sur la prévision des différents compartiments : atmosphère, océan et vagues (Lewis *et al.*, 2019a,b,c). En couplé, des améliorations substantielles sont obtenues pour la température de surface, l’état de mer (notamment dans les régions proches de la côte) et la vitesse du vent au-dessus de la mer. Pour les autres variables examinées, la qualité de prévision n’a montré aucune amélioration ou dégradation significative par rapport aux simulations non-couplées.

Avec ce système, l’étude de Fallmann *et al.* (2019) sur un cas de brouillard a montré le bénéfice d’une température de surface interactive et évolutive apporté par le couplage. Sur la situation examinée pour une période de 5 jours, la surface de la mer tend à se réchauffer progressivement en couplé, ce qui correspond aux observations, tandis que les prévisions atmosphériques utilisant

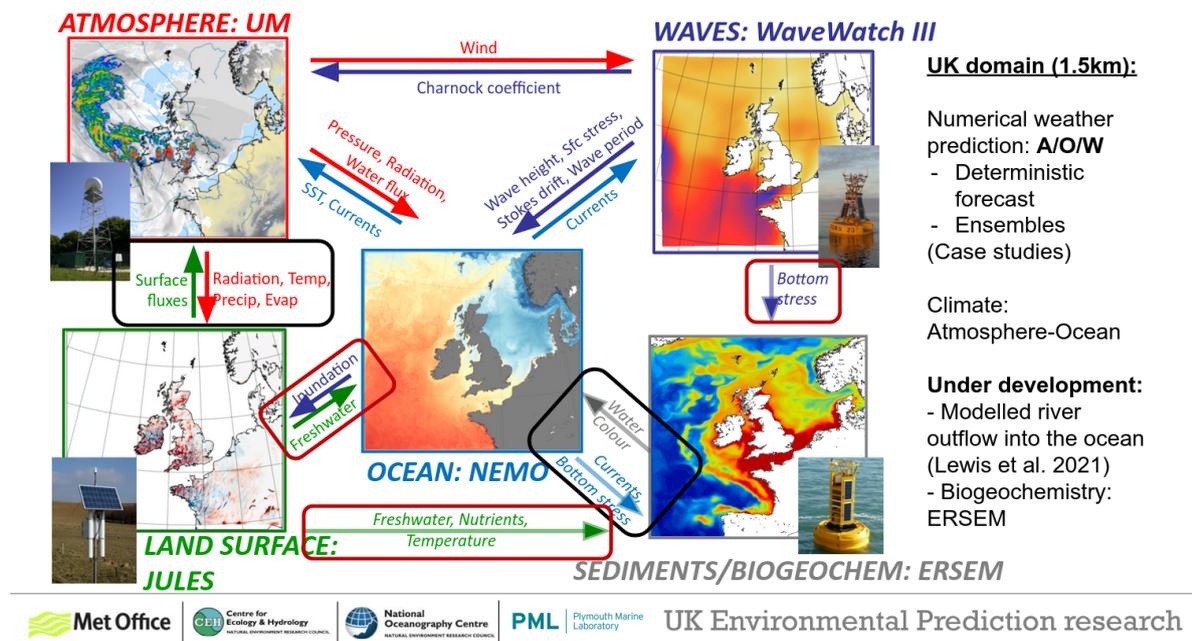


FIG. 1 : Description schématique des composantes du système de modélisation UKC4 et statut en 2023 et perspectives (capsules en rouge), d'après Castillo Sanchez *et al.* (2023).

(classiquement) une température de surface de la mer (SST) constante au cours de la prévision conduisent finalement à un biais froid persistant au cours de la période. L'impact du couplage se propage dans la couche limite atmosphérique marine et affecte la formation de brouillard côtier. Dans ce cas, l'augmentation du flux de chaleur due à une surface de la mer plus chaude conduit à une augmentation de l'instabilité, ce qui limite l'affaissement de stratus et détruit la couche d'inversion favorisant le brouillard.

Dans des expériences océan-atmosphère-vagues couplées, mais différant par la prise en compte ou non de l'effet des marées sur l'élévation et les courants marins dans NEMO, Arnold *et al.* (2021) montrent que, pendant une période de canicule, le refroidissement océanique dû au mélange associé aux marées refroidit la température de l'air au-dessus de la mer jusqu'à 3°C ainsi que dans la zone côtière (jusqu'à 1.4°C). Des changements de stabilité près de la surface sont également obtenus et entraînent une diminution de la vitesse du vent au-dessus de l'océan et une diminution des précipitations estivales (-6%) avec les marées, ce qui correspond à une réponse à des températures plus fraîches.

Les activités de développement du modèle UKC4 concernent aujourd'hui son utilisation pour d'autres régions (notamment pour l'Inde), l'insertion d'autres compartiments, en particulier les rivières et la biogéochimie marine (cf. Fig. 1), dans le but de disposer d'un outil de compréhension du système régional climatique et environnemental, et la mise au point d'un démonstrateur de prévision d'ensemble kilométrique en particulier pour la prévision d'événements intenses impliquant plusieurs compartiments (phénomènes parfois qualifiés de composés ou en cascade).

A notre connaissance, UKC4 a été appliqué pour différents cas d'étude en mode prévision numérique du temps (PNT) mais n'est pas encore utilisé en opérationnel.

### 2.1.2 Le système couplé de recherche COAWST (États-Unis d'Amérique)

Le modèle états-unien COAWST (Warner et al., 2010) est un système couplé régional qui utilise directement la librairie MCT (Larson et al., 2005) et l'outil d'interpolation SCRIP (Jones, 1999) pour assembler en un seul exécutable, les modèles WRF (atmosphère), ROMS (océan), SWAN (vagues) et le modèle de transport de sédiments océaniques CSTMS. D'un point de vue technique, COAWST est donc un exemple d'une architecture de couplage de plusieurs modèles au sein d'un seul exécutable, contrairement à l'approche de couplage entre exécutables distincts mis en œuvre avec le coupleur OASIS. Cet assemblage fournit l'avantage de la plus grande cohérence dans les échanges (absence d'interpolation, couplage à chaque pas de temps, physique de surface partagée, ...). Cependant, il peut aussi conduire à des difficultés liées à l'assemblage des différentes sources, à la portabilité et à la maintenance du code.

En utilisant le modèle COAWST sur le cas de l'ouragan Ivan (2004), Zambon et al. (2014) ont mené plusieurs expériences de sensibilité pour examiner les effets de différents niveaux de couplage entre l'atmosphère, l'océan et les vagues. Les simulations avec couplage entre l'atmosphère, l'océan et les vagues produisent une amélioration faible de la trajectoire mais une amélioration significative de l'intensité du cyclone par rapport aux cas non couplés. Grâce à des comparaisons avec les observations, la capacité du modèle entièrement couplé à résoudre les environnements atmosphérique et océanique incluant les vagues a été démontrée. La paramétrisation de la rugosité et le mélange vertical océanique induit par les vagues apparaissent dans cette étude comme des processus dont la représentation peut grandement modifier les résultats de prévisions tri-couplées océan-atmosphère-vagues.

Au-delà des études couplées de cyclones tropicaux, le système COAWST a été utilisé dans plusieurs configurations notamment pour l'étude des échanges pendant des événements intenses en région méditerranéenne.

L'étude de Renault et al. (2012) montre ainsi que de meilleurs résultats (en particulier sur le vent) sont obtenus avec le système couplé océan-atmosphère-vagues de COAWST dans le cas d'une cyclogenèse sur la mer des Baléares. Dans ce cas, le mélange océanique est le processus dominant pour expliquer le refroidissement. Le couplage avec le modèle de vagues renforce l'effet sur la SST (*i.e.* une stabilisation). Le principal résultat de cette étude concerne la forte dépendance à la rugosité avec une amélioration lorsque les vagues sont prises en compte dans le calcul du coefficient de Charnock et démontre que l'effet du couplage dépend très fortement du choix de la paramétrisation du flux de quantité de mouvement.

Sur une autre région méditerranéenne, l'étude de Ricchi et al. (2016) montre que le couplage océan-atmosphère-vagues permet la cohérence pour tous les milieux et une bonne représentation des flux à l'interface mais n'a en revanche que peu d'effets sur la prévision du vent à 10 m et de la température à 2 m, vu aussi la petite taille de la mer Adriatique et la rapidité du flux de Bora. Sur le même cas (février 2012) et avec le même système de modélisation couplé COAWST sur la mer Adriatique, Carniel et al. (2016) ont montré que le couplage océan-atmosphère améliore les résultats en terme de formation d'eaux denses, en raison d'une meilleure estimation du flux total de chaleur.

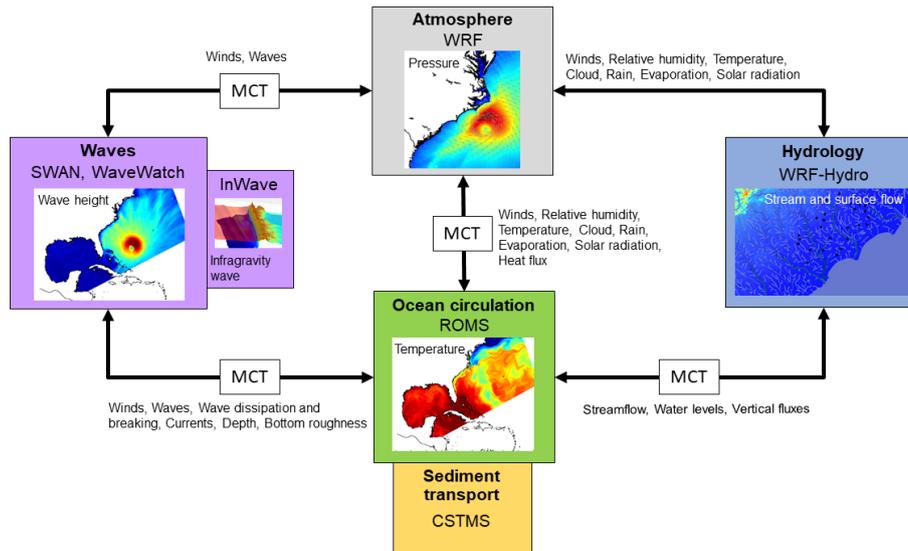


FIG. 2 : Diagramme représentant les échanges dans le système COAWST après intégration du modèle hydrologique WRF-Hydro. Source : Woods Hole Coastal and Marine Science Center.

Dernièrement, le modèle hydrologique WRF-Hydro a été intégré au système COAWST (Fig. 2), permettant aux précipitations d’être acheminées sous forme d’écoulement de surface vers les rivières et finalement dans l’océan. Utilisé sur le cas du cyclone Florence ayant frappé la côte Est américaine en 2018, Warner *et al.* (2020) montrent l’interaction entre le flux d’eau douce et la surcote et fournit une analyse des effets séparés et combinés des ondes de tempête, des précipitations et des inondations fluviales. Cette intégration a ainsi pour but de fournir des informations plus détaillées afin de permettre une meilleure anticipation des inondations et submersions marines.

### 2.1.3 La plateforme RegIPSL

Le modèle couplé régional de l’Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), nommé RegIPSL (Fig. 3), a été mis au point à partir de la plateforme de modélisation MORCE-MED (Drobinski *et al.*, 2012). L’objectif principal du développement de RegIPSL est de pouvoir mener des études de processus et des études climatiques à l’échelle régionale. RegIPSL couple le modèle de surfaces continentales ORCHIDEE, le modèle atmosphérique WRF, et le modèle océanique NEMO. La plateforme RegIPSL utilise le coupleur OASIS et la librairie XIOS pour la gestion des fichiers d’entrée/sortie. La combinaison initiale WRF-NEMO dans RegIPSL a été utilisée dans le cadre de l’exercice d’inter-comparaison Med-CORDEX (Ruti *et al.*, 2016) avec une résolution de 20 km pour l’atmosphère et les surfaces continentales et une résolution de 7-8 km pour l’océan (configuration MED12 de NEMO). Plus récemment, RegIPSL a été utilisé sans le compartiment océanique pour l’étude de l’impact des sécheresses et canicules sur la végétation et les feux de forêt (Guion *et al.*, 2022) et pour des tests sur la péninsule Ibérique à résolution de 3 km permettant de résoudre explicitement la convection profonde (Shahi *et al.*, 2022).

RegIPSL est ainsi principalement évalué et appliqué à des domaines sur la région européenne.

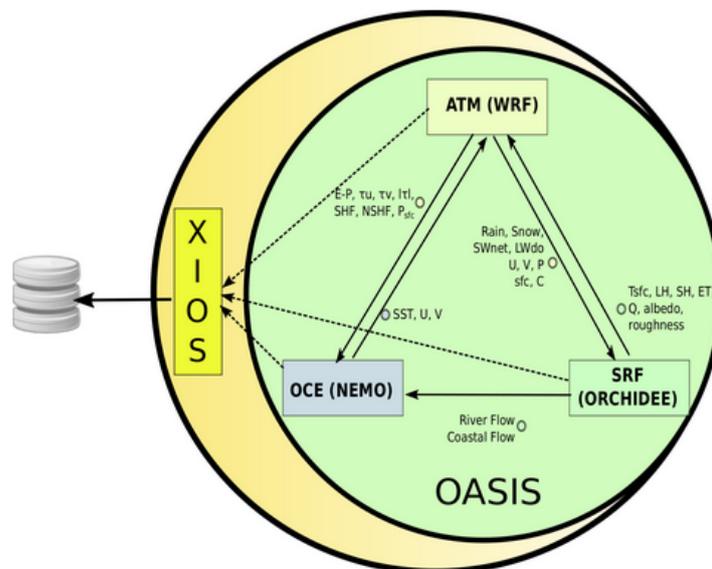


FIG. 3 : Assemblage de la plateforme de modélisation régionale de l'IPSL RegIPSL. Plus d'informations sur <https://gitlab.in2p3.fr/ips1/lmd/intro/regips1/regips1/-/wikis/home>

Mais l'un des objectifs est d'avoir un système flexible pouvant s'appliquer à n'importe quelle région. Le LMD travaille actuellement au déploiement de RegIPSL dans de nouvelles configurations régionales, notamment pour la zone Amérique du Sud dans le cadre d'une collaboration avec l'IFAECI.

Concernant les évolutions de la plateforme de modélisation RegIPSL, un travail est en cours pour y intégrer le modèle de chimie-transport CHIMERE. Le couplage entre CHIMERE et WRF est déjà existant et utilisé pour examiner les effets directs et indirects des aérosols sur la météorologie (Menut *et al.*, 2021). Il peut bénéficier des développements continus de schémas physiques au sein du modèle WRF et intégrer progressivement de nouvelles interactions. Le couplage régional entre CHIMERE et ORCHIDEE est également maintenu à partir des travaux initiaux de Anav *et al.* (2011). Inclure un couplage entre CHIMERE et le modèle de biogéochimie marine PISCES est également à l'étude. L'autre grande perspective d'évolution concerne le compartiment atmosphérique, avec le remplacement du modèle atmosphérique WRF par la version à aire limitée du modèle DYNAMICO avec une physique adaptée à la résolution kilométrique.

Le couplage WRF-NEMO (parfois nommé NOW, pour NEMO-OASIS-WRF) est également utilisé au LOCEAN et au LEGOS pour l'étude du rôle des processus couplés à fine échelle sur la dynamique océanique et sa variabilité, notamment dans les bassins tropicaux ; avec parfois l'insertion du couplage vagues avec le modèle WW3.

Le couplage WRF-NEMO est utilisé depuis plusieurs années au LOCEAN dans des configurations idéalisées (Colas *et al.*, 2013) ou réalistes (Samson *et al.*, 2014) sur des périodes de plusieurs décennies, pour examiner le rôle des processus régionaux de petite échelle sur l'état moyen aux tropiques, pour l'étude de la variabilité climatique, de la mousson et du dipôle de l'Océan Indien, et l'analyse des distributions spatiales et saisonnières des cyclones tropicaux. Le

couplage avec WW3 permet également l'étude des interactions vagues-courant-stress en présence de tourbillons océaniques de méso-échelle de taille typique de 100 km.

Grâce à des simulations WRF-NEMO sur l'océan Atlantique tropical, Gévaudan (2021) a pu analyser en couplé les effets de la stratification en sel formée par le panache de l'Amazonie. Cette démarcation forte diminue le mélange vertical et entraîne un isolement de la couche océanique superficielle qui se réchauffe. Ce réchauffement est ensuite modéré par une rétroaction négative de l'atmosphère due à une diminution du flux de chaleur (augmentation de la perte de chaleur latente) ainsi qu'à une réduction du rayonnement solaire atteignant la surface de l'océan, en lien avec une augmentation de la convection profonde et de la couverture nuageuse et des précipitations associées.

Il est à noter que, hormis les travaux avec la plateforme WRF-NEMO(-WW3) en collaboration avec le LOCEAN, les équipes du LEGOS développent d'autres systèmes couplés régionaux afin de répondre à différentes questions scientifiques en fonction principalement des spécificités de bassin océanique. Des configurations WRF-CROCO(-WW3) sont par exemple utilisées sur un domaine couvrant la zone de la campagne EUREC4A/ATOMIC ou encore sur la région du courant circumpolaire Antarctique.

#### 2.1.4 Couplages avec le modèle MESO-NH

Le modèle de recherche communautaire MESO-NH (Lac *et al.*, 2018), développé principalement par le CNRM et le LAERO, a été bâti dès le départ, dans les années 1990, sur une approche intégrée des différents couplages. Cela inclut en premier lieu la plateforme de surface SURFEX, des possibilités de couplage de la surface océanique grâce à l'interface avec OASIS, mais également une chimie gazeuse et le module d'aérosols ORILAM (ORGanic INorganic Lognormal Aerosols Model, Tulet *et al.*, 2005) en ligne, avec les émissions produites par SURFEX. ORILAM inclut les poussières désertiques (Grini *et al.*, 2006) et les sels marins, qui peuvent être activés indépendamment de la chimie et des autres types d'aérosols, et sont décrits respectivement par 3 et 5 variables pronostiques supplémentaires correspondant aux modes log-normaux de leur distribution dimensionnelle. Lorsque la chimie, les poussières désertiques, les sels marins ou les aérosols sont activés, l'impact radiatif est pris en compte (photochimie pour l'ozone, impact radiatif direct des aérosols). Cette approche a permis d'améliorer les différents compartiments de couplage et de mener de nombreuses études de processus depuis les résolutions kilométriques jusqu'à l'échelle de quelques dizaines de mètres pour des simulations aux grandes échelles dites *Large Eddy Simulations* (LES), *i.e.* lorsque l'essentiel des tourbillons sont explicitement résolus. D'autres exemples de couplage en ligne dans MESO-NH concernent l'électricité atmosphérique, la propagation des feux ou les éoliennes.

Pour revenir plus spécifiquement sur le couplage océan-atmosphère-vagues, grâce à l'interface générique SURFEX-OASIS (Voldoire *et al.*, 2017), le couplage entre MESO-NH, le modèle de circulation hydrodynamique côtière MARS3D et le modèle de vagues WW3 a été développé au LOPS pour examiner les processus clés et l'impact des rétroactions entre dynamiques océanique atmosphérique et de vagues à l'échelle côtière sur la mer d'Iroise, région macro-tidale

typique de la façade atlantique soumise à des vents d'Ouest, caractérisée par un front thermique saisonnier très marqué (front de Ouessant) et des vagues générées par un fetch important. Les comparaisons d'expériences en mode forcé et couplé ont montré l'importance de la résolution du champ de température de surface de la mer autour du front pour l'estimation des flux turbulents atmosphériques en surface et dans la couche limite, l'état de mer ayant aussi un impact mais de degré moindre. La forte sensibilité de l'estimation des tensions de vent (donc du vent) selon la représentation de l'état de mer a été montrée. Pour la dynamique des vagues et donc la rugosité de surface, les simulations couplées océan-atmosphère-vagues confirment l'importance des courants de marée (comme discutés dans le cas de vagues forcées dans Ardhuin et al., 2012).

MESO-NH a également été couplé au modèle océanique NEMO notamment au LACy sur l'océan Indien pour la simulation du cyclone Bejisa (Bielli et al., 2021), au CNRM sur la Méditerranée centrale pour l'étude des processus de surface lors du *medicane* Qendresa (Bouin & Lebeaupin Brossier, 2020b,a), ou encore à Mercator Ocean International sur l'Atlantique Nord-Est (zone "IBI" pour Irish-Biscay-Iberian) pour la mise au point d'une simulation de référence à laquelle comparer des simulations NEMO utilisant un schéma simplifié 1D de la couche limite atmosphérique marine (ABL1D) (Brivoal, 2021).

Pour d'autres applications, des simulations couplées entre MESO-NH, le modèle océanique CROCO et le modèle de vagues WW3 ont été ou sont réalisées : au LACy pour l'étude des cyclones Fantala et Bejisa (Barthe et al., 2021), au LOPS et France Energies Marines dans le cadre du projet CASSIOWPE sur le golfe du Lion (c.f. section 3.3), au LAERO pour les études autour de la campagne MAP-IO (thèse de M. Dournaux) et des tempêtes (ANR WINDGUST porté par F. Pantillon), et au MIO sur une zone de la mer Méditerranée Nord-occidentale pour le test de formulations de la génération d'aérosols marins (W. Bruch, C. Yohia).

A très haute résolution (maille d'échelle horizontale de 50 m), Brilouet et al. (2021) ont utilisé le modèle MESO-NH couplé au modèle de couche de mélange océanique 1D inclus dans SURFEX sur un cas de cycle diurne pendant la campagne DYNAMO dans l'océan Indien. L'utilisation d'une résolution verticale très fine (10 cm d'épaisseur jusqu'à 5 m de profondeur) permet une bonne représentation de la couche diurne chaude (ou DWL, pour *Diurnal Warm Layer*). Le déclenchement de la convection profonde atmosphérique semble être directement lié aux échanges air-mer et la présence d'une DWL couplée conduit à une bonne représentation du cycle diurne de la couche nuageuse. Cette étude fournit ainsi un cas de référence permettant d'évaluer la capacité des paramétrisations à intégrer le couplage océan-atmosphère et son impact sur la couche limite. L'étude montre également que pour des conditions stables fortement stratifiées, des ajustements du schéma de turbulence du modèle océanique 1D semblent nécessaires.

Le développement par J.-L. Redelsperger (LOPS) d'une version océanique de MESO-NH couplée à MESO-NH (atmosphère) pour des simulations idéalisées permet d'aborder de nouvelles questions sur les interactions air-mer à très haute résolution (10 m) : interactions entre tourbillons et filaments océaniques et turbulence et représentation de la convection peu profonde dans les deux milieux, notamment.

TAB. 1 : Synthèse sur les plateformes couplées régionales développées dans les communautés internationale et nationale et décrites dans ce document. Les modèles indiqués en italique constituent des perspectives de développement.

plateforme	Compartiments									
	Atmosphère		Surfaces continentales			Rivières (trouage)		Océan		Vagues
	Dynamique/Physique	Chimie/Aérosols	Sol-Végétation(-Neige)	Lacs	Villes	<i>JULIES</i>	(libre)	glace de mer	biogéochimie	
UKG3	UM		JULES				NEMO		<i>ERSEM</i>	WW3
COAWST	WRF		WRF/Noah LSM			WRF-hydro	ROMS			SWAN
RegIPSL [NOW] <sup>a</sup>	WRF	<i>CHIMERE</i>	ORCHIDEE			ORCHIDEE	NEMO	SI3 <sup>b</sup>	PLSCES <sup>b</sup>	WW3 <sup>b</sup>
MESO-NH Panevze et al. (2018)	MESO-NH	MESO-NH-C (chimie) / ORILAM (aérosols)	SURFEX (+MEGAN pour les émissions biogéniques) ISBA	Flake	TEB		CROCO MARS3D <sup>c</sup> ou NEMO <sup>d</sup>			WW3

- a. nomenclature utilisée ici pour les assemblages d'outils de modélisation régionale à l'IPSL
- b. couplages possibles pour certaines configurations au LOCEAN et au LEGOS
- c. couplage pour certaines configurations au LOPS
- d. couplage pour certaines configurations au LACy

En résumé, différentes expériences de modélisation couplée existent à l'heure actuelle depuis l'échelle régionale jusqu'à l'échelle locale, et se sont avérées pertinentes pour améliorer le réalisme des processus simulés. Les différents éléments des plateformes couplées précédemment présentées sont récapitulés en Tab. 1.

## 2.2 Modélisation du climat à Météo-France

Cette partie du document vise à dresser un panorama des différents systèmes de modélisation climatique mises en oeuvre dans les équipes de recherche du CNRM, et plus spécifiquement dans le groupe en charge des activités de modélisation climatique (GMGEC). L'accent est délibérément porté sur les enjeux du couplage entre composantes du système climatique. Une synthèse des systèmes de modélisation décrits dans cette partie est présentée dans le Tableau 2. Pour plus de détails, on pourra également se référer aux publications associées.

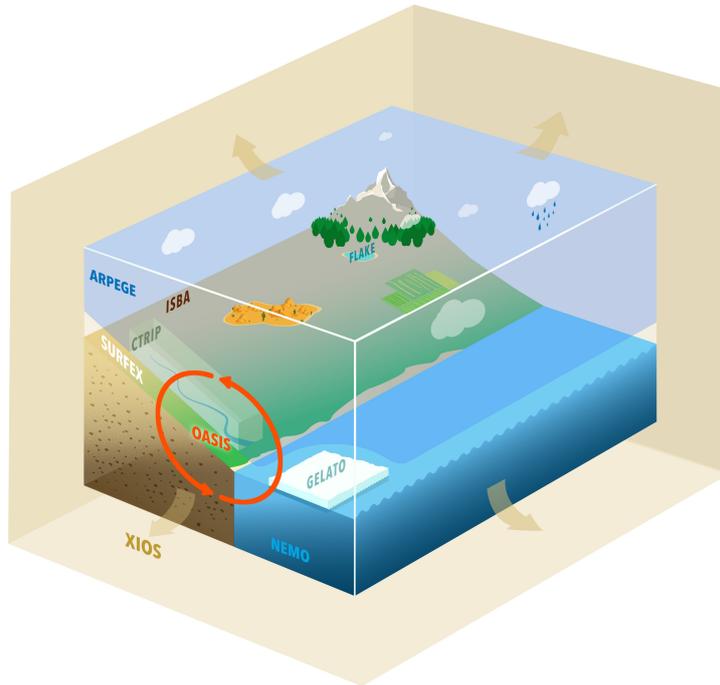
Les systèmes couplés sont les outils numériques nécessaires à l'étude des cycles de l'eau, de l'énergie et du carbone ainsi qu'à la compréhension des processus couplés en jeu et à l'estimation des échanges.

Historiquement, les premiers modèles ayant combiné les compartiments atmosphérique et océanique sont les modèles globaux de circulation générale (AOGCM pour Atmosphere-Ocean General Circulation Model) pour le climat (e.g. Manabe & Bryan, 1969; Semtner, 1984; Nihoul, 1985; Terray *et al.*, 1995). Ces systèmes ont aujourd'hui une résolution typique de l'ordre de 1°, et intègrent également des représentations de la cryosphère et de l'hydrologie continentale.

CNRM-CM6-1 (nommé CNRM-CM ci-après) est le modèle de climat développé par le groupe de modélisation conjoint entre le CNRM et le CECI-CERFACS pour l'exercice CMIP6 (Voldoire *et al.*, 2019). CNRM-CM est composé du modèle atmosphérique global ARPEGE-Climat (v6.3) dans lequel est intégré le schéma de surface externalisé SURFEX (v8.0) permettant de représenter les surfaces continentales au travers de ISBA et CTRIP, et les lacs au travers du modèle de lacs Flake. Le modèle d'atmosphère et de surface est couplé au modèle océanique NEMO (v3.6) et au schéma de glace de mer GELATO. Le couplage interactif, *i.e.* l'échange d'information entre les composantes, se fait toutes les heures, par l'intermédiaire du coupleur OASIS(3-MCT) connecté à SURFEX (Voldoire *et al.*, 2017). Pour faciliter et optimiser le traitement des sorties du modèle, CNRM-CM est interfacé avec le serveur d'entrée/sortie XIOS.

Les développements actuels des systèmes de modélisation couplés globaux visent aujourd'hui à améliorer la représentation des processus physiques et leur diversité, à la fois par des aspects de raffinement de résolution (pour atteindre des "hautes" résolutions jusqu'à typiquement 50 km), et par la mise au point de paramétrisations dédiées.

Par ailleurs, afin de résoudre les cycles de l'eau, chaleur et carbone avec plus de réalisme, les modèles couplés globaux de climat intègrent de plus en plus de composantes (chimie atmosphérique, végétation interactive, biogéochimie marine) devenant aujourd'hui des modèles du "système Terre" (ou ESM pour "*Earth System Model*").



### CNRM-CM

FIG. 4 : Description schématique des composantes du système de modélisation climatique global CNRM-CM.

Au CNRM, le modèle CNRM-CM constitue ainsi la base physique du modèle Système Terre CNRM-ESM2-1 (nommé ci-après CNRM-ESM, Sférian *et al.*, 2019), auquel ont été ajoutées les composantes permettant la représentation du cycle du carbone, des aérosols et de la chimie atmosphérique. Ainsi, CNRM-ESM est composé des mêmes modèles physiques que CNRM-CM, avec néanmoins une configuration différente au niveau des surfaces continentales, puisque le module ISBA/CTRIP permet de représenter explicitement l'évolution interactive du type de végétation et de l'occupation des sols en fonction de l'évolution des conditions environnementales simulées. La biogéochimie marine est incluse au travers du modèle PISCES (v2-gas), qui permet de simuler les distributions de cinq nutriments qui régulent la croissance de deux classes de phytoplancton (le nano-phytoplancton et les diatomées). La chimie atmosphérique pour la stratosphère est simulée par le module REPROBUS(-C\_v2) qui permet la représentation de 63 espèces chimiques. Pour les aérosols troposphériques, le schéma TACTIC(\_v2) est utilisé au sein du code ARPEGE-Climat. Il représente les principales espèces d'aérosols d'origine naturelle et anthropique. Dans CNRM-ESM, les concentrations 3D d'aérosols et un certain nombre de gaz trace, dont le CO<sub>2</sub>, interagissent avec le schéma radiatif, permettant de simuler explicitement les interactions aérosols-chimie-rayonnement et les interactions entre le climat et les aérosols.

Les modèles du système Terre, tel que CNRM-ESM, permettent ainsi de mieux prendre en compte les interactions et les boucles de rétroactions complexes entre les différentes composantes des cycles climatiques, et ainsi de mieux qualifier les incertitudes qui affectent les projections produites par les AOGCMs.

La modélisation régionale du climat permet d’atteindre des résolutions plus fines qu’en modélisation globale et de faire des focus sur les impacts locaux (Feser et al., 2011). Dans les années 2000, des modèles de climat régionaux couplés (ou AORCMs pour Atmosphere-Ocean Regional Climate Models) ont été développés (voir Seo et al., 2007, pour une revue des premiers AORCMs), notamment pour l’étude de zones où les interactions océan-atmosphère sont importantes, comme par exemple en mer Baltique ou océan Arctique (e.g. Döscher et al., 2002; Lehmann et al., 2004), dans l’océan Indien et Indonésie (e.g. Aldrian et al., 2005; Ratnam et al., 2009).

Au CNRM, un AORCM a été développé pour étudier le climat en Méditerranée, sa variabilité et ses tendances, et répondre aux spécificités de la région avec de fortes interactions air-mer et un relief complexe (Somot et al., 2008). La dernière version de ce modèle couplé multi-composantes du système climatique régional, nommé CNRM-RCSM6 (CNRM-RCSM ci-après), est décrite dans Darmaraki et al. (2019). Les composantes sont le modèle atmosphérique à aire limitée ALADIN-Climat (v6), incluant les aérosols interactifs au travers du module TACTIC, et le modèle de surface SURFEX (v8.0) dans lequel sont activés les modèles ISBA pour les surfaces continentales et Flake pour les lacs. Le domaine de simulation d’ALADIN-climat/TACTIC/SURFEX a une résolution horizontale de 12 km (Fig. 5). L’hydrologie continentale est représentée par le modèle CTRIP à 50 km de résolution. Le modèle océanique est NEMO (v3.6) dans sa configuration Méditerranée au 1/12° (NEMOMED12), qui est couplé au travers de l’interface OASIS-SURFEX.

Les défis actuels de la modélisation climatique régionale couplée sont notamment la transportabilité pour couvrir de nouvelles régions d’intérêt, une augmentation de résolution dans les compartiments - en particulier dans l’atmosphère où une échelle kilométrique pourra permettre

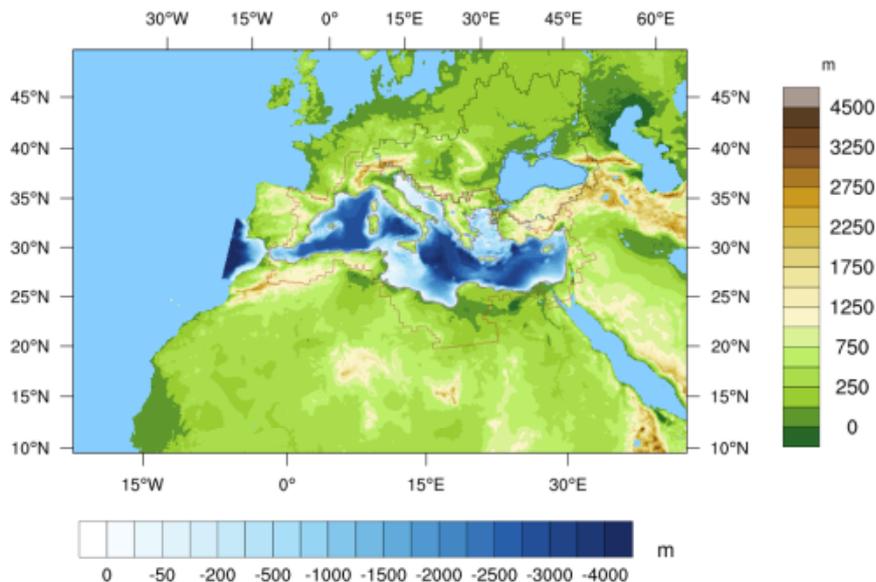


FIG. 5 : Domaine de simulation CNRM-RCSM(6) sur la Méditerranée, illustré par le masque terre-mer et l’orographie du modèle ALADIN-Climat/SURFEX (domaine AAD12, 12 km de résolution) et la bathymétrie du modèle NEMOMED12 (1/12° de résolution).

de résoudre explicitement la convection, une amélioration de leurs physiques, l'ajout de nouvelles composantes naturelles (vagues, aérosols, bio-géochimie marine, végétation interactive) ou anthropiques (émissions anthropiques et pollution/villes, réservoir/barrages/irrigation, ...).

## 2.3 État actuel des couplages dans les systèmes de prévision numérique à Météo-France

Que ce soit pour la prévision saisonnière, pour la prévision numérique du temps, la prévision marine et la composition atmosphérique, différents systèmes de prévision opérationnels de Météo-France intègrent certains niveaux de couplage, qui sont présentés ici. Un résumé de ces informations figure dans le Tableau 2.

### 2.3.1 Prévision saisonnière et sub-saisonnière

Le système de prévision saisonnière et sub-saisonnière de Météo-France utilise le modèle CNRM-CM (décrit en section 2.2) avec une initialisation spécifique afin d'être au plus près de l'état initial du système. Plusieurs simulations (appelées membres) sont initialisées au travers de décalages temporels de quelques jours de manière à fournir un ensemble de scénarios possibles, sous forme probabiliste. Des récents travaux ont été réalisés dans l'équipe GMGEC/PASTEL, en collaboration avec l'équipe GMGEC/IOGA, pour progresser vers une initialisation couplée qui permet d'être dans un état plus proche de l'état d'équilibre du modèle (Nicolay, 2020; Le Breton, 2022). Les résultats de ces tests d'initialisation couplée ont montré comme attendu une réduction de la dérive initiale de la prévision, mais cette réduction ne s'accompagne pas d'un changement net de la prévisibilité, notamment en région tropicale, comparée à une initialisation standard. Néanmoins, de meilleurs scores ont été obtenus sur certaines variables atmosphériques, en particulier sur la représentation du géopotentiel à 500hPa pour les zones extra-tropicales. Des tests doivent encore être réalisés par exemple en changeant la paramétrisation des flux air-mer ou en modifiant les contraintes de rappel, notamment pour réduire les dégradations vues sur certaines variables et/ou régions.

Dans le système actuel (v8) de prévision saisonnière, l'initialisation des compartiments est faite de manière couplée, bien qu'une initialisation standard, *i.e.* séparément entre l'océan et le bloc atmosphère + surfaces continentales, reste possible notamment à des fins de recherche. En revanche, dans les deux cas, la glace de mer reste initialisée séparément dans le système actuel, l'état initial provenant d'un système global dédié (NEMO+GELATO à résolution 1/4°) opéré par Mercator Ocean International.

### 2.3.2 Prévision numérique du temps

En prévision numérique du temps, la surface de la mer est généralement considérée uniquement au travers de la température de surface, celle-ci restant constante au cours de la prévision. L'insertion du modèle de couche de mélange océanique 1D en énergie cinétique turbulente de Gaspar *et al.* (1990) dans SURFEX (Fig. 6; Lebeaupin Brossier *et al.*, 2009) a néanmoins permis

d'introduire dès leur conception un couplage océan-atmosphère dans les systèmes de prévision AROME sur les régions d'Outre-Mer (AROME-OM, Faure *et al.*, 2020), systèmes pour lesquels la surface marine peut représenter jusqu'à 99.5% du domaine. Pour ces systèmes opérationnels, le couplage avec un modèle océanique, même simplifié, constitue un bénéfice par rapport à une condition océanique fixe, pour les situations météorologiques à enjeux comme pour la prévision du temps sensible. L'initialisation des colonnes océaniques (indépendantes) est faite pour tous les réseaux déterministes à partir des champs instantanés prévus par le système opérationnel global de résolution 1/12° (PSY4[V3] remplacé en 2023 par GLO12[V4]) de Mercator Ocean International. L'évolution océanique est ainsi explicite en chaque point de maille et prise en compte interactivement toutes les 5 minutes dans la prévision.

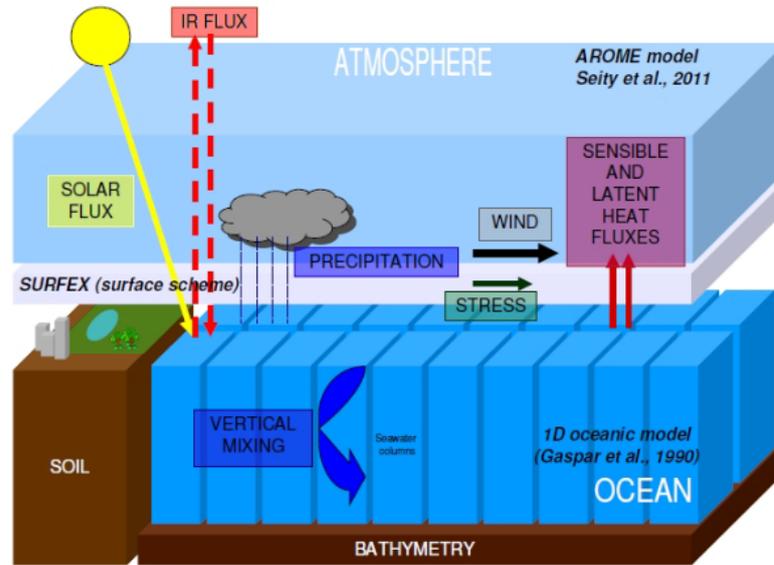


FIG. 6 : Schéma du couplage entre les AROME-OM et le modèle de surface océanique 1D inclus dans SURFEX.

Le système de prévision d'ensemble Outre-Mer basé sur AROME (PEARO-OM) et récemment mis en opérationnel inclut également le couplage au modèle de surface océanique 1D. En plus des perturbations atmosphériques, des perturbations aléatoires de la température océanique – construites de manière similaire aux perturbations de température de surface de la mer proposées par Bouttier *et al.* (2016) – sont intégrées dans l'état initial et appliquées pour les niveaux entre la surface et 10 m de profondeur.

L'inclusion de SURFEX dans le modèle de PNT global ARPEGE a permis de nombreuses avancées dans la représentation des surfaces continentales et océanique, notamment la prise en compte interactive de la glace de mer au travers de GELATO1D inclus dans SURFEX. Récemment, des expériences de prévision ont été réalisées au GMAP pour tester la faisabilité de l'utilisation du couplage au modèle 1D océanique. Les tests réalisés dans ce cadre ont permis dans un premier temps d'évaluer l'apport d'une utilisation d'un rappel vers des champs globaux de température de surface de la mer PSY4(/GLO12) de Mercator Ocean International pour ARPEGE et AROME-France. Les résultats obtenus permettent d'envisager cette option pour

l'intégrer dans une prochaine chaîne en double.

### 2.3.3 Prévision marine

Pour les systèmes de prévision marine de Météo-France (prévision hauturière, prévision côtière, dérives et suivi des sargasses), les prévisions de courants océaniques et des champs atmosphériques (principalement le vent près de la surface) sont utilisées comme forçages. Des informations sur les marées et l'élévation du niveau marin sont également prises en compte pour la prévision marine dans le domaine côtier (voir Fig. 12).

Il est à noter par ailleurs que les champs de vagues prévus par le modèle hauturier MFWAM sont utilisés comme forçage pour la prévision océanographique opérationnelle du système régional de modélisation sur la zone IBI dans le cadre du Copernicus Marine Service (CMEMS).

### 2.3.4 Composition atmosphérique

Le modèle de chimie-transport MOCAGE (MOdèle de Composition Atmosphérique à Grande Echelle), développé par Météo-France, décrit la composition troposphérique et stratosphérique des gaz et des aérosols à l'échelle globale et régionale sur la base de domaines imbriqués. Ce modèle est forcé par les prévisions d'un modèle météorologique (ARPEGE, IFS, AROME) ou climatique (CNRM-CM, CNRM-RSCM) pour les champs météorologiques. Il est utilisé à la fois pour la recherche sur la composition atmosphérique et sur la qualité de l'air, ainsi que pour la prévision opérationnelle de l'ozone stratosphérique et des indices UV à l'échelle globale, de la qualité de l'air sur l'Europe (Copernicus) et la France (Prév'Air) ou des cendres volcaniques (VAAC), par exemple.

Dans les versions opérationnelles des modèles de PNT ARPEGE et AROME, il n'y a pas de représentation interactive des aérosols et des gaz. Dans ces modèles, des climatologies d'aérosols sont utilisées. Une climatologie d'aérosols est une carte globale donnant pour chaque point de grille et en fonction de l'époque de l'année (granulométrie mensuelle par exemple), soit la quantité totale d'aérosols intégrée sur la verticale (en masse ou en épaisseur optique) soit le profil vertical moyens sur ce point de grille. Elles peuvent être par exemple obtenues à partir de simulations numériques, d'observations satellitaires ou de réanalyses, moyennées sur plusieurs années. Dans AROME, c'est la climatologie de Tegen *et al.* (1997) qui est utilisée en opérationnel. Une nouvelle climatologie provenant de CAMS (Bozzo *et al.*, 2020), basée sur des données plus récentes, est en cours de test dans AROME.

Des travaux exploratoires ont été menés pour forcer le champ d'ozone utilisé dans ARPEGE, uniquement dans son assimilation, pour permettre de mieux assimiler les observations du sondeur infrarouge IASI (Coopmann *et al.*, 2020). Ce forçage a montré un impact positif pour la représentation des observations au cours de l'assimilation et sur la qualité des analyses et des prévisions des champs météorologiques qui en découlent. Cela incite à évaluer l'ajout d'autres espèces chimiques ou aérosols dans le forçage pour l'assimilation, ainsi qu'à utiliser ces forçages également dans le schéma de rayonnement au cours de la prévision, en remplacement des climatologies.

## 2.4 Couplages au CEPMMT

Le système de prévision du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) est un outil important qui intervient en amont de plusieurs productions opérationnelles de Météo-France. Le code commun entre IFS et ARPEGE / AROME constitue par ailleurs un socle d'échanges de développements, de transfert et de maintenance.

Les couplages océan-atmosphère-vagues, ainsi que la chimie en ligne qui sont intégrés dans ce système de prévision sont présentés ci-après.

### 2.4.1 Atmosphère-Vagues-Océan

Au Centre Européen, le couplage atmosphère (IFS, pour *Integrated Forecast System*) – vagues (WAM, pour *WAVE prediction Model*) depuis longtemps mis en oeuvre, a été complété par l'insertion du modèle océanique NEMO (*Nucleus for European Modelling of the Ocean*, incluant le modèle de glace *Louvain-la-Neuve sea Ice Model* [LIM2]) en 2018. L'insertion du compartiment océanique a en particulier été motivée par les résultats de Mogensen et al. (2017). En utilisant la version opérationnelle (cy43r1) du système de prévision intégré (IFS) du CEPMMT couplé au modèle NEMO (version 3.4.1), cette étude a confirmé l'importance d'utiliser un modèle 3D pour la prévision numérique des cyclones tropicaux. En particulier, le couplage conduit à une diminution de l'intensité des cyclones, réduisant ainsi la sur-estimation existante dans le modèle non couplé. L'étude met également en évidence l'importance de la stratification superficielle de l'océan sur l'amplitude de la réponse couplée. Techniquement, le Centre Européen a adopté une stratégie de couplage IFS/NEMO en un seul exécutable sans coupleur (Mogensen et al., 2012), de manière symétrique au couplage IFS/WAM existant. Ainsi le code source de NEMO a été additionné au code d'IFS(/WAM) et est appelé au sein de la boucle temporelle d'IFS. Néanmoins le pas de temps et la grille océaniques ne correspondent pas à ceux de l'atmosphère. La gestion de la boucle temporelle est laissée à IFS qui appelle le modèle océanique selon la fréquence de couplage. Pour la gestion des grilles différentes, des routines d'interpolation des champs échangés ont dû être introduites.

### 2.4.2 Chimie en ligne et aérosols interactifs :

Dans le cadre du programme européen CAMS, les gaz à effet de serre, les aérosols et les espèces chimiques ont été intégrés de manière très complète dans le modèle IFS du CEPMMT. Les détails des systèmes de prévision et d'assimilation du Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS) peuvent être retrouvés sur le site dédié<sup>4</sup>. Seuls les principaux points en lien avec des interactions entre composantes du système Terre sont résumés ci-après.

La description détaillée de l'insertion des processus d'aérosols dans le système IFS, est donnée dans Rémy et al. (2022). Sept types d'aérosols troposphériques sont considérés : les sels marins, les poussières désertique, le carbone organique et le carbone-suie, les aérosols sulfatés,

---

4. <https://confluence.ecmwf.int/display/COPSRV/Current+global+production+suites#Currentglobalproductionsuites-Globalanalysesandforecastsforaerosolandchemicalspecies>

les nitrates et l'ammonium. Le schéma pour les poussières désertiques a été adapté du schéma implémenté dans TACTIC (Nabat et al., 2012; Michou et al., 2015) Les émissions de sels marins sont diagnostiquées à l'aide du schéma A16 (Albert et al., 2016). Les sources des autres types d'aérosols liés aux émissions anthropiques sont tirées des climatologies SPEW et EDGAR (Dentener et al., 2006). Les émissions d'aérosols liées aux feux sont issues de l'inventaire GFAS. Le dépôt sec, y compris le transfert turbulent vers la surface, la sédimentation gravitationnelle, et le dépôt humide, y compris la précipitation par précipitation convective à grande échelle et le lessivage des particules d'aérosol dans et sous les nuages, sont pris en compte.

La chimie gazeuse toposphérique intégrée dans IFS est une version étendue de CB05 (Yarwood et al., 2005). Les concentrations d'ozone stratosphérique sont paramétrées avec le schéma de Cariolle & Teyssède (2007). Le dépôt humide est basé sur le schéma de Harvard (Jacob et al., 2000; Liu et al., 2001) qui tient compte de la fraction de surface des nuages et des précipitations. Pour les émissions de  $\text{NO}_x$  atmosphériques, la densité du taux d'éclairs estimée à partir des paramètres du schéma de convection est utilisée.

Pour les gaz à effet de serre, les flux de  $\text{CO}_2$  issus de la végétation sont modélisés en ligne par le module CTESSEL (Boussetta et al., 2013). Les autres flux de surface sont prescrits à l'aide d'inventaires ou de climatologies.

Comme présenté par Dragani et al. (2018), l'utilisation de cette chimie très complète intégrée dans IFS pour CAMS conduit à un surcoût numérique important qui peut plus difficilement s'appliquer en PNT. Actuellement, la climatologie des aérosols utilisée en PNT est dérivée du modèle d'aérosols développé dans CAMS et sa mise en œuvre dans IFS est décrite dans Bozzo et al. (2017). L'effet direct des aérosols sur le rayonnement est pris en compte. Pour l' $\text{O}_3$  stratosphérique, un schéma linéaire est utilisé, tandis que des climatologies issues de MACC sont utilisées pour le  $\text{CO}_2$  et les gaz traces.

### 3 Développement du système AROBASE

Le système AROBASE vise à mettre en place un couplage efficace, robuste, modulaire et transportable entre composantes environnementales (atmosphère, océan, vagues, surfaces continentales, chimie atmosphérique) basé sur AROME. Il s'appuie sur des développements réalisés ces dernières années, qui ont permis de préfigurer certains choix de couplage et d'implémentation, et d'en décrire les bénéfices escomptés pour diverses applications. L'état de ces développements est décrit ci-après, avant de préciser les étapes de développement et d'évaluation d'AROBASE.

#### 3.1 Développements en cours de systèmes couplés à fine échelle basés sur AROME

L'utilisation du même modèle de surface (SURFEX) couplé aux modèles atmosphériques de Météo-France a permis de nombreuses études sur les processus de couplage entre l'atmosphère et les surfaces et le transfert de nouveaux développements de la recherche vers l'opérationnel.

L'interface de couplage SURFEX-OASIS, décrite dans Voldoire *et al.* (2017), permet le couplage entre un modèle atmosphérique, un modèle hydrologique, un modèle océanique pouvant inclure la glace de mer et un modèle de vagues (Fig. 7). L'interface a été développée de manière à permettre une grande flexibilité de couplage, que ce soit par les possibilités de modèles impliqués, les champs échangés ou en termes d'échelles, résolutions et domaines. Ceci facilite grandement le développement de nouveaux systèmes couplés et une maintenance partagée, notamment au CNRM.

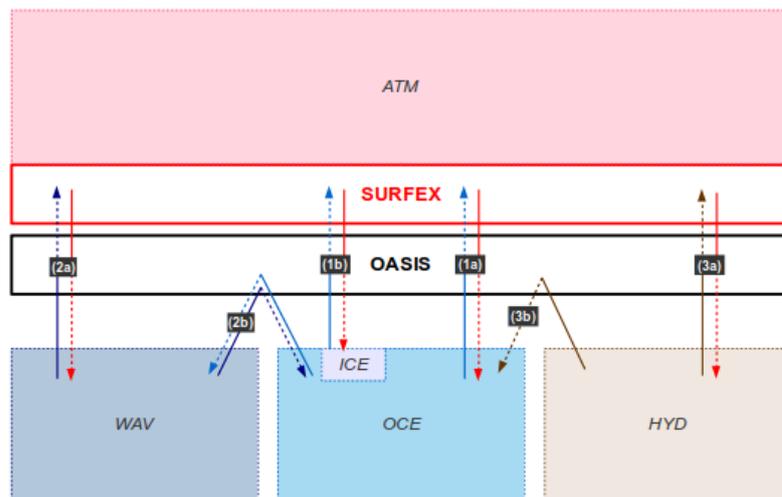


FIG. 7 : Schéma de l'architecture des systèmes couplés centrés autour de l'interface de couplage SURFEX-OASIS. Voir Voldoire *et al.* (2017) pour la description complète.

L'interface SURFEX-OASIS a permis d'élargir, pour les modèles à aire limitée et à résolution fine AROME et MESO-NH, la gamme des couplages, en particulier pour le domaine océanique. Plusieurs simulations incluant des nouveaux couplages pour MESO-NH ont été réalisées au LACy et au CNRM, souvent en collaboration avec d'autres partenaires (cf. partie 2.1.4). On se

concentre ci-après sur les développements et les résultats obtenus avec les couplages d'AROME (voir également la partie "modèles couplés de recherche basés sur AROME" du Tableau 2)

### Couplage Atmosphère-Océan-Vagues

Le couplage entre AROME et NEMO a été développé en 2015 et a tout d'abord été appliqué à la Méditerranée occidentale en combinant AROME-WMED (cy38t1 à 2.5km de résolution Fourrié et al., 2015) et une configuration régionale du modèle NEMO (v3.6) au 1/36° (WMED36, Lebeaupin Brossier et al., 2014), configurations dédiées à l'étude des périodes d'observations spéciales (SOPs, pour *Special Observation Periods*) du programme HyMeX. Le système AROME-NEMO WMED a notamment permis d'évaluer l'impact du couplage pour deux situations fortement précipitantes (Rainaud et al., 2017). Les résultats montrent que, dans ces cas, l'océan 3D interactif conduit à la diminution de l'évaporation (de -10% à -20%), donc à l'apport d'humidité pour le système précipitant. En situation de mistral, le couplage démontre sa capacité à reproduire et prendre en compte le refroidissement rapide et intense de la surface océanique, en grande partie dû à l'entraînement à la base de la couche de mélange.

Le couplage du modèle atmosphérique AROME sur la zone métropolitaine (AROME-France) à 1.3 km de résolution au modèle de vagues WW3 a ensuite été réalisé (Sauvage et al., 2020). Ce travail s'est accompagné de l'introduction de la paramétrisation *Wave-Age-dependent Stress Parametrization* (Bouin et al., sub.) afin de pouvoir prendre en compte l'état de mer dans le calcul des flux turbulents à la surface de la mer, et ainsi reproduire le comportement physique du coefficient Charnock en fonction du régime de vent, ainsi que sa dépendance aux vagues.

L'impact du couplage atmosphère-vagues a été évalué sur le cas d'épisode méditerranéen survenu entre le 12 et le 14 octobre 2016 dans le Sud-Est de la France, cas qui était caractérisé par un fort vent d'Est (>20 m/s) d'origine continentale sur la mer Ligure, générant d'importants échanges à l'interface air-mer et était associé à une mer développée et jeune, donc fortement en

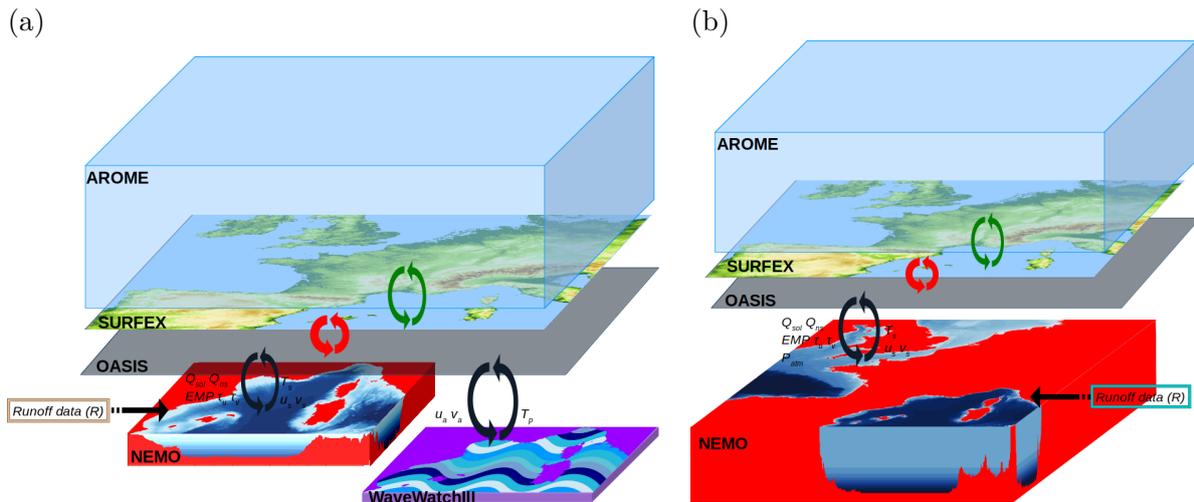


FIG. 8 : (a) Architecture du système couplé AROME-NEMO-WW3 : Le domaine d'AROME-France est indiqué par le relief (boite SURFEX) et le domaine NWMED72 par la bathymétrie (boite NEMO) - Figure extraite de Sauvage et al. (2021). (b) Système couplé AROME-France/NEMO-FRA36.

interaction avec le vent de basses couches. Les résultats des tests de sensibilité ont montré que la prise en compte de l'état de mer par le forçage ou le couplage interactif augmentait la rugosité et le stress du vent, et avait un impact significatif sur les basses couches de l'atmosphère en réduisant notamment la vitesse du vent de surface, conduisant à un déplacement de la zone de convergence à l'origine du système en mer et donc de sa localisation (Fig. 9). Les flux de chaleur ont été finalement peu modifiés par la prise en compte des vagues alors que les conditions étaient favorables avec une mer très forte et une mer du vent colocalisée avec de forts flux de chaleur. L'état de mer, tel que pris en compte ici, ne semble pas pouvoir influencer de manière substantielle les échanges de chaleur à l'interface air-mer durant un épisode méditerranéen. Toutefois, sa prise en compte apparaît comme pertinente pour la prévision du temps à haute résolution, du fait de son impact sur la dynamique des basses couches atmosphériques, un élément clé de la formation des systèmes fortement précipitants.

Des simulations couplées océan-atmosphère-vagues NEMO-AROME-WW3 (Fig. 8a) ont ensuite été réalisées et comparées aux simulations couplées atmosphère-vagues et océan-atmosphère (Sauvage *et al.*, 2021). Les résultats montrent d'abord une sensibilité de la prévision aux couplages :

- Dans les expériences incluant le couplage interactif avec l'océan, le protocole d'initialisation du compartiment océanique a introduit une modification du champ de SST initial et conduit à des modifications dans l'alimentation en chaleur et humidité des systèmes fortement précipitants. L'évolution interactive de l'océan, *i.e.* le refroidissement de surface, permet ensuite de rapidement modérer les flux de chaleur simulés.
- Le couplage avec un modèle de vagues conduit principalement à modifier la dynamique en basses couches comme vu précédemment.

Les couplages ont finalement entraîné des différences notamment sur la localisation de la convergence et des précipitations en mer (Fig. 9) par deux mécanismes différents. Dans le premier cas (couplage océan et changement de SST initiale), il s'agit d'un renforcement du système convectif avec un déplacement un peu plus rapide vers l'Est, rappelant les résultats de tests de sensibilité à la SST sur d'autres cas fortement précipitants (e.g. Lebeaupin *et al.*, 2006). Dans le deuxième cas, il s'agit d'un effet direct de la prise en compte des vagues aboutissant au ralentissement de l'écoulement en amont du système convectif.

En 2020, le travail de Joris Pianezze à Mercator Ocean International en collaboration avec le CNRM a conduit à une mise à jour du couplage entre AROME-NEMO pour la mise au point d'une nouvelle configuration du système couplé sur une zone "*Iberian Biscay Irish*" (IBI) étendue à l'Est. Le système couplant AROME (cy43t2, 2.5 km de résolution) et NEMO (v3\_6, configuration eNEATL36, extension de IBI/NEATL36 en Méditerranée Occidentale) a ainsi été développé en incluant les échanges de la pression de surface pour l'effet du baromètre inverse<sup>5</sup> et la prise en compte des courants de surface dans le schéma de turbulence (atmosphérique).

---

5. élévation du niveau de la mer résultant d'un ajustement dynamique suite au passage d'un système de basses pressions

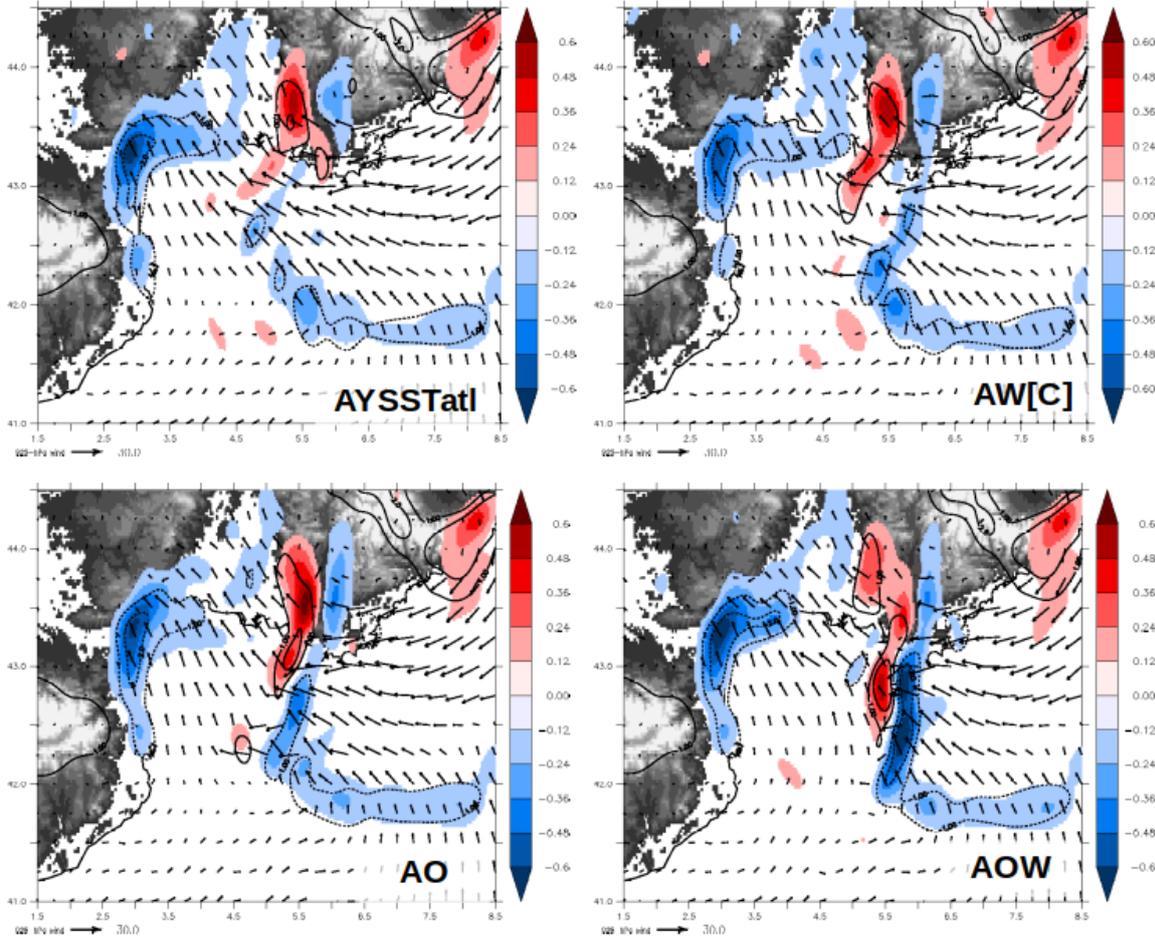


FIG. 9 : Divergence des vents ( $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ) et vitesse verticale ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ , contours noirs) à 950 hPa, et vent à 925 hPa (m/s, flèches); le 14 octobre à 00 UTC pour la simulation AROME seul (AYSSTatl), la simulation couplée AROME-WW3 (AW[C]), la simulation AROME-NEMO (AO) et la simulation tri-couplée AROME-NEMO-WW3 (AOW) (prévisions démarrant le 13 octobre 2016 à 00 UTC). Le couplage vagues conduit à un ralentissement du vent d'Est avec un déplacement de la zone de convergence en mer. Le couplage océanique conduit à une température de surface initiale plus élevée venant renforcer les flux de chaleur et l'évaporation alimentant la convection. Les deux couplages conduisent à un déplacement vers l'Est et à une augmentation de la stationnarité du système convectif en mer qui est plus intense que dans la référence. Figure extraite de [Savage et al. \(2021\)](#).

Il a été testé pour des prévisions jusqu'à 7 jours d'échéance en adaptation dynamique des prévisions du modèle IFS. Sur la période du 12 au 18 octobre 2018, marquée par des événements météorologiques intenses ([Pianezze et al., 2022](#)), les résultats confirment que le champ de vent, en particulier sa divergence, est fortement sensible au couplage, ce qui produit rapidement des conséquences localement sur les conditions météorologiques en basses couches et la convection, puis progressivement conduit à des différences de plus grande échelle et pour la prévision océanique, bien que ces dernières différences apparaissent moins importantes que celles induites par le changement de forçage atmosphérique (résolution ou paramétrisation des flux de surface).

Les résultats scientifiques et techniques obtenus sur la zone Europe de l'Ouest ont permis d'établir une nouvelle configuration océanique, nommée FRA36 (résolution de  $1/36^\circ$ ), pour le

couplage d'AROME-France. Cette nouvelle configuration permet à la fois de bénéficier d'une configuration océanique au plus proche de la configuration IBI en termes de choix techniques et physiques, et d'étendre le couplage d'AROME-France sur la zone Atlantique-Manche-mer du Nord (en comparaison avec le couplage développé précédemment uniquement sur la Méditerranée par Sauvage *et al.* (2021)). Le couplage de NEMO-FRA36 avec AROME (Fig. 8b) a été finalisé entre Mercator Ocean International et le CNRM (GMME/PRECIP) et appliqué pour deux situations estivales (dans le cadre du stage M2 de Misi, 2022).

Parallèlement, des travaux sur le couplage océan-atmosphère sur le bassin du Sud-Ouest de l'océan Indien (SOOI, ci-après) ont été réalisés au LACy, pour améliorer la compréhension des interactions air-mer pendant les cyclones tropicaux et leur représentation pour la prévision. Dans AROME-OI, comme pour tous les AROME-OM, le couplage avec le modèle de couche de mélange océanique 1D (CMO1D) permet de représenter une évolution océanique au cours de la prévision. Néanmoins, le système d'équations dynamiques et thermodynamique du modèle 1D est dérivé en négligeant les termes d'advection et le terme du gradient de pression et ne tient donc pas compte des modifications associées à l'advection océanique horizontale et verticale. Le couplage à un modèle océanique 3D permet de prendre en compte ces effets, et en particulier de représenter explicitement les upwellings générés par le pompage d'Ekman au passage d'un cyclone. Ces derniers contribuent au refroidissement en surface et donc à la rétroaction négative de l'océan sur la prévision d'intensité et de structure des cyclones tropicaux.

Le couplage d'AROME-OI a été réalisé avec une configuration de NEMO de résolution horizontale de  $1/12^\circ$  en grille de type ORCA (environ 9 km dans la région SOOI, cf. par exemple Bielli *et al.*, 2021). Cette configuration possède ainsi exactement les mêmes caractéristiques de grille sur l'horizontale et sur la verticale que le modèle global de prévision océanographique opérationnel (PSY4) de Mercator Ocean International (50 niveaux verticaux inégalement espacés dont l'épaisseur est comprise entre 1 m en surface et 400 m).

L'étude de Corale *et al.* (2023) a permis d'évaluer la configuration couplée AROME-NEMO à partir d'une trentaine de simulations associées à 7 cyclones différents. L'analyse statistique des erreurs d'intensité par rapport aux données de référence, i.e. la "best-track", montre que le couplage d'AROME-OI avec NEMO améliore la prévision d'intensité des cyclones par rapport au couplage 1D (Fig. 10). Cette amélioration est d'autant plus importante dans le cas de cyclones ayant une vitesse de déplacement lente. Cette étude met par ailleurs en évidence l'importance du choix de la condition initiale océanique pour la prévision des cyclones. En remplaçant la condition initiale "PSY4" utilisée dans la version opérationnelle actuelle pour initialiser la CMO par un "cyclage", c'est-à-dire un état océanique provenant d'une prévision AROME-NEMO précédente, une amélioration de la prévision de l'intensité cyclonique dans les 24-30 premières heures de simulations est obtenue, et ce, même dans le cas de cyclones rapides.

Pour la prévision de l'intensité des cyclones tropicaux, l'amélioration de la paramétrisation des flux de surface à l'interface air-mer en condition de vent fort est nécessaire. La paramétrisation WASP ainsi que le couplage d'un modèle de vagues (i.e. couplage AROME-NEMO-WW3)

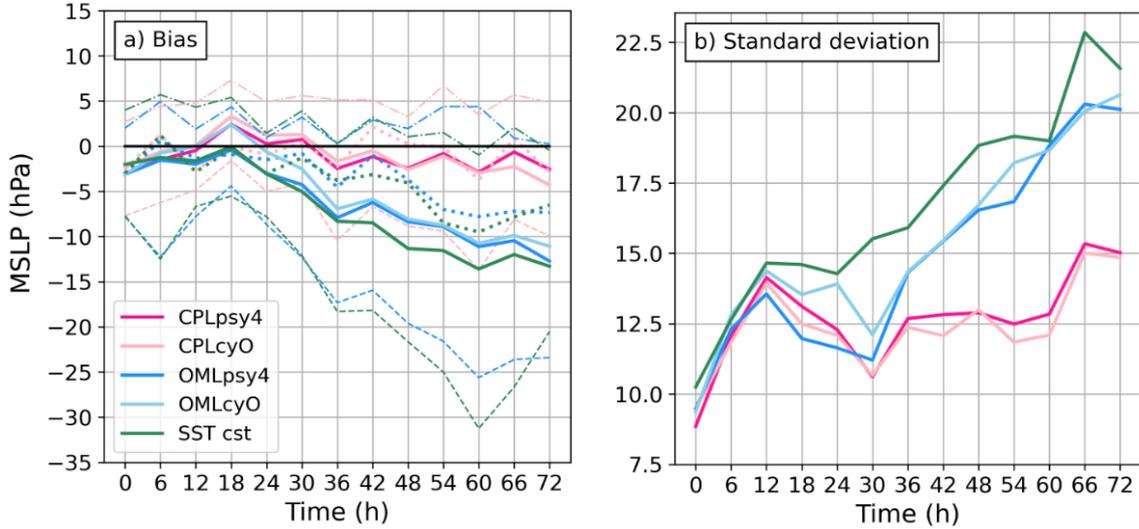


FIG. 10 : (a) Biais and (b) écart type pour  $P_{min}$ (hPa) des expériences de sensibilité par rapport à la "best-track", basés sur 31 prévisions de 7 cyclones tropicaux différents de la région du SOOI. Les expériences "CPL" sont les expériences couplées AROME-NEMO, les expériences "OML" sont les prévisions AROME-OI incluant le couplage au modèle océanique 1D. L'initialisation océanique à partir des prévisions océanographiques globales est indiquée par "psy4", tandis que les expériences incluant un cyclage de la condition initiale océanique sont identifiées par "cyO". L'expérience avec une température de surface de la mer est nommée "SST cst" - Figure extraite de Corale *et al.* (2023).

ont été testés et évalués pour le cas du cyclone Batsirai en 2022, et semblent améliorer la représentation des vents et de la structure du cyclone en surface, malgré une sous-estimation du creusement du cyclone. Les évaluations de l'apport du couplage océan-atmosphère-vagues et de WASP doivent être poursuivies pour d'autres cyclones et d'autres situations.

### Couplage des poussières désertiques

Le couplage avec les poussières désertiques, initialement développé dans Méso-NH (section 2.1.4) et SURFEX, a été implanté dans ALADIN, AROME et ARPEGE, menant respectivement aux modèles dénommés ALADIN-DUST (Mokhtari *et al.*, 2015), AROME-DUST (Kocha, 2011) et ARPEGE-DUST (Ambar & Mokhtari, 2017).

Depuis 2022, une action est menée à GMGEC/PLASMA pour évaluer AROME-DUST dans les versions récentes de cycles (opérationnel cy46t1\_op1 et double cy48t1\_op1), notamment sur le domaine AROME-Sahel qui couvre une zone de production d'aérosols désertiques.

### Synthèse sur les couplages existants

Les limitations sur les couplages d'AROME développés jusqu'à présent concernent l'absence de prise en compte des échanges vagues-océan, la question de l'initialisation océanique, l'insertion de nouveaux compartiments, notamment l'hydrologie continentale et les rivières permettant une estimation du cycle de l'eau rapide, la chimie gazeuse, et les aérosols interactifs pour prendre en

TAB. 2 : Description des compartiments pour une partie des modélisations développées et opérées à Météo-France

plateforme	Compartiments										Vagues
	Atmosphère		Surfaces continentales				Océan		biogéochimie		
	Dynamique/Physique	Chimie gazeuse / Aérosols	Sol-Végétation(-Neige)   Lacs	Villes	Rivières (roulage)	(libre)	glace de mer				
<i>Modèles de climat</i>											
CNRM-CM <sup>a</sup>	ARPEGE-Climat		SURFEX ISBA	Flake	CTRIP	NEMO	GELATO				
CNRM-ESM	ARPEGE-Climat	TACTIC + REPROBUS	SURFEX ISBA	Flake	CTRIP	NEMO	GELATO	PISCES			
CNRM-RCSM	ALADIN-Climat	TACTIC	SURFEX ISBA	Flake	CTRIP	NEMO					
<i>Modèles de prévision numérique</i>											
PNT échelle globale	ARPEGE	forçage aérosols (climatologie)	SURFEX ISBA	Flake	TEB	forçage fixe (analyse SST)	SURFEX -GELATOID				
PNT AROME-France	AROME	forçage aérosols (climatologie)	SURFEX ISBA	Flake	TEB	forçage fixe (analyse SST)					
PNT AROME-OM <sup>b</sup>	AROME	forçage aérosols (climatologie)	SURFEX ISBA	Flake	TEB	SURFEX- -CMOIID					MFWAM
Prévision marine régionale hauteur libre	forçage (prévision vent)					forçage (prévisions courant de surface)					
Composition atmosphérique (MOCAGE)	forçage (prévisions)	RACM + REPROBUS + aérosols MOCAGE				émission dynamique (poussières désertiques et sels marins), émissions quotidiennement mises à jour (feux) et cadastres d'émissions pour le reste					
<i>Modèles couplés de recherche basés sur AROME</i>											
AROME-NEMO WMED (Rainaud et al., 2017)	AROME-WMED	forçage aérosols (climatologie)	SURFEX ISBA	Flake	TEB	forçage pour l'océan	NEMO				
AROME-NEMO-WW3 France (Sauvage et al., 2021)	AROME-FR	forçage aérosols (climatologie)	SURFEX ISBA	Flake	TEB	forçage pour l'océan	NEMO				WW3
AROME/NEMO/WW3 Océan Indien (Corale, 2022)	AROME-IO	forçage aérosols (climatologie)	SURFEX ISBA	Flake	TEB	forçage pour l'océan	NEMO				WW3
AROME-NEMO eNEATL (Pianezze et al., 2022)	AROME	forçage aérosols (climatologie)	SURFEX ISBA	Flake	TEB	forçage pour l'océan	NEMO				
AROME-NEMO France (Misi, 2022)	AROME-FR	forçage aérosols (climatologie)	SURFEX ISBA	Flake	TEB	forçage pour l'océan	NEMO				
AROME-DUST	AROME	poussières désertiques d'ORILAM	SURFEX ISBA	Flake	TEB	forçage fixe (analyse SST)					
<i>Le système AROBASE</i>											
AROBASE	AROME	ACCALMIE : chimie en ligne et aérosols interactifs	SURFEX ISBA	Flake	TEB	CTRIP	NEMO	S13	PISCES	MFWAM	

a. également modèle de la prévision saisonnière

b. pour cinq domaines outre-mer

compte leurs interactions avec le rayonnement et la microphysique en particulier.

Dans le but de progresser, Météo-France, principalement au travers du CNRM, a engagé un projet transverse pour l'assemblage du modèle AROME avec différentes composantes du système environnemental. Le projet, tout comme la plateforme de modélisation qui en sera issue, a été nommé AROBASE. Les informations ci-après décrivent plus en détail les options méthodologiques mises en place pour la conduite de ce projet.

### 3.2 Plan de travail du projet AROBASE

Le projet AROBASE détaillé ci-après et dans la Figure 11 a démarré en février 2022, pour une durée de 30 mois. Les étapes du projet ont été rassemblées au sein de trois groupes de travail scientifique et technique :

- l'assemblage d'un outil de recherche multi-couplé (lot 2) ;
- la mise en place du système kilométrique optimal pour la prévision numérique (lot 3) ;
- la synergie avec les observations (lot 4) ;

auxquels s'ajoutent des actions de transfert et communications (lot 5) et un volet de pilotage et coordination (lot 1).

AROBASE est fortement connecté au projet transverse ACCALMIE pour l'intégration au travers d'une interface standard de la chimie gazeuse et des aérosols avec les émissions et le dépôt, leur transport (résolu et sous-maille) et leurs interactions avec la microphysique nuageuse et le transfert radiatif.

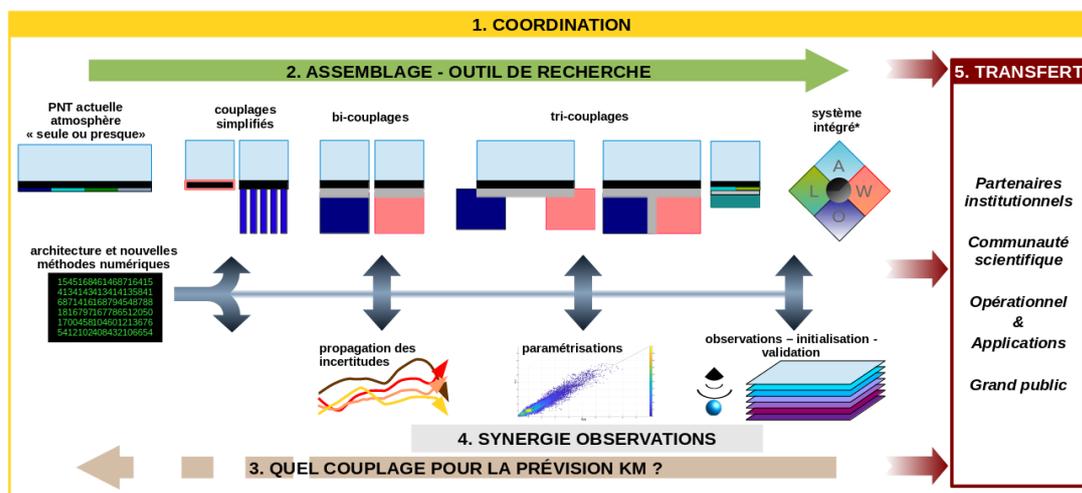


FIG. 11 : Vue schématique du projet AROBASE.

#### 3.2.1 Assemblage d'un outil de recherche

Cette partie du projet est dédiée à la construction d'un outil assemblé multi-couplé à échelle kilométrique incluant un module atmosphérique (physique, chimie gazeuse et aérosols), une représentation des surfaces continentales (sol, végétation, villes, lacs, neige, hydrologie), un modèle

océanique (avec possibilité d’inclure la glace de mer et la biogéochimie marine), une modélisation des vagues (en incluant pour toutes les surfaces les émissions et dépôts).

Le développement d’AROBASE vise ainsi à enrichir les couplages pour le modèle atmosphérique AROME. Les couplages d’AROME avec les surfaces passent actuellement soit par la modélisation explicite on-line dans SURFEX ou soit par l’utilisation de l’interface de SURFEX avec le coupleur OASIS. Ces deux stratégies d’assemblage rendent d’ores et déjà AROME prêt à intégrer différents couplages, d’une part par des modifications des schémas de SURFEX et d’autre part par des connexions avec les modèles de routage hydrologique, océanique et de vagues. L’assemblage de la composante atmosphérique « chimie-aérosols » sera spécifiquement réalisé dans le cadre du projet ACCALMIE. L’assemblage se fera sous la forme d’une bibliothèque décrivant les processus gazeux et d’aérosols activable directement en ligne dans AROME, qui pourra être couplée aux processus nuageux et de rayonnement, sans couplage externe.

L’outil numérique de référence pour la représentation des surfaces continentales est SURFEX, qui inclut la représentation du sol, de la végétation, de la neige par ISBA, les lacs – par l’utilisation de FLake notamment – et de la ville et surfaces urbanisées par le modèle TEB. Comme vu précédemment, SURFEX inclut une interface avec le coupleur OASIS qui permet l’assemblage avec un modèle d’hydrologie de surface (CTrip) incluant le modèle de bilan de masse des lacs (Mlake). Pour la construction d’AROBASE, le premier développement sur ce compartiment concerne donc la consolidation du couplage à SURFEX (dans AROME) du modèle hydrologique CTrip dans une configuration régionale et à fine résolution (résolution cible de  $1/12^\circ$  Munier & Decharme, 2022), incluant les effets de l’anthropisation (c.f. Sadki et al., 2023). Dans le cadre d’ACCALMIE, le modèle SURFEX va également être enrichi afin de représenter les émissions et dépôts à la surface, tant pour les processus dynamiques que pour les informations issues d’inventaires. Hormis ces deux évolutions (hydrologie et émissions/dépôts), AROBASE tirera efficacement parti des évolutions de chacune des composantes insérées dans SURFEX à mesure des évolutions proposées.

Le modèle océanique inclus dans AROBASE est le modèle NEMO qui est un outil majeur de modélisation océanographique, notamment en Europe. En plus de la représentation de l’océan physique, NEMO inclut un module de glace de mer (SI3) et un module de biogéochimie (PISCES), disponibles en ligne. NEMO dispose également de systèmes d’assimilation [NEMOVAR (3DVar) ou SEEK (filtre de Kalman)]. Le code NEMO inclut une interface avec le coupleur OASIS permettant de le connecter à un modèle d’atmosphère, à un modèle de routage de rivière ainsi qu’à un modèle de vagues. Le couplage océan-vagues a particulièrement été enrichi dans la dernière version de NEMO (version 4) par les travaux de Couvelard et al. (2020).

Pour la représentation des vagues, les discussions entre le CNRM et DIROP/MAR ont permis de choisir d’introduire le modèle MFWAM dans le système AROBASE. Les éléments clés ayant permis d’aboutir à ce choix sont :

- la place de MFWAM dans la chaîne de prévision actuelle de Météo-France (Fig. 12), ainsi que vis-à-vis des prévisionnistes ;
- une plus large maîtrise du code en interne à DIROP/MAR, et des échanges réguliers

- avec le CEPMMT concernant les évolutions du code WAM ;
- les possibilités d’atteindre des résolutions kilométriques (2.5 km au moins) et de déployer des configurations régionales (suivant les différents domaines AROME) ;
- l’assimilation de données.

L’insertion de MFWAM se décline en trois phases, dont les deux premières ont été réalisées au cours des 12 premiers mois du projet : (i) l’insertion d’une interface avec OASIS dans MFWAM par DIROP/MAR en forte collaboration avec le CNRM et MOi, ainsi que le CERFACS ; (ii) la mise au point de tests d’échanges avec NEMO d’une part et AROME/SURFEX d’autre part ; (iii) un travail d’enrichissement des champs d’interface incluant des études comparant différentes physiques de couplage atmosphère-vagues et océan-vagues (dans le cadre de collaborations à consolider avec le LOPS, le LOCEAN, le LEGOS et MOi notamment).

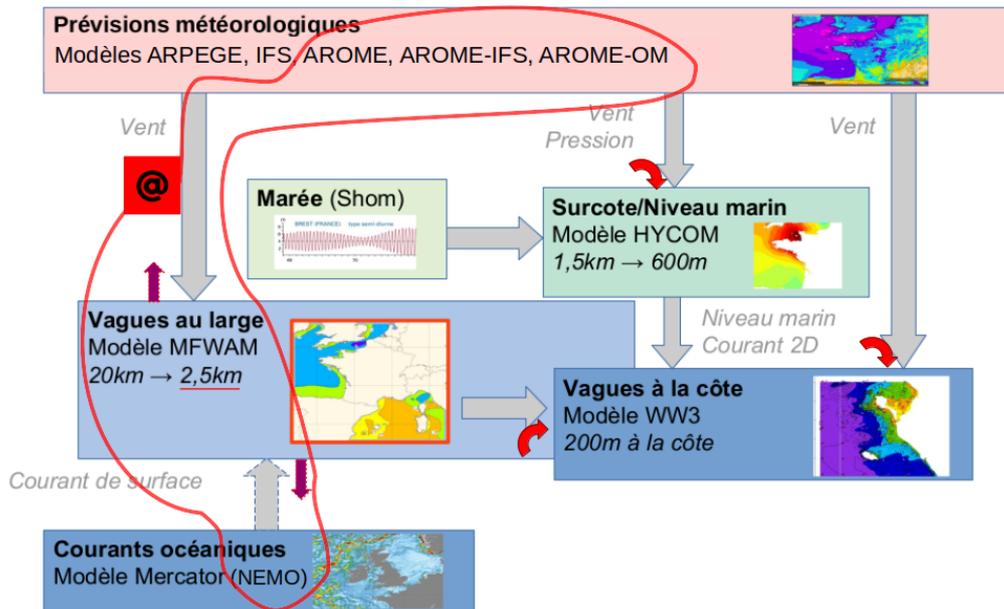


FIG. 12 : Illustration schématique de la chaîne d’exécution de prévision marine (en 2021, M. Chevallier pers. comm.) et visualisation du positionnement d’AROBASE (contour pour les couplages et flèches rouges pour des forçages en aval).

SURFEX est l’élément clé de la construction d’AROBASE, de sa modularité et de ses possibilités de transfert. Tout le long du projet, une veille sera assurée pour garantir la cohérence entre les évolutions techniques de SURFEX et l’interface avec le coupleur OASIS au coeur du développement du système AROBASE.

Le couplage AROME-NEMO a particulièrement bénéficié de l’interface de couplage SURFEX-OASIS, la même mise en œuvre dans les modèles de plus grande échelle du CNRM pour les échanges océan-atmosphère. Grâce à la modularité apportée par l’utilisation du coupleur OASIS, le code de chaque modèle peut évoluer indépendamment d’autres modules « couplables » tout en restant connectable. De plus, grâce au caractère générique de l’interface SURFEX-OASIS, les possibilités d’assemblage dans AROBASE sont transparentes pour l’utilisation de

nouvelles versions de modèles, voire d'un autre modèle pour certaines applications en particulier CROCO pour l'océan et WW3 pour les vagues, pour des utilisateurs de système couplé à plus fine échelle et pour des études du domaine côtier. Ceci offre également des opportunités de partage de connaissances sur la physique de couplages à différentes échelles.

Concernant le critère important de transportabilité, l'accès et l'utilisation aux outils de définition de domaines, d'extraction de conditions initiales et aux limites, et de calculs d'interpolation au sein d'OASIS seront facilités. Un travail sera ainsi réalisé pour ouvrir, documenter et pérenniser les outils actuels basés pour AROME/SURFEX sur des expériences dans l'environnement spécifique Vortex/Olive et pour NEMO sur l'outil SIREN. Pour CTRIP et MFWAM, ces mêmes types d'outils de transportabilité seront à consolider.

Pour une meilleure coordination, un outil centralisant les accès aux dépôts des codes sources et outils de transportabilité avec des configurations régionales de référence et fichiers d'environnement, sera finalement construit et partagé avec l'ensemble des développeurs, partenaires de recherche et utilisateurs d'AROBASE.

### 3.2.2 Système pour la prévision numérique

Cette partie du projet AROBASE vise à définir le système multi-couplé "optimal" pour la prévision numérique. Cela nécessite le développement des couplages complets dans un mode d'utilisation identique à celui de l'opérationnel afin d'évaluer les impacts des couplages sur la prévision, tout en conservant les possibilités de mise en œuvre des modes de couplages intermédiaires et/ou plus simplifiés.

Pour progresser, deux phases ont été définies, notamment pour pouvoir travailler dans un premier temps par blocs séparés en parallèle :

Le premier bloc concerne les couplages atmosphère-surfaces continentales. Hormis le routage des rivières et les échanges chimiques, ces couplages sont déjà actifs dans AROME par l'intermédiaire de SURFEX online. Les travaux pour ce bloc consistent à poursuivre l'enrichissement et l'exploitation des paramétrisations et modélisations incluses dans SURFEX pour le sol, la végétation, la neige, les lacs, rivières et la ville, dans la continuité des travaux en cours.

Le second bloc est constitué des couplages entre l'atmosphère physique, la chimie gazeuse et les aérosols, réalisés dans le projet ACCALMIE qui porte à la fois sur les systèmes globaux et régionaux. Pour ces derniers, les couplages avec les aérosols seront évalués en priorité.

Le troisième bloc concerne le couplage atmosphère-océan 3D-vagues. Comme vu précédemment, des briques de ces couplages existent en mode recherche, mais reposent sur un nombre limité de personnes, qui ont permis d'introduire le système couplé AROME-NEMO(-WW3) dans le système d'environnement Vortex/Olive (outil de mise au point et de contrôle d'expériences de prévision) et de le maintenir par des efforts continus entre le CNRM et le LACY pour permettre l'utilisation des couplages dans les différentes versions d'AROME (avec les évolutions des versions de SURFEX associées). Le travail d'intégration des sources de couplage à une version officielle d'AROME a été réalisé pour la première fois début 2021 pour le cy48t1.

Pour la mise en place du couplage océanique 3D pour la prévision numérique, une première tâche vise donc à sécuriser un package de base, tout en insérant des possibilités pour l'initialisation du compartiment océanique (adaptation dynamique d'analyses hebdomadaires et/ou de prévisions issues des systèmes de Mercator Ocean International, spin-up, warm-up ou méthode d'accélération, cyclage) et la préparation de conditions latérales.

Pour le couplage vagues, le délai induit par les travaux d'insertion d'OASIS dans MFWAM, ont obligé à adopter une stratégie d'intégration progressive du compartiment vagues, d'abord en mode simplifié, correspondant à l'insertion d'un forçage servant à la prévision d'AROME dans un premier package, avant d'intégrer les différentes tâches et options nécessaires à l'exécution interactive de MFWAM.

A la fin de cette première phase de développement, une évaluation préliminaire du rapport bénéfices/coûts du couplage océan-atmosphère, puis océan-atmosphère-vagues sera conduite. Un protocole d'exécution de prévisions incluant différents crans de couplage sera conduit sur une période et/ou un nombre réduit de cas d'étude.

La qualification des bénéfices inclura l'analyse de scores de prévisions en prenant en considération plusieurs types de prévisions (déterministe / ensemble, France métropolitaine / Outre-mer). Pour compléter et tenir compte du fait que l'obtention de résultats sur des scores moyens est souvent difficile, une analyse des résultats de prévision pour des cas d'études sera réalisée afin d'évaluer l'apport de plus de réalisme dans la représentation des phénomènes. Les bénéfices en terme de chaîne de production seront examinés afin de mettre en avant les gains possibles par la mise au point de prévision couplée par rapport à une exécution séquentielle modèle météorologique puis modèle de vagues, tel que réalisée actuellement (cf. Fig. 12 et la question sur les coûts numériques ci-après).

L'estimation des coûts comprendra une estimation des coûts numériques directement induits par le couplage, qui comprend la charge sur les entrées/sorties, l'exécution de tâches préparatoires à la prévision et le surcoût pour une prévision couplée proprement dite [par rapport à une (ou plusieurs) prévision(s) forcée(s), voir Fig. 12 à titre d'illustration] et à son post-traitement. En outre, le critère de temps d'exécution est primordial, ce qui contraindra l'optimal pour les modèles et les méthodes de couplage.

Dans la seconde phase, l'ensemble des couplages seront examinés dans une version complète du système AROBASE, avec une revue des bénéfices et coûts en mode multi-couplé. La mise en commun de tous les couplages répond à deux objectifs : i) conclure sur l'apport d'un compartiment (ou bloc) sur la prévision en présence des autres, en considérant des effets croisés (aérosols/vagues, ou ville/océan par exemple), et ii) de proposer un premier démonstrateur avec une configuration pré-optimale pour la prévision numérique.

### **3.2.3 Synergie avec les observations**

Le développement du système AROBASE doit permettre de mieux tirer parti des observations du système environnemental. En effet, la dimension multi-composantes des observations

est souvent sous-exploitée par les systèmes de modélisation et de prévision.

Cette partie du projet vise à construire et consolider la synergie entre l'outil de modélisation multi-couplé développé à des fins de recherche et de prévision et les observations.

L'évaluation du modèle développé passe par la comparaison aux observations. Pour cela, il est proposé de réaliser un inventaire des cas d'étude d'intérêt pour la prévision numérique, ainsi que pour les études de processus. L'évaluation portera largement sur l'estimation des échanges aux interfaces et leurs paramétrisations, mais servira aussi à qualifier les autres paramétrisations circonscrites à l'intérieur des modélisations de compartiment, mais à fort intérêt pour les différents couplages (flux radiatifs, mélange vertical océanique, convection atmosphérique, par exemple). Les phénomènes d'intérêt ciblés dans l'inventaire sont les événements intenses comme les cyclones, les tempêtes et vents forts locaux, les épisodes de précipitations et crues, les épisodes de canicules et sécheresses, les transports de poussières désertiques et de polluants, les situations de nuages bas et les effets liés au cycle diurne (brise, convection).

Des campagnes de mesures récentes ou planifiées (EUREC4A(-OA), Renov'Risk(-cyclones), TEAM-X, la campagne SUMOS du CNES, HI-LIAISE, PANAME-2022), ainsi que des données d'opportunité (mesures collectées en amont d'implantations de parcs éolien par exemple ou dans le cadre de la préparation des Jeux Olympiques de Paris en 2024) ont été également identifiées comme premier échantillon de sources documentées pouvant permettre de répondre à des thématiques pour différents blocs et couplages.

Pour répondre au besoin de validation des utilisateurs, un effort sera réalisé pour orienter vers les données collectées par les différents réseaux opérationnels et/ou par des entités de recherche, souvent cloisonnées par compartiment, en produisant un guide d'accès, ainsi qu'une liste de méthodes éprouvées d'évaluation.

En complément des campagnes et cas d'étude inventoriés, une collecte d'informations sur les cas d'intérêt pour la prévision numérique sera organisée au travers d'échanges avec les services de prévision.

Au fur et à mesure des avancées sur l'assemblage et la construction d'un démonstrateur de prévision AROBASE, des exécutions seront réalisées sur une sélection de cas, et les résultats obtenus seront livrés pour permettre un maximum de tests d'applications aval (dérives et prévision marine côtière, prévision de débits...). À l'issue du projet, le démonstrateur AROBASE pourra être proposé pour l'accompagnement de campagnes de mesure et pour la comparaison de sorties de modèles à des observations issues de nouveaux instruments.

Il est à noter que l'assimilation de données en contexte couplé n'est pas traitée directement dans les projets transverses AROBASE et ACCALMIE. Néanmoins, les développements qui sont dévolus à l'initialisation et à la synergie avec les observations viseront à identifier et préparer au mieux les futures possibilités qui seront apportées par les couplages et par la mise en place de nouvelles méthodes d'assimilation (assimilation couplée atmosphère-surfaces continentales, 4D-EnVAR).

### 3.3 Moyens, cadre programmatique et projets structurants

L'objectif de cette partie est de décrire les principaux cadres programmatiques et/ou des collaborations autour de la modélisation régionale en tant qu'outil de recherche, pour la prévision numérique et la projection climatique, impliquant Météo-France, en particulier au travers de ses unités de recherche.

Les projets AROBASE et ACCALMIE impliquent des activités scientifiques et techniques par la mise en commun d'expertises de personnels de recherche à Météo-France, travaillant dans les différents groupes du CNRM, ainsi que dans l'équipe "Cyclones" du LACY. Les projets associent également les équipes en charge de recherche et développement au sein d'autres directions thématiques, notamment le service de modélisation et prévision marine (DIROP/MAR). Les travaux menés au CNRM impliquent fortement certains personnels de recherche CNRS, matérialisant ici la collaboration étroite entre Météo-France et le CNRS sur l'amélioration des connaissances et outils de modélisation du domaine océan/atmosphère et les interfaces avec les surfaces continentales.

L'association de partenaires scientifiques est essentielle pour les projets AROBASE et ACCALMIE. Elle permet non seulement l'élaboration conjointe de ces nouveaux outils et le partage de connaissances à la fois techniques et scientifiques, et la préparation et la facilitation de la mobilisation de ces résultats de recherche dans un contexte opérationnel. Cela passe notamment par la contribution au projet AROBASE (et également ACCALMIE) de personnels de recherche du LAERO, du CECI-CERFACS et de Mercator Ocean International. Ceci est particulièrement facilité et renforcé par la mise en place fin 2021 sur le pôle scientifique toulousain de l'axe scientifique transverse "Couplages" de l'Observatoire Midi-Pyrénées. Cet axe transverse particulièrement dynamique permet de capitaliser sur l'expertise des acteurs du site toulousain et de renforcer les collaborations existantes et de longue date. Ceci est particulièrement pertinent au moment de l'intégration du CNRM (et du CERFACS-CECI) dans la fédération de laboratoires OMP en 2022.

#### 3.3.1 ACCORD

Dans le cadre du consortium international ACCORD, des activités de recherche et de développement sont engagées dans le but d'améliorer la PNT à aire limitée, haute résolution et à courte échéance (Fischer & Pottier, 2021). L'un des objectifs d'ACCORD consiste à améliorer la représentation du système environnemental et les interactions de l'atmosphère avec différents compartiments (surfaces continentales, océans, lacs, composition atmosphérique,...).

Les activités et des participants sont formalisées dans les Rolling Working Plans, livrés annuellement par le consortium ACCORD. Les principales actions en lien avec l'intégration de couplages de compartiments du système environnemental concernent les parties suivantes :

- l'étude des interactions aérosols-nuages-rayonnement ;
- l'interface entre la surface et l'atmosphère ;
- le développement de nouveaux compartiments/modules dans SURFEX ;
- le couplage avec la surface marine et l'océan ;

Le consortium ACCORD travaille autour d'un code commun dont le schéma SURFEX fait partie. A ce titre, et en bénéficiant du critère de modularité défini dans AROBASE, les modèles de prévision à aire limitée déployés par les services nationaux de météorologie du consortium héritent de l'interface SURFEX-OASIS et de ses possibilités de couplages associées. L'interface standard ACCALMIE pour la chimie et les aérosols sera également partagée.

A moyen terme, les nombreux sujets abordés par le consortium ACCORD sur les systèmes de prévision d'ensemble – en particulier les perturbations modèles, initiales et de surface, sur la résolution des échelles sous-kilométriques ou sur la mise au point de méthodes de vérification – pourront également être enrichis par des apports issus de l'insertion de nouveaux couplages.

### 3.3.2 PEPR TRACCS

Le PEPR TRACCS vise à transformer la modélisation du climat pour affronter de nouveaux défis et répondre aux attentes sociétales en améliorant nos connaissances et outils pour l'estimation des impacts et risques climatiques et le développement des services climatiques.

Les travaux du PEPR TRACCS sont organisés dans le cadre de projets ciblés et de projets préparés en réponse à des appels d'offre. Au sein de TRACCS, le Projet Ciblé (PC) n°10, «*Reaching the local scale in climate studies – towards reliable climate information for local adaptation strategies Information*» (LORECLI, PIs : S. Somot, M. Vrac ; partenaires : CNRM, CECI, IPSL, IGE) inclut les activités de développement et de déploiement d'AROBASE pour les études du climat régional. En s'appuyant sur des modèles de systèmes climatiques régionaux à l'échelle du kilomètre et entièrement couplés, alimentés avec des modèles climatiques globaux, le PC10 va suivre 5 axes :

- augmentation de la résolution des modèles climatiques dédiés à fournir des informations sur le climat,
- représentation des processus pertinents à l'échelle kilométrique et les rétroactions locales par de nouveaux jeux de paramétrisations et de couplage(s) entre différentes composantes,
- études des processus physiques, chimiques et biogéochimiques clés à haute résolution pour une meilleure compréhension des phénomènes d'échelle locale pertinents, en particulier pour qualifier en climat futur des événements extrêmes ayant de forts impacts sociétaux,
- utilisation de techniques émergentes d'apprentissage automatique, d'émulation ou hybrides pour la quantification des incertitudes et pour l'estimation fine-échelle à faible coût,
- cohérence entre les modèles climatiques régionaux à haute résolution et les modèles climatiques globaux.

Comme défini dans le projet AROBASE (voir section 3.2), le PC10 développera des outils génériques, applicables à n'importe quelle région du globe, mais avec un premier focus géographique sur l'Europe, la France métropolitaine et l'outre-mer français, et éventuellement d'autres régions d'intérêt.

Le PC10 permettra le recrutement d'un.e ingénieur.e contractuel.le pour la gestion de la

plateforme AROBASE pour le climat régional et le support utilisateur, de 3 chercheur.e.s contractuel.le.s pour le développement d'un émulateur du système kilométrique par technique de *machine learning*, le développement de la chimie en ligne, et l'étude des interactions aérosols-rayonnement-nuages, ainsi que le financement de 4 bourses de thèses.

### 3.3.3 Autres projets de recherche et cadres collaboratifs

**CORDEX (WCRP) :** Le principe de l'exercice coordonné d'inter-comparaison CORDEX du WCRP est de faire progresser et de coordonner la science et les applications des méthodes de descente d'échelle régionale à travers une coopération internationale, dans le but de :

- mieux comprendre les phénomènes climatiques régionaux et locaux importants, leur variabilité et leur évolution grâce aux méthodes de descente d'échelle,
- évaluer and améliorer les modèles et techniques de descente d'échelle climatique régionale,
- produire un jeu de données coordonné de projections climatiques régionales un peu partout sur la planète,
- améliorer la communication et les échanges de connaissance avec les utilisateurs des informations climatiques régionales.

Le CNRM contribue à CORDEX depuis sa mise en place et a participé à l'exercice pour les domaines suivants : Med-CORDEX [coordonné par S. Somot (GMGEC/MOSCA)], Euro-CORDEX, CORDEX Africa, CORDEX Amérique du Nord, CORDEX Antarctique. Plus spécifiquement pour Med-CORDEX (Ruti *et al.*, 2016; Somot *et al.*, 2018) qui fût initié par la communauté du programme MISTRALS/HyMeX, l'exercice a inclus dès le départ l'objectif de disposer de modèles régionaux de climat couplés avec l'océan. Cette insertion du compartiment océanique a été particulièrement motivée par les caractéristiques régionales du bassin méditerranéen : le fort contraste terre-mer, la rétroaction terre-atmosphère, la brise de mer, les dépressions et médicanes, l'upwelling côtier, le couplage air-mer intense et l'interaction aérosols-rayonnement.

Le CNRM a également contribué à différents Flagship Pilot Studies (FPS) d'EURO-CORDEX. Pour le FPS Convection, le CNRM a notamment mis au point et validé une configuration d'AROME sur une région pan-alpine pour le climat régional à 2.5 km permettant la résolution explicite de la convection profonde. L'utilisation de cette résolution pour des simulations longues a permis de montrer l'amélioration des structures spatiales des champs de précipitation moyen sur l'automne et une meilleure représentation des événements méditerranéens de fortes précipitations en terme de nombre, de trajectoire, et de durée (Fumière *et al.*, 2020; Caillaud *et al.*, 2021). Pour le FPS aérosols [coordonné par M. Mallet (GMGEC/MOSCA)], le CNRM a pu montrer l'intérêt de l'insertion d'aérosols interactifs au sein de CNRM-RCSM, qui, en reproduisant bien le transport des aérosols et leur évolution, jouent sur les tendances climatiques au travers notamment de l'effet direct sur les flux radiatifs incidents en surface et les effets indirects liés notamment aux processus nuageux (Drugé *et al.*, 2019; Nabat *et al.*, 2020).

**MEDIATION (ANR / Investissement d’Avenir (PPR Océan)) :** Le projet ANR MEDIATION, financé dans le cadre du Programme Prioritaire de Recherche Océan, vise à progresser dans la modélisation intégrée des écosystèmes marins en développant des jumeaux numériques de l’océan et à les appliquer à deux régions couvrant les façades françaises de la métropole : Méditerranée (MEDNOW) et Atlantique-Manche (MANGA). L’objectif est de répondre aux deux questions suivantes : quels seront les impacts du changement global sur les écosystèmes marins ? quels peuvent être les effets de mesure de préservation du milieu marin ? Pour la Méditerranée, la plateforme sera basée sur CNRM-RCSM ce qui permettra d’enrichir la configuration océanique NEMO-MED12, et de nouveaux compartiments seront modélisés pour la représentation des agro-écosystèmes, du plancton et des chaînes de haut-niveaux trophiques. Pour répondre aux objectifs, CNRM-RCSM servira à la mise au point de scénarios de changement climatique pour la zone.

Pour le transfert vers la société, de nouveaux outils de visualisation de simulations et des incertitudes associées seront mis au point, ainsi qu’une plateforme interactive pour sensibiliser le public sur l’impact de différents scénarios. Une série d’indicateurs pertinents sera également co-construite avec les parties prenantes pour mieux cerner les usages et besoins.

**CASSIOWPE (ANR / plan d’investissement France 2030) :** Le projet CASSIOWPE, piloté par le LOPS et France Énergies Marines, a pour objectif de soutenir le déploiement de l’éolien offshore dans la zone du golfe du Lion, en fournissant des données d’observations à haute résolution basées notamment sur les données satellites SAR des champs de vents, de vagues et de courants, ainsi qu’un nouvel outil numérique couplé pour la modélisation des conditions météo-océaniques sur la zone.

L’action de Météo-France et du CNRM dans ce projet a porté sur l’identification de situations météo-océaniques d’intérêt pour couvrir un large panel de situations caractéristiques dans le golfe du Lion, avec un intérêt particulier pour les cas disposant d’images SAR, ainsi que sur de l’aide au développement d’un système numérique couplé dédié aux objectifs du projet, avec la mise au point d’une configuration du couplage entre les modèles MESO-NH/CROCO/WW3.

Par ailleurs, dans le cadre du travail post-doctoral de S. Brumer, une nouvelle paramétrisation physique des flux air-mer prenant en compte l’effet des embruns a été mise au point et a été intégrée dans le schéma de surface SURFEX (Brumer *et al.*, 2022).

## 4 Perspectives

Le nouvel outil de modélisation et de prévision météorologique et environnemental à échelle kilométrique développé par les projets AROBASE et ACCALMIE va conduire à une extension importante des capacités de représentation, compréhension et suivi du système environnemental.

Quatre piliers ont été définis pour la stratégie de développement du système kilométrique : (i) la modularité d’assemblage, (ii) la transportabilité sur des régions d’intérêt, (iii) la mise en commun d’expertises, et (iv) une stratégie sans couture par le maintien de la proximité des systèmes numériques de recherche / prévision / climat au sein du CNRM avec ses partenaires. Basé sur ces critères, le système kilométrique prendra en compte le milieu environnemental complexe (atmosphère physique et chimie, surfaces continentales naturelles et anthropisées, et océaniques) ce qui conduira à une amélioration en termes de réalisme, de cohérence et de résolution, afin de résoudre les verrous scientifiques clés et répondre aux enjeux sociétaux actuels, en particulier le besoin en information ciblée, intégrée, et à haute-résolution.

Il permettra en particulier de mieux comprendre les échanges et processus aux interfaces entre les différentes composantes du système environnemental. Les boucles de rétroactions seront explicitement reproduites, avec un fort intérêt pour les situations à fort enjeu (cyclones et tempêtes, précipitations intenses et crues, canicules et sécheresses, nuages bas, pollution et visibilité), généralement caractérisées par des facteurs multiples d’aggravation ou en cascade impliquant les différents compartiments.

A l’issue du travail d’assemblage, d’évaluation et de démonstration de prévision multi-couplée, AROBASE sera utilisé pour les études intégrées du changement climatique aux échelles régionale à locale, pour la compréhension et le suivi de phénomènes météorologiques et environnementaux, et pour la prévision à courte échéance (quelques heures à quelques jours). Dans un premier temps, l’initialisation restera néanmoins faite séparément pour chaque compartiment du système environnemental.

Pour la prévision numérique, le système AROBASE constitue le pré-requis pour la construction future d’un système d’assimilation couplée qui intégrera un nombre plus important d’observations des composantes du système environnemental, le principal objectif étant de produire des conditions initiales cohérentes et équilibrées, réduisant donc le choc d’initialisation et son effet sur la prévision.

Sur la partie atmosphère–surfaces (continentales/marines), deux niveaux d’assimilation de données couplée sont généralement définis. L’assimilation couplée dite forte consiste à utiliser un système d’assimilation unique pour tous les modèles assemblés et permet donc d’avoir des covariances croisées à l’état initial, c’est-à-dire qu’une observation océanique peut générer des incréments d’analyse sur les champs atmosphériques et vice versa. Cette méthode d’assimilation couplée forte présente encore de nombreux challenges scientifiques et techniques tels que mentionnés par Penny *et al.* (2017). Les méthodes d’assimilation couplée dite faible sont donc généralement appliquées dans un premier temps, puisqu’elles consistent à corriger à partir d’observations une même ébauche issue d’une prévision couplée par un calcul indépendant dans chaque compartiment. Cette méthode peut conduire à des améliorations notables (e.g. l’étude

idéalisée de Smith et al., 2015) qui pourront être examinées avec le système AROBASE dont les composantes disposent chacune d'un système d'assimilation.

Des travaux ont déjà été engagés au CNRM pour progresser dans l'assimilation de données couplée entre l'atmosphère et les surfaces continentales et entre la physique et la chimie. Concernant l'assimilation de données couplée aérosols-gaz-atmosphère, des travaux récents ont montré les possibilités particulièrement intéressantes d'extraire un maximum d'information des observations satellitaires, en particulier dans l'infrarouge. Des études et moyens supplémentaires permettront encore de progresser par ce biais dans une exploitation plus large des observations atmosphériques.

Dans le cadre de la FCPLR d'A. Purcell au GMAP, des tests de l'application du schéma d'assimilation 4D-EnVAR pour le système couplé AROME-OM/CMO1D pourront également permettre d'évaluer des premières pistes pour progresser dans l'assimilation de données couplée océan-atmosphère.

Pour chaque type d'utilisation - recherche sur les processus météorologiques et environnementaux, prévision numérique, étude du climat régional - le système kilométrique AROBASE pourra nourrir le développement de nouveaux produits et services à valeur ajoutée, au bénéfice d'utilisateurs en aval : acteurs de la gestion des risques environnementaux et du monde socio-économique, les citoyens et le grand public. Le système fournira des produits de suivi et d'aide à la décision à échelle fine et cohérents, adaptés aux besoins croissant d'information intégrée à haute-résolution des différents utilisateurs de services météorologiques et environnementaux. Il viendra étoffer l'information météorologique rendue pour l'avertissement et la caractérisation de phénomènes dangereux à enjeu avec de potentiels enrichissements pour la vigilance météorologique, vagues-submersion et crues, les prévisions d'aérosols et qualité de l'air. Enfin, le développement d'outils de modélisation basés sur de l'intelligence artificielle permet aujourd'hui d'envisager l'émergence de nouvelles méthodes de production, venant en complémentarité du développement d'outils basés sur la représentation explicite des processus tel que AROBASE dont les résultats seront disponibles pour enrichir l'apprentissage machine et pour aider à la mise au point d'émulateurs plus complets, le cas échéant.

## Références

- Albert, M. F. M. A., Anguelova, M. D., Manders, A. M. M., Schaap, M., & de Leeuw, G. 2016. Parameterization of oceanic whitecap fraction based on satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**(21), 13725–13751.
- Ambar, A., & Mokhtari, M. 2017. Modélisation des aérosols désertiques dans AROME : Apport du schéma physique à l'échelle convective et impact radiatif. *JAMA*, **1**, 35–40.
- Anav, A., Menut, L., Khvorostyanov, D., & Viovy, N. 2011. Impact of tropospheric ozone on the Euro-Mediterranean vegetation. *Global Change Biology*, **17**(7), 2342–2359.
- Ardhuin, F., Roland, A., Dumas, F., Bennis, A.-C., Sentchev, A., Forget, P., J., Wolf, F., Girard, Osuna, P., & Benoit, M. 2012. Numerical Wave Modeling in Conditions with Strong Currents : Dissipation, Refraction, and Relative Wind. *J. Phys. Oceanograph.*, **42**(12), 2101 – 2120.
- Arnold, A. K., Lewis, H. W., Hyder, P., Siddorn, J., & O’Dea, E. 2021. The Sensitivity of British Weather to Ocean Tides. *Geosci. Res. Lett.*, **48**(3), e2020GL090732.
- Barthe, C., Bousquet, O., Bielli, S., Tulet, P., Pianezze, J., Claeys, M., Tsai, C.-L., Thompson, C., Bonnardot, F., Chauvin, F., Cattiaux, J., Bouin, M.-N., Amelie, V., Barruol, G., Calmer, R., Ciccione, S., Cordier, Em., Duong, Q.-P., Durand, J., Fleischer-Dogley, F., Husson, R., Lees, E., Malardel, S., Marquestaut, N., Mavume, A., Mékiès, D., Mouche, A., Ravoson, N. M., Razafindradingana, B., Rindraharisaona, E., Roberts, G., Singh, M., Zakariasy, L., & Zucule, J. 2021. Impact of Tropical Cyclones on Inhabited Areas of the SWIO Basin at Present and Future Horizons. Part 2 : Modeling Component of the Research Program RENOVRISK-CYCLONE. *Atmosphere*, **12**(6).
- Bey, I., Jacob, D. J., Yantosca, R. M., Logan, J. A., Field, B. D., Fiore, A. M., Li, Q., Liu, H. Y., Mickley, L. J., & Schultz, M. G. 2001. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology : Model description and evaluation. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **106**(D19), 23073–23095.
- Bielli, S., Barthe, C., Bousquet, O., Tulet, P., & Pianezze, J. 2021. The Effect of Atmosphere-Ocean Coupling on the Structure and Intensity of Tropical Cyclone Bejisa in the Southwest Indian Ocean. *Atmosphere*, **12**(6), 688.
- Bouin, M.-N., & Lebeaupin Brossier, C. 2020a. Impact of a medicane on the oceanic surface layer from a coupled, kilometre-scale simulation. *Ocean Sci.*, **16**(5), 1125–1142.
- Bouin, M.-N., & Lebeaupin Brossier, C. 2020b. Surface processes in the 7 November 2014 medicane from air–sea coupled high-resolution numerical modelling. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**(11), 6861–6881.
- Bouin, M.-N., Lebeaupin Brossier, C., Malardel, S., Voldoire, A., & Sauvage, C. sub.. The wave-age dependent stress parameterization (WASP) for momentum and heat turbulent fluxes at sea in SURFEX v8.1. *Geosci. Model Dev. Discuss.*
- Boussetta, S., Balsamo, G., Beljaars, A., Panareda, A.-A., Calvet, J.-C., Jacobs, C., van den Hurk, B., Viterbo, P., Lafont, S., Dutra, E., Jarlan, L., Balzarolo, M., Papale, D., & van der Werf, G. 2013. Natural land carbon dioxide exchanges in the ECMWF integrated forecasting system : Implementation and offline validation. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **118**(12), 5923–5946.
- Bouttier, F., Raynaud, L., Nuissier, O., & Ménétrier, B. 2016. Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**(S1), 390–403.
- Bozzo, A., Remy, S., Benedetti, A., Flemming, J., Bechtold, P., Rodwell, M., & Morcrette, J.-J. 2017 (2017). *Implementation of a CAMS-based aerosol climatology in the IFS.*
- Bozzo, A., Benedetti, A., Flemming, J., Kipling, Z., & Rémy, S. 2020. An aerosol climatology for global models based on the tropospheric aerosol scheme in the Integrated Forecasting System of ECMWF. *Geosci. Model Dev.*, **13**(3), 1007–1034.
- Brasseur, G. P., Hauglustaine, D. A., Walters, S., Rasch, P. J., Müller, J.-F., Granier, C., & Tie, X. X. 1998. MOZART, a global chemical transport model for ozone and related chemical tracers : 1. Model description. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **103**(D21), 28265–28289.

- Brilouet, P.-E., Redelsperger, J.-L., Bouin, M.-N., Couvreur, F., & Lebeau-pin Brossier, C. 2021. A case-study of the coupled ocean-atmosphere response to an oceanic diurnal warm layer. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **147**(736), 2008–2032.
- Brivoal, T. 2021. Une modélisation alternative haute résolution du couplage air-mer et de ses effets sur la dynamique océanique dans l'Atlantique Nord-Est. Ph.D. thesis, Université de Toulouse.
- Brumer, S., Bouin, M.-N., Cathelain, M., Leckler, F., Branger, H., Piazzola, J., Veron, F., Michelet, N., Filipot, J.-F., & Redelsperger, J.-L. 2022. Impacts of Sea Spray in a coupled ocean-wave-atmosphere model : Mediterranean Sea case studies. In : EGU General Assembly 2022.
- Caillaud, C., Somot, S., Alias, A., Bernard-Bouissières, I., Fumière, Q., Laurantin, O., Seity, Y., & Ducrocq, V. 2021. Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale : an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. Clim. Dyn., **56**(5), 1717–1752.
- Cariolle, D., & Teyssède, H. 2007. A revised linear ozone photochemistry parameterization for use in transport and general circulation models : multi-annual simulations. Atmospheric Chemistry and Physics, **7**(9), 2183–2196.
- Carniel, S., Benetazzo, A., Bonaldo, D., Falcieri, F. M., Miglietta, M. M., Ricchi, A., & Sclavo, M. 2016. Scratching beneath the surface while coupling atmosphere, ocean and waves : Analysis of a dense water formation event. Ocean Modelling, **101**, 101 – 112.
- Castillo Sanchez, J. M., Berthou, S., Arnold, A., Lewis, H., Mahmood, S., & Sanchez, C. 2023. The UKC3 regional coupled model. In : 6<sup>th</sup> Workshop on Coupling Technologies for Earth System Models. IS-ENES, Toulouse, France.
- Colas, F., Berthet, S., Masson, S., Echevin, V., & Oerder, V. 2013. A new coupled tropical channel WRF-OASIS-NEMO : Sensitivity to the horizontal resolution. Page 2 of : American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, vol. 42.
- Coopmann, O., Guidard, V., Fourrié, N., & Josse, B. 2020. Use of variable ozone in a radiative transfer model for the global Météo-France 4D-Var system. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **146**(733), 3729–3746.
- Corale, L. 2022. Couplage Océan-Vagues-Atmosphère pour l'amélioration de la prévision des cyclones tropicaux du bassin sud-ouest de l'océan Indien. Ph.D. thesis, Université de la Réunion.
- Corale, L., Malardel, S., Bielli, S., & Bouin, M.-N. 2023. Evaluation of a mesoscale coupled ocean-atmosphere configuration for tropical cyclone forecasting in the South West Indian Ocean basin. Earth and Space Science, e2022EA002584.
- Couvelard, X., Lemarié, F., Samson, G., Redelsperger, J.-L., Arduin, F., Benschila, R., & Madec, G. 2020. Development of a two-way-coupled ocean-wave model : assessment on a global NEMO(v3.6)-WW3(v6.02) coupled configuration. Geosci. Model Dev., **13**(7), 3067–3090.
- Craig, A., Valcke, S., & Coquart, L. 2017. Development and performance of a new version of the OASIS coupler, OASIS3-MCT\_3.0. Geosci. Model Dev., **10**, 3297–3308.
- Darmaraki, S., Somot, S., Sevault, F., & Nabat, P. 2019. Past Variability of Mediterranean Sea Marine Heatwaves. Geosci. Res. Lett., **46**(16), 9813–9823.
- Dentener, F., Kinne, S., Bond, T., Boucher, O., Cofala, J., Generoso, S., Ginoux, P., Gong, S., Hoelzemann, J. J., Ito, A., Marelli, L., Penner, J. E., Putaud, J.-P., Textor, C., Schulz, M., van der Werf, G. R., & Wilson, J. 2006. Emissions of primary aerosol and precursor gases in the years 2000 and 1750 prescribed data-sets for AeroCom. Atmos. Chem. Phys., **6**(12), 4321–4344.
- Dragani, R., Benedetti, A., Flemming, J., Balsamo, G., Diamantakis, M., Geer, A., Hogan, R., Stockdale, T., Ades, M., Agusti-Panareda, A., Barré, J., Bechtold, P., Bozzo, A., Hersbach, H., Hólm, E., Kipling, Z., Inness, A., Letertre-Danczak, J., Massart, S., Matricardi, M., McNally, T., Parrington, M., Sandu, I., Soci, C., & Vitart, F. 2018 (12/2018). Atmospheric Composition priority developments for Numerical Weather Prediction.

- Drobinski, P., Anav, A., Lebeaupin Brossier, C., Samson, G., Stéfanon, M., Bastin, S., Baklouti, M., Béranger, K., Beuvier, J., Bourdallé-Badie, R., Coquart, L., D’Andrea, F., de Noblet-Ducoudré, N., Diaz, F., Dutay, J.-C., Ethe, C., Foujols, M.-A., Khvorostyanov, D., Madec, J., Mancip, M., Masson, S., Menut, L., Palmieri, J., Polcher, J., Turquety, S., Valcke, S., & Viovy, N. 2012. Model of the Regional Coupled Earth system (MORCE) : Application to process and climate studies in vulnerable regions. *Environmental Model. Soft.*, **35**, 1 – 18.
- Drugé, T., Nabat, P., Mallet, M., & Somot, S. 2019. Model simulation of ammonium and nitrate aerosols distribution in the Euro-Mediterranean region and their radiative and climatic effects over 1979–2016. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**(6), 3707–3731.
- Fallmann, J., Lewis, H., Sanchez, J. C., & Lock, A. 2019. Impact of high-resolution ocean–atmosphere coupling on fog formation over the North Sea. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**(720), 1180–1201.
- Faure, G., Chambon, P., & Brousseau, P. 2020. Operational Implementation of the AROME Model in the Tropics : Multiscale Validation of Rainfall Forecasts. *Wea. Forecasting*, **35**(2), 691–710.
- Fischer, C., & Pottier, P. 2021. Un accord international historique en prévision numérique du temps. *La Météorologie*, 4–5.
- Fourrié, N., Bresson, E., Nuret, M., Jany, C., Brousseau, P., Doerenbecher, A., Kreitz, M., Nuissier, O., Sevault, E., Bénichou, H., Amodei, M., & Pouponneau, F. 2015. AROME-WMED, a real-time mesoscale model designed for HyMeX Special Observation Periods. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 1919–1941.
- Fumière, Q., Déqué, M., Nuissier, O., Somot, S., Alias, A., Caillaud, C., Laurantin, O., & Seity, Y. 2020. Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall : added value of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model. *Clim. Dyn.*, **55**, 77–91.
- Gaspar, P., Grégoris, Y., & Lefevre, J.-M. 1990. A simple Eddy Kinetic Energy model for simulations of the oceanic vertical mixing : Tests at station Papa and Long-Term Upper Ocean Study site. *J. Geophys. Res.*, **95**(C9), 16179–16193.
- Gentile, E. S., Gray, S. L., Barlow, Janet F., Lewis, H. W., & Edwards, J. M. 2021. The Impact of Atmosphere–Ocean–Wave Coupling on the Near-Surface Wind Speed in Forecasts of Extratropical Cyclones. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **180**, 105–129.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, **39**(37), 6957–6975.
- Grini, A., Tulet, P., & Gomes, L. 2006. Dusty weather forecasts using the MesoNH mesoscale atmospheric model. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **111**(D19).
- Guion, A., Turquety, S., Polcher, J., Pennel, R., Bastin, S., & Arsouze, T. 2022. Droughts and heatwaves in the Western Mediterranean : impact on vegetation and wildfires using the coupled WRF-ORCHIDEE regional model (RegIPSL). *Clim. Dyn.*, **58**, 2881–2903.
- Gévaudan, M. 2021. Influence de la salinité sur la dynamique couplée océan-atmosphère de l’océan Atlantique tropical. Ph.D. thesis, Université de Toulouse.
- Hodur, R. M. 1997. The Naval Research Laboratory’s Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS). *Mon. Wea. Rev.*, **125**(7), 1414–1430.
- Jacob, D.J., Liu, H., Mari, C., & Yantosca, R.M. 2000. Harvard wet deposition scheme for GMI.
- Jones, P. 1999. Conservative remapping : First- and second-order conservative remapping. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2204–2210.
- Kocha, C. 2011. Interactions entre poussières désertiques et convection profonde en Afrique de l’Ouest : observation et modélisation à échelle convective. Ph.D. thesis, Université Toulouse III.

- Lac, C., Chaboureaud, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J., Leriche, M., Barthe, C., Aouizerats, B., Augros, C., Aumond, P., Auguste, F., Bechtold, P., Berthet, S., Bielli, S., Bosseur, F., Caumont, O., Cohard, J.-M., Colin, J., Couvreux, F., Cuxart, J., Delautier, G., Dauhut, T., Ducrocq, V., Filippi, J.-B., Gazen, D., Geoffroy, O., Gheusi, F., Honnert, R., Lafore, J.-P., Lebeaupin Brossier, C., Libois, Q., Lunet, T., Mari, C., Maric, T., Mascart, P., Mogé, M., Molinié, G., Nuissier, O., Pantillon, F., Peyrillé, P., Pergaud, J., Perraud, E., Pianezze, J., Redelsperger, J.-L., Ricard, D., Richard, E., Riette, S., Rodier, Q., Schoetter, R., Seyfried, L., Stein, J., Suhre, K., Taufour, M., Thouron, O., Turner, S., Verrelle, A., Vié, B., Visentin, F., Vionnet, V., & Wautelet, P. 2018. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geosci. Model Dev.*, **11**(5), 1929–1969.
- Larson, J., Jacob, R., & Ong, E. 2005. A New Fortran90 Toolkit for Building Multiphysics Parallel Coupled Models. *Int. J. High Perf. Comp. App.*, **19**, 277–292.
- Le Breton, M. 2022. Impact de la stratégie d’initialisation sur le couplage océan-atmosphère dans le cadre d’une prévision saisonnière.
- Lebeaupin, C., Ducrocq, V., & Giordani, H. 2006. Sensitivity of mediterranean torrential rain events to the sea surface temperature based on high-resolution numerical forecasts. *J. Geophys. Res.*, **111**, D12110.
- Lebeaupin Brossier, C., Ducrocq, V., & Giordani, H. 2009. Two-way one-dimensional high-resolution air-sea coupled modelling applied to Mediterranean heavy rain events. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**(638), 187–207.
- Lebeaupin Brossier, C., Arsouze, T., Béranger, K., Bouin, M.-N., Bresson, E., Ducrocq, V., Giordani, H., Nuret, M., Rainaud, R., & Taupier-Letage, I. 2014. Ocean Mixed Layer responses to intense meteorological events during HyMeX-SOP1 from a high-resolution ocean simulation. *Ocean Modelling*, **84**, 84–103.
- Lewis, H. W., Castillo Sanchez, J. M., Siddorn, J., King, R. R., Tonani, M., Saulter, A., Sykes, P., Pequignet, A.-C., Weedon, G. P., Palmer, T., Staneva, J., & Bricheno, L. 2019a. Can wave coupling improve operational regional ocean forecasts for the north-west European Shelf? *Ocean Sci.*, **15**(3), 669–690.
- Lewis, H. W., Siddorn, J., Castillo Sanchez, J. M., Petch, J., Edwards, J. M., & Smyth, T. 2019b. Evaluating the impact of atmospheric forcing and air–sea coupling on near-coastal regional ocean prediction. *Ocean Sci.*, **15**(3), 761–778.
- Lewis, H. W., Castillo Sanchez, J. M., Arnold, A., Fallmann, J., Saulter, A., Graham, J., Bush, M., Siddorn, J., Palmer, T., Lock, A., Edwards, J., Bricheno, L., Martínez-de la Torre, A., & Clark, J. 2019c. The UKC3 regional coupled environmental prediction system. *Geosci. Model Dev.*, **12**(6), 2357–2400.
- Liu, H., Jacob, D. J., Bey, I., & Yantosca, R. M. 2001. Constraints from 210Pb and 7Be on wet deposition and transport in a global three-dimensional chemical tracer model driven by assimilated meteorological fields. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **106**(D11), 12109–12128.
- Loglisci, N., Qian, M. W., Rachev, N., Cassardo, C., Longhetto, A., Purini, R., Trivero, P., & Ferrarese, S. and Giraud, C. 2004. Development of an atmosphere-ocean coupled model and its application over the Adriatic Sea during a severe weather events of Bora wind. *J. Geophys. Res.*, **109**(D01102).
- Manabe, S., & Bryan, K. 1969. Climate Calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model. *J. Atmos. Sci.*, **26**(4), 786–789.
- Menut, L., Bessagnet, B., Briant, R., Cholakian, A., Couvidat, F., Mailler, S., Pennel, R., Siour, G., Tuccella, P., Turquety, S., & Valari, M. 2021. The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport model. *Geosci. Model Dev.*, **14**(11), 6781–6811.
- Michou, M., Nabat, P., & Saint-Martin, D. 2015. Development and basic evaluation of a prognostic aerosol scheme (v1) in the CNRM Climate Model CNRM-CM6. *Geoscientific Model Development*, **8**(3), 501–531.
- Misi, Q. 2022. Impact des processus couplés sur la stratification océanique.
- Mogensen, K., Keeley, S., & Towers, P. 2012. Coupling of the NEMO and IFS models in a single executable. *ECMWF Technical Memoranda*.
- Mogensen, K.S., Magnusson, L., & Bidlot, J.-R. 2017. Tropical Cyclone Sensitivity to Ocean Coupling. *ECMWF Technical Memorandum*.

- Mokhtari, M., Tulet, P., Fischer, C., Bouteloup, Y., Bouyssel, F., & Brachemi, O. 2015. Three-dimensional dust aerosol distribution and extinction climatology over northern Africa simulated with the ALADIN numerical prediction model from 2006 to 2010. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**(15), 9063–9082.
- Munier, S., & Decharme, B. 2022. River network and hydro-geomorphological parameters at 1/12° resolution for global hydrological and climate studies. *Earth System Science Data*, **14**(5), 2239–2258.
- Nabat, P., Solmon, F., Mallet, M., Kok, J. F., & Somot, S. 2012. Dust emission size distribution impact on aerosol budget and radiative forcing over the Mediterranean region : a regional climate model approach. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **12**(21), 10545–10567.
- Nabat, P., Somot, S., Cassou, C., Mallet, M., Michou, M., Bouniol, D., Decharme, B., Drugé, T., Roehrig, R., & Saint-Martin, D. 2020. Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**(14), 8315–8349.
- Nicolay, F. 2020. Initialisation couplée pour la prévision saisonnière : impact sur les interactions océan-atmosphère.
- Nihoul, J. C. J. 1985. Coupled Ocean-Atmosphere Models. Elsevier Oceanography Series, vol. 40. Ed. Elsevier.
- Penny, S. G., Akella, S., Alves, O., Bishop, C., Buehner, M., Chevallier, M., Counillon, F., Draper, C., Frolov, S., Fujii, Y., Karspeck, A., Kumar, A., Laloyaux, P., Mahfouf, J.-F., Martin, M., Pena, M., de Rosnay, P., Subramanian, A., Tardif, R., Wang, Y., & Wu, X. 2017. Coupled data assimilation for integrated Earth system analysis and prediction : Goals, challenges and recommendations. Tech. rept. WWRP WMO.
- Pianezze, J., Barthe, C., Bielli, S., Tulet, P., Jullien, S., Cambon, G., Bousquet, O., Claeys, M., & Cordier, E. 2018. A New Coupled Ocean-Waves-Atmosphere Model Designed for Tropical Storm Studies : Example of Tropical Cyclone Bejisa (2013–2014) in the South-West Indian Ocean. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **10**(3), 801–825.
- Pianezze, J., Beuvier, J., Lebeaupin Brossier, C., Samson, G., Faure, G., & Garric, G. 2022. Development of a forecast-oriented kilometre-resolution ocean-atmosphere coupled system for western Europe and sensitivity study for a severe weather situation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **22**, 1301–1324.
- Powers, J. G., & Stoelinga, M. T. 2000. A Coupled Air-Sea Mesoscale Model : Experiments in Atmospheric Sensitivity to Marine Roughness. *Mon. Wea. Rev.*, **128**(1), 208–228.
- Pullen, J., Allard, R., Seo, H., Miller, A. J., Chen, S., Pezzi, L. P., Smith, T., Chu, P., Alves, J., & Caldeira, R. 2017. Coupled ocean-atmosphere forecasting at short and medium time scales. *J. Mar. Res.*, **75**(6), 877–921.
- Rainaud, R., Lebeaupin Brossier, C., Ducrocq, V., & Giordani, H. 2017. High-resolution air-sea coupling impact on two heavy precipitation events in the Western Mediterranean. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2448–2462.
- Rémy, S., Kipling, Z., Huijnen, V., Flemming, J., Nabat, P., Michou, M., Ades, M., Engelen, R., & Peuch, V.-H. 2022. Description and evaluation of the tropospheric aerosol scheme in the Integrated Forecasting System (IFS-AER, cycle 47R1) of ECMWF. *Geoscientific Model Development*, **15**(12), 4881–4912.
- Renault, L., Chiggiato, J., Warner, J. C., Gomez, M., Vizoso, G., & Tintore, J. 2012. Coupled atmosphere-ocean-wave simulations of a storm event over the Gulf of Lion and Balearic Sea. *J. Geophys. Res.*, **117**, C09019.
- Ricchi, A., Miglietta, M. M., Falco, P. P., Benetazzo, A., Bonaldo, D., Bergamasco, A., Sclavo, M., & Carniel, S. 2016. On the use of a coupled ocean-atmosphere-wave model during an extreme cold air outbreak over the Adriatic Sea. *Atmos. Res.*, **172–173**, 48–65.
- Ruti, P. M., Somot, S., Giorgi, F., Dubois, C., Flaouanas, 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-Cloché, 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., Galàn, P., Gallardo, C., Gualdi, S., Goncalves, M., Jorba, O., Jordà, G., L’Heveder, B., Lebeaupin-Brossier, C., Li, L., Liguori, G., Lionello, P., Maciàs, D., Nabat, P., Öñol, 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.

- Sadki, M., Munier, S., Boone, A., & Ricci, S. 2023. Implementation and sensitivity analysis of the Dam-Reservoir Operation model (DROP v1.0) over Spain. *Geoscientific Model Development*, **16**(2), 427–448.
- Samson, G., Masson, S., Lengaigne, M., Keerthi, M. G., Vialard, J., Pous, S., Madec, G., Jourdain, N. C., Jullien, S., Menkes, C., & Marchesiello, P. 2014. The NOW regional coupled model : Application to the tropical Indian Ocean climate and tropical cyclone activity. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **6**(3), 700–722.
- Sauvage, C., Lebeaupin Brossier, C., Bouin, M.-N., & Ducrocq, V. 2020. Characterization of the air–sea exchange mechanisms during a Mediterranean heavy precipitation event using realistic sea state modelling. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**(3), 1675–1699.
- Sauvage, C., Lebeaupin Brossier, C., & Bouin, M.-N. 2021. Towards kilometer-scale ocean-atmosphere-wave coupled forecast : a case study on a Mediterranean heavy precipitation event. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **2021**, 1–45.
- Semtner, A. J. 1984. Development of Efficient, Dynamical Ocean-Atmosphere Models for Climatic Studies. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **23**(3), 353–374.
- Shahi, N. K., Polcher, J., Bastin, S., Pennel, R., & Fita, L. 2022. Assessment of the spatio-temporal variability of the added value on precipitation of convection-permitting simulation over the Iberian Peninsula using the RegIPSL regional earth system model. *Clim. Dyn.*, **59**, 471–498.
- Smith, P. J., Fowler, A. M., & Lawless, A. S. 2015. Exploring strategies for coupled 4D-Var data assimilation using an idealised atmosphere-ocean model. *Tellus*, **67**, 27025.
- Somot, S., Sevault, F., Déqué, M., & Crépon, M. 2008. 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere–ocean regional climate model. *Global and Planetary Change*, **63**(2), 112 – 126.
- Somot, S., Ruti, P., Ahrens, B., Coppola, E., Jordà, G., Sannino, G., & Solmon, F. 2018. Editorial for the Med-CORDEX special issue. *Clim. Dyn.*, **51**(3), 771–777.
- Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voldoire, A., Colin, J., Decharme, B., Delire, C., Berthet, S., Chevallier, M., Sénési, S., Franchisteguy, L., Vial, J., Mallet, M., Joetzjer, E., Geoffroy, O., Guérémy, J.-F., Moine, M.-P., Msadek, R., Ribes, A., Rocher, M., Roehrig, R., Salas-y Mélia, D., Sanchez, E., Terray, L., Valcke, S., Waldman, R., Aumont, O., Bopp, L., Deshayes, J., Éthé, C., & Madec, G. 2019. Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1 : Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **11**(12), 4182–4227.
- Tegen, I., Hollrig, P., Chin, M., Fung, I. Y., Jacob, D. J., & Penner, J. E. 1997. Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness : Estimates from model results. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 23895–23915.
- Terray, L., Thual, O., Belamari, S., Déqué, M., Dandin, P., Delecluse, P., & Levy, C. 1995. Climatology and interannual variability simulated by the ARPEGE-OPA coupled model. *Clim. Dyn.*, **11**(8), 487–505.
- Tulet, P., Crassier, V., Solmon, F., Guedalia, D., & Rosset, R. 2003. Description of the Mesoscale Nonhydrostatic Chemistry model and application to a transboundary pollution episode between northern France and southern England. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **108**(D1), ACH–5.
- Tulet, P., Crassier, V., Cousin, F., Suhre, K., & Rosset, R. 2005. ORILAM, a three-moment lognormal aerosol scheme for mesoscale atmospheric model : Online coupling into the Meso-NH-C model and validation on the Escompte campaign. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **110**(D18).
- Voldoire, A., Decharme, B., Pianezze, J., Lebeaupin Brossier, C., Sevault, F., Seyfried, L., Garnier, V., Bielli, S., Valcke, S., Alias, A., Accensi, M., Arduin, F., Bouin, M.-N., Ducrocq, V., Faroux, S., Giordani, H., Léger, F., Marsaleix, P., Rainaud, R., Redelsperger, J.-L., Richard, E., & Riette, S. 2017. SURFEX v8.0 interface with OASIS3-MCT to couple atmosphere with hydrology, ocean, waves and sea-ice models, from coastal to global scales. *Geosci. Model Dev.*, **10**(11), 4207–4227.
- Voldoire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin, J., Guérémy, J.-F., Michou, M., Moine, M.-P., Nabat, P., Roehrig, R., Salas y Mélia, D., Séférian, R., Valcke, S., Beau, I., Belamari, S., Berthet, S., Cassou, C., Cattiaux, J., Deshayes, J., Douville, H., Ethé, C., Franchistéguy, L., Geoffroy, O., Lévy, C., Madec, G., Meurdesoif, Y., Msadek, R., Ribes, A., Sanchez-Gomez, E., Terray, L., & Waldman, R. 2019. Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **11**(7), 2177–2213.

- Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., & Zambon, J. B. 2010. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. Ocean Modelling, **35**(3), 230–244.
- Warner, J.C., Zambon, J.B., He, R., Dafne, Z., & Hegermiller, C. 2020. Integrating WRF Hydro into the Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) modeling system : application to Hurricane Florence (2018). In : Ocean Sciences meeting. AGU, San Diego, CA, US.
- Yarwood, G., Rao, S., Yocke, M., & Whitten, G. 2005. Updates to the Carbon Bond Chemical Mechanism : CB05. Final Report to the U.S. EPA RT-04-00675, RTP. NC.
- Zambon, J. B., He, R., & Warner, J. C. 2014. Investigation of hurricane Ivan using the coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) model. Ocean Dyn., **64**, 1535–1554.

## A Glossaire

### - A -

ABL1D	1D-Atmospheric Boundary Layer model
ACCALMIE	Approche Coordonnée pour la Chimie et les Aérosols dans Les Modèles du CNRM, Inline et offlinE
ACCORD	A Consortium for CONvection-scale modelling Research and Development
AEWs	African Easterly Waves
AGCM	Atmospheric General Circulation Model
AOGCM	Atmosphere-Ocean General Circulation Model
AORCM	Atmosphere-Ocean Regional Climate Model
ARPEGE	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
AROBASE	AROMe-BASed coupled SystEm
AROME	Application of Research to Operations at MESoscale
<i>AROME-France</i>	<i>Configuration du modèle de prévision déterministe AROME sur la France métropolitaine</i>
<i>AROME-OM</i>	<i>Configurations du modèle AROME déployées pour 5 régions ultra-marines : Caraïbes, Guyane, Océan Indien, Polynésie et Nouvelle Calédonie</i>
<i>AROME-Dust</i>	<i>Version d'AROME incluant les poussières désertiques en ligne</i>
ATOMIC	Atlantic Tradewind Ocean-Atmosphere Mesoscale Interaction Campaign (campagne associée à EUREC4A)

### - B - C -

CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service
CASSIOWPE	Characterising the Atmosphere and Sea Surface Interactions for the deployment of Offshore Wind in the Gulf of Lion
CECI	Climat, Environnement, Couplages et Incertitudes
CEPMMT	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CHIMERE	modèle de chimie-transport
CMEMS	Copernicus Marine Environment Monitoring Service
CMIP	Climate Model Intercomparison Projet
CMO	Couche de Mélange Océanique
CMO1D	Modèle océanique 1D au sein de SURFEX
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CNRM-CM(6-1)	Modèle global de climat du CNRM et du CERFACS (version 6)
CNRM-ESM	Modèle de système Terre du CNRM et du CERFACS
CNRM-RCSM	Modèle régional du système climatique du CNRM
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COAWST	Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport
COP	Contrat d'Objectifs et de Performance (de Météo-France)
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
<i>Euro-CORDEX</i>	<i>Exercice CORDEX sur la région Europe</i>
<i>Med-CORDEX</i>	<i>Exercice CORDEX sur la région méditerranéenne</i>
CROCO	Coastal and Regional Ocean COmmunity model
CSTMS	Community Sediment Transport Modeling System
CTESSEL	Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land (TESSEL) with Carbone modeling
CTM	Chemistry-Transport Model
CTRIP	version CNRM du modèle de routage Total Runoff Integrating Pathways

### - D -

DIROP/MAR	Service de en charge de la prévision MARine au sein de la Direction des Opérations pour la prévision (DIROP) de Météo-France
DWL	Diurnal Warm Layer
DYNAMICO	Nouveau noyau dynamique pour le modèle LMDZ
DYNAMO	DYNamics of the Madden-Julian Oscillation

### - E -

ECCE	Environnement et Changement Climatique Canada
------	---

ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EDGAR	Emission Database for Global Atmospheric Research
eIBI	extended-IBI ocean operational regional system
ENM	Ecole Nationale de la Météorologie
ENSO	El-Niño Southern Oscillation
ESM	Earth System Model
ESMF	Earth System Modeling Framework
EUREC4A	Elucidating the role of clouds- circulation coupling in climate

**- F -**

FCPLR	Formation Complémentaire Par La Recherche
-------	---

**- G -**

GCM	General Circulation Model
GELATO	Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean
GFAS	Global Fire Assimilation System
GLO12	Modèle global de prévision océanographique (1/12°) opéré opérationnellement depuis 2023 par MOI
GMAP	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision du CNRM
GMGEC	Groupe de Météorologie de Grande Echelle et Climat du CNRM
GMME	Groupe de Météorologie à Méso-Echelle

**- H -**

HPC	High Performance Computing system
HYMEX	Hydrological cycle in the Mediterranean EXperiment

**- I -**

IBI	Irish-Biscay-Iberian ocean operational regional system
IFAECI	Instituto Franco-Argentino sobre Estudios de Clima y sus Impactos
IFS	Integrated Forecast System
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
ISBA	Interactions between Soil, Biosphere, and Atmosphere
ITCZ	Intertropical Convergence Zone

**- J - K - L -**

LACy	Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones
LAERO	Laboratoire d'Aérodynamique
LAM	Limited Area Model
LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales
LES	Large Eddy Simulation
LIAISE	Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment
LIM	Louvain-la-Neuve Sea Ice Model
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
LMDZ	AGCM développé au LMD
LOCEAN	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques
LOPS	Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale

**- M -**

MACC	Monitoring Atmosphere Composition and Climate
MAP-IO	Marion dufresne Atmospheric Program - Indian Ocean
MARS3D	Model for Applications at Regional Scale (3D)
MCT	Model Coupling Toolkit
MEGAN	Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature
MESO-NH	Modèle de recherche non-hydrostatique développé par le CNRM et le LA
MFWAM	Météo-France version of WAM
MISTRALS	Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales
MIO	Mediterranean Institute of Oceanography
MLD	Mixed Layer Depth
MOI	Mercator Ocean International

MSWC	système MesoNH-SURFEX-WW3-CROCO
<b>- N -</b>	
NEATL36	Autre nom pour la configuration régional IBI de MOI
NEMO	Nucleus for European Modelling of the Ocean
NEMO-FRA36	<i>Configuration du modèle NEMO sur l'Atlantique Nord-Est, Manche, mer du Nord et Méditerranée au 1/36°</i>
NEMO-MED12	<i>Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée au 1/12°</i>
NEMO-MED36	<i>Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée au 1/36°</i>
NEMO-MED8	<i>Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée au 1/8°</i>
NEMO-NWMED72	<i>Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée nord-occidentale au 1/72°</i>
NEMO-WMED36	<i>Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée Occidentale au 1/36°</i>
NOW	couplage NEMO-OASIS-WRF
<b>- O -</b>	
OASIS	Ocean Atmosphere Sea Ice Soil
OASIS3-MCT	<i>coupleur OASIS (v3) interfacé avec MCT</i>
OMP	Observatoire Midi-Pyrénées
ORILAM	ORganic INorganic Lognormal Aerosols Model
OSTIA	Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis
ORCHIDEE	ORganising Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms
<b>- P -</b>	
PEARO	Prévision d'ensemble AROME
PEPR	Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche exploratoires
PISCES	Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies
PNT	Prévision Numérique du Temps
PSY2/4	Modèle global de prévision océanographique (1/12°) opéré par MOI
<b>- Q - R -</b>	
RCM	Regional Climate Model
RegIPSL	Regional climate model of IPSL
REPROBUS	Reactive Processes Ruling the Ozone Budget in the Stratosphere
ROMS	Regional Ocean Modeling System
<b>- S -</b>	
SI3	Sea Ice Modelling Integrated Initiative
SPEW	Speciated Particulate Emission Wizard
SST	Sea Surface Temperature
SURFEX	Surface Externalisée
SWAN	Simulating WAVes Nearshore
<b>- T -</b>	
TACTIC	Tropospheric Aerosols for Climate In CNRM
TRACCS	TRAnsformer la modélisation du Climat pour les Services Climatiques (PEPR)
<b>- U -</b>	
UKC3	version 3 du modèle couplé kilométrique (UM-JULES-NEMO-WW3) du MetOffice
UKC4	version 4 du modèle couplé kilométrique (UM-JULES-NEMO-WW3) du MetOffice
UM	Unified Model
<b>- V - W -</b>	
WAM	Wave prediction Model
WASP	Wave-Age-dependent Stress Parametrization
WCRP	World Climate Research Programme
WRF	Weather Research and Forecasting
WW3	WAVEWATCHIII wave model
<b>- X - Y - Z -</b>	
XIOS	XML I/O Server

