



**HAL**  
open science

# Processus océan-atmosphère, prévision couplée à fine-échelle et précipitations intenses sur le bassin méditerranéen occidental

Cindy Lebeaupin Brossier

► **To cite this version:**

Cindy Lebeaupin Brossier. Processus océan-atmosphère, prévision couplée à fine-échelle et précipitations intenses sur le bassin méditerranéen occidental. Planète et Univers [physics]. Université TOULOUSE III – Paul Sabatier, 2024. tel-04556105

**HAL Id: tel-04556105**

**<https://meteofrance.hal.science/tel-04556105>**

Submitted on 23 Apr 2024

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

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



---

Mémoire pour l'obtention du diplôme d'

**HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES**

Université Toulouse 3 Paul Sabatier

Sciences De l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace

*Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales*

---

**Processus océan-atmosphère, prévision couplée  
à fine-échelle et précipitations intenses sur le  
bassin méditerranéen occidental**

**Cindy LEBEAUPIN BROSSIER**

*soutenue publiquement le 4 avril 2024*

---

**JURY**

M Sylvain Coquillat,	LAERO,	Président
Mme Vassiliki Kotroni,	NOA,	Rapportrice
M Guillaume Lapeyre,	LMD,	Rapporteur
M Sébastien Masson,	LOCEAN,	Rapporteur
Mme Sophie Bastin,	LATMOS,	Examinatrice
M Jean-Luc Redelsperger,	LOPS,	Examinateur
Mme Ségolène Berthou,	UK MetOffice,	Examinatrice
Mme Marie-Noëlle Bouin,	CNRM,	Marraine Invitée

---

**Centre National de Recherches Météorologiques**

UMR 3589 (Université de Toulouse, Météo-France, CNRS)

42 avenue Gaspard Coriolis - 31057 Toulouse cedex 1, France



# Remerciements

Je souhaite remercier l'ensemble des personnes qui m'ont entouré pendant ces vingt dernières années.

Merci aux collègues du CNRM, et plus spécifiquement aux personnes des équipes PRE-CIP (ex-MICADO) et PHY-NH (ex-MESONH) avec lesquelles c'est un réel plaisir de travailler, discuter, échanger au quotidien.

Un grand merci à ma marraine Marie-Noëlle qui, malgré quelques kilomètres, garde toujours sa "porte" ouverte pour nos études partagées.

Un merci spécial à Jonathan pour nos souvenirs et nos rires, nos idées et encouragements mutuels.

Merci aux membres du jury d'avoir accepté de réviser avec moi les différents résultats issus de mon travail de recherche et d'avoir partagé interrogations et perspectives communes pour la suite.

Un immense merci aux étudiant·e·s, doctorant·e·s, jeunes ingénieur·e·s et chercheur·se·s qui ont partagé ou partagent avec moi un morceau de leur parcours étudiant ou professionnel. Nos activités faites ensemble m'ont permis d'apprendre énormément et ont rendu la route plus légère, enrichissante et conviviale. Pour toutes et tous, je suis très heureuse de voir vos propres chemins continuer.

Merci à mes proches, ami·e·s et à ma famille, mon conjoint Emmanuel et mon fils Esteban pour leur soutien sans faille.

*A mon Soleil*

# Table des matières

<b>Préambule</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>3</b>
1.1 Le bassin méditerranéen occidental . . . . .	3
1.2 Évènements fortement précipitants en Méditerranée occidentale . . . . .	13
1.2.1 Principaux ingrédients de formation . . . . .	13
1.2.2 Modifications dues au changement climatique? . . . . .	18
1.2.3 Enjeux de prévision . . . . .	20
<b>2 État de l’art de la modélisation couplée océan-atmosphère</b>	<b>23</b>
2.1 Le couplage : De l’étude du climat à la modélisation à fine échelle . . . . .	23
2.2 Couplage océan-atmosphère-vagues à haute résolution . . . . .	27
2.2.1 Couplage et évènements météorologiques intenses . . . . .	27
2.2.1.1 Cyclones tropicaux . . . . .	27
2.2.1.2 Tempêtes et vent fort . . . . .	28
2.2.1.3 Évènements fortement précipitants . . . . .	33
2.2.2 Autres études sur le couplage à haute-résolution . . . . .	35
2.2.3 Architecture de couplage des systèmes à méso-échelle . . . . .	37
2.2.3.1 Description des échanges et couplages . . . . .	37
2.2.3.2 Techniques numériques de couplage . . . . .	40
2.2.3.3 Initialisation et assimilation . . . . .	42
<b>3 Synthèse des travaux de recherche</b>	<b>45</b>
3.1 La température de surface de la mer . . . . .	45
3.1.1 Sensibilité des évènements fortement précipitants à la valeur de SST . . . . .	45
3.1.2 Structures de SST à fine-échelle : origine et impacts . . . . .	49
3.2 Les couplages océan-atmosphère à méso-échelle . . . . .	53
3.2.1 Couplages simplifiés . . . . .	53
3.2.2 Modélisation couplée régionale . . . . .	58
3.2.3 Couplage 3D à méso-échelle . . . . .	61
3.2.3.1 Modélisation océanique dédiée et réponse aux évènements intenses . . . . .	61
3.2.3.2 L’interface de couplage sans couture SURFEX-OASIS . . . . .	66
3.2.3.3 Modélisation couplée avec AROME . . . . .	67
3.3 Flux turbulents air-mer . . . . .	75
3.3.1 Paramétrisations . . . . .	76
3.3.2 Échanges turbulents et précipitations intenses . . . . .	78

<b>4</b>	<b>Perspectives et projet de recherche</b>	<b>83</b>
4.1	Modélisation intégrée pour l'étude de processus . . . . .	84
4.1.1	Compréhension et représentation des systèmes fortement précipitants méditerranéens . . . . .	84
4.1.2	Couplage océan-atmosphère-vagues . . . . .	86
4.1.3	Assemblage de nouveaux compartiments . . . . .	87
4.2	Système de prévision météorologique et environnementale à échelle kilométrique . . . . .	88
4.2.1	Partage de code et maintenance . . . . .	89
4.2.2	Initialisation et incertitudes . . . . .	90
4.2.3	Hierarchisation des couplages pour la prévision . . . . .	92
	<b>Références</b>	<b>95</b>
	<b>A Curriculum Vitae</b>	<b>109</b>
	<b>B Liste de productions</b>	<b>117</b>
B.1	Publications . . . . .	117
B.1.1	Publications parues dans des revues à comité de lecture . . . . .	117
B.1.2	Publications soumises dans des revues à comité de lecture . . . . .	121
B.1.3	Actes dans des conférences internationales . . . . .	121
B.1.4	Autres publications . . . . .	122
B.2	Communications . . . . .	123
B.2.1	Conférences internationales . . . . .	123
B.2.2	Autres communications . . . . .	131
	<b>C Glossaire</b>	<b>135</b>

# Liste des figures

1.1	La Méditerranée Occidentale. Les cercles rouges [oranges] situent les villes de plus de 1 000 000 [500 000] habitants. GL désigne le golfe du Lion, GG le golfe de Gènes et GT le golfe de Tunis. . . . .	3
1.2	Carte détaillant les différents climats européens et Nord-africains. Source : Université de Pau et des Pays de l'Adour, <a href="https://sites.google.com/site/arclatinprojet/l-origine-de-l-arc-latin/le-climat-mediterraneen">sites.google.com/site/arclatinprojet/l-origine-de-l-arc-latin/le-climat-mediterraneen</a> . . . . .	4
1.3	Photos d'illustration des événements météorologiques et hydro-météorologiques intenses pouvant affecter le bassin méditerranéen occidental : tempête, vent fort, crue et sécheresse. . . . .	5
1.4	Schémas de circulation océanique en Méditerranée occidentale en surface/sub-surface (MAW-WIW), à niveau intermédiaire (LIW-TDW) et dans les couches profondes (TDW-WMDW), d'après Millot (1999). . . . .	7
1.5	Les programmes de recherche et les actions transverses du chantier MISTRALS de l'INSU. Source : <a href="https://programmes.insu.cnrs.fr/en/mistrals-en/">https://programmes.insu.cnrs.fr/en/mistrals-en/</a> (février 2019). . . . .	12
1.6	Composites des situations CSW (à gauche) et CS (à droite) propices aux événements fortement précipitants du Sud-Est de la France, extraits de Nuisier et al. (2011) : (a,b) hauteur du géopotential (m, contour tous les 50m) à 500hPa ; (c,d) vent horizontal ( $m s^{-1}$ ) à 925hPa ; (e,f) flux d'humidité ( $kg m s^{-2}$ , contour tous les $0.1kg m s^{-2}$ ) à 925hPa. Les zones grisées indiquent les différences avec les autres composites correspondant aux niveaux de confiance de 90% et 95% du t-test de Student. . . . .	15
1.7	Schémas décrivant les différents types de forçage de la convection dans les cas d'événements fortement précipitants méditerranéens (adaptés du document de stage pré-automnal de Météo-France de rappels sur les événement fortement précipitants, source : <a href="http://sop.hymex.org">sop.hymex.org</a> ). . . . .	17
1.8	Changement relatif de fréquence en fonction du seuil de précipitation considéré entre 2015 et 1961 selon trois différents réseaux d'observations (en rouge continu); les courbes pointillées rouges indiquant les limites de l'intervalle de confiance et la courbe pointillée verte est l'estimation à partir de la relation de Clausius-Clapeyron. Figure extraite de Ribes et al. (2019). . . .	19
1.9	Carte de vigilance de Météo-France diffusée l'après-midi du 13 octobre 2016 et détails temporels pour le département de l'Hérault. Pour cet événement, les vigilances oranges sur le Sud-Est de la France ont concerné à la fois les aspects de vagues-submersion, de vent violent, d'orages, de fortes précipitations et inondations [rouge pour l'Hérault]. . . . .	21



2.1	Illustration des composantes du système couplé global de climat CNRM-CM6-1, extraite de Voltaire et al. (2019). . . . .	24
2.2	Comparaison de l'intensité des vents de surface (m/s) simulés par le système COAWST à l'analyse Hwind (à gauche) pendant le cyclone Ida (9 novembre 2009), d'après Olabarrieta et al. (2012). La simulation R2 (au centre) est la simulation couplée océan-atmosphère (ROMS-WRF) avec une fermeture en Charnock (1955) pour les flux turbulents calculés dans WRF. La simulation R5 (à droite) est la simulation couplée océan-atmosphère-vagues (ROMS-WRF-SWAN) avec une prise en compte de l'âge des vagues et de leurs pentes selon Oost et al. (2002) dans les flux turbulents calculés dans WRF. . . . .	29
2.3	Vents de surface (m/s) observés par ASCAT (en haut) sur un cas de cyclogénèse en mer des Baléares (4 Mai 2010) et simulés par le système COAWST (en bas) : EXP1[EXP2] correspond à une simulation atmosphérique WRF forcé par la SST de GFS ; EXP3 est la simulation couplée océan-atmosphère (WRF-ROMS) ; EXP4 est la simulation couplée océan-atmosphère-vagues (WRF-ROMS-SWAN). Figures extraites de Renault et al. (2012a). . . . .	32
2.4	Cumuls de précipitation moyennés sur le domaine de simulation (a) en fonction de la SST moyenne en mer Ligure après 48-72h de simulation et (b) en fonction de la profondeur de couche de mélange initiale (M dans la figure c) ; (c) Profil océanique initial de température idéalisé : M est l'épaisseur de la couche de mélange et L traduit la courbure de la thermocline. Dans (a), UNIF et CNTRL sont les simulations atmosphériques non couplées avec des champs initiaux de SST uniforme et analysé, respectivement, et constants au cours du temps ; CPLD est la simulation couplée avec un océan réaliste (modèle ROMS). Figures extraites de Meroni et al. (2018b). . . . .	35
2.5	Principaux processus affectant les échanges à l'interface air-mer et entre les couches limites océanique et atmosphérique. Schéma extrait de Edson et al. (2007). . . . .	37
2.6	Schéma des échanges (a) d'après Renault et al. (2012a) (COAWST sur la Méditerranée nord-occidentale) ; (b) d'après Chen et al. (2007) pour la campagne CBLAST-Hurricane, (c) d'après Bao et al. (2000) et (d) d'après Pianezze et al. (2018) (MSWC, cyclone Bejisa). . . . .	39
2.7	Schéma d'utilisation du coupleur ESMF pour le système couplé océan-atmosphère-vagues COAMPS et variables échangées. Figure extraite de Brassington et al. (2015). . . . .	40
2.8	Exemple d'introduction de la librairie de couplage MCT. Figure extraite de Perlin et al. (2007). . . . .	41
3.1	Champs initiaux de SST (°C) utilisés pour différentes prévisions AROME démarrant le 13 octobre 2016 (à 00UTC) : (a) l'analyse AROME et (b) l'analyse du système PSY4, sur le domaine AROME-France, et, sur le bassin méditerranéen nord-occidental (c) pour l'expérience tri-couplée AOWr (voir Sauvage, 2019, pour la nomenclature des simulations) et (d) pour l'expérience AROME forcée par PSY4 (AYSStatl). (e) Différences de SST entre AOWr et AYSStatl le 13 octobre 2016 (à 00UTC), et, (f) différences entre la SST d'AOWr moyennée sur les 24 premières heures de prévision et sa SST initiale. . . . .	47

3.2	Cumul de précipitation en 24h (mm) le 14 octobre 2016 00UTC (a) dans le produit fusionné radars-pluviomètres ANTILOPE (Laurantin, 2008), (b) simulé dans l'expérience couplée océan-atmosphère (AOC, voir Sauvage, 2019, pour la nomenclature des simulations), et (c) dans l'expérience couplée océan-atmosphère-vagues (AOWr). (d) Différences de cumul 24h (mm) entre AOC et la simulation forcée par l'analyse de SST PSY4 sur la Méditerranée nord-occidentale (AYSStatl). Les cercles dans (b,c) représentent les valeurs de cumuls observés par les pluviomètres des stations de surface de Météo-France. . . . .	48
3.3	Carte quotidienne représentant l'état océanique et de surface : relation anomalies de SST et d'indice de stratification ( $\Delta\text{SST}/\Delta\text{IS}$ ) en couleurs, vent à 10m (flèches) et évaporation (isolignes, rose si supérieure à $3 \cdot 10^{-5}$ kg/m <sup>2</sup> /s et cyan si supérieure à $10^{-4}$ kg/m <sup>2</sup> /s) pour le 19 (cas de fortes précipitations à Valleraugue), 26 septembre (épisode de mistral) et 2 octobre 2020 (cas de Saint-Martin-de-Vésubie) à partir des analyses PSY4 (voir Masse, 2020). . . . .	52
3.4	Schéma illustrant les caractéristiques de la CMO (via le profil vertical en température) importantes à prendre en compte sur les échanges, en particulier les effets de la stratification, d'après le stage de Arthur Masse (2020). . . . .	53
3.5	Profondeur de la CMO (ou MLD pour <i>Mixed Layer Depth</i> , $h$ , en m) et courants (m/s) simulés après 4 jours dans le golfe du Lion par le modèle océan en couche complet dans WRF pour le cas de mistral du 5 au 9 novembre 1999 (Figure extraite de Lebeaupin Brossier et Drobinski, 2009). (b) MLD (m), courants de surface (m/s) et (c) estimation de la stratification thermique ( $\frac{T_s - T_{65m}}{h} \simeq \gamma$ , K/m) dans la ré-analyse océanique GLORYS (1/12°, Ferry et al., 2010) pour le 9 novembre 1999. . . . .	54
3.6	Evolution du champ de SST (°C) dans la prévision opérationnelle AROME-Caraïbes (2.5 km de résolution) du 9 septembre 2020 12UTC (soit 8h00 loc. pour les Antilles françaises), sur les premières 24 heures par pas de trois heures (de +0 à +24h). . . . .	56
3.7	Domaine du modèle NEMO-MED12 illustré par sa bathymétrie (m) à gauche. A droite, détails de ses grilles verticales : à 50 (grille originale en noir) et 75 (grille raffinée en rouge) niveaux. . . . .	59
3.8	Différences en terme d'énergie cinétique turbulente entre la simulation NEMO-MED12 utilisant le forçage à haute résolution spatiale et temporelle (7 km, 3h) et la simulation de contrôle (20 km, 24h) : (a) variabilité additionnelle (%) en surface et (b) différence relative (%) pour une section verticale traversant le golfe du Lion. Voir Lebeaupin Brossier et al. (2011) pour plus de détails. . . . .	60
3.9	Différence relative (%) d'occurrence de précipitations intenses (supérieures à 50 mm en 24h) sur la période 1989-2008 entre l'expérience couplée WFR-NEMO (CPL) et l'expérience WRF forcé par les champs de SST quotidiens d'ERA-interim (CTL). La zone grise représente la zone où l'occurrence dans CTL est inférieure à 0.05%. Figure extraite de Lebeaupin Brossier et al. (2015). . . . .	60

3.10	Représentation de la plateforme de simulation régionale RegIPSL (WRF-NEMO-ORCHIDEE-CHIMERE) sur le domaine méditerranéen (domaine MED-CORDEX) [reproduite avec l'aimable autorisation de Romain Pennel (LMD)]. Pour plus d'information, voir <a href="https://sourcesup.renater.fr/wiki/morcemed/home">https://sourcesup.renater.fr/wiki/morcemed/home</a> . . . . .	61
3.11	Domaine du modèle NEMO-WMED36 illustré par sa bathymétrie (m). Les lignes colorées indiquent la résolution (en km) de la maille (grille ORCA au 1/36°). La grille verticale de WMED36 est identique à la grille à 50 niveaux de MED12 (voir Fig. 3.7 ou 3.14). . . . .	62
3.12	En haut : Evolution pendant les IOP16a et 16b à AZUR [7.8°E-43.4°N] des profils en salinité (couleurs, psu), température (isolignes, °C) et de la profondeur de CMO (MLD) dans la simulation NEMO-WMED36 forcée. En bas : Evolution du profil en température (°C) observé par la chaine de thermistance à la bouée (Lebeaupin Brossier et al., 2014). . . . .	62
3.13	Biais en IS (en m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) par rapport aux profils in-situ (flotteurs ARGOs et CTDs du R/V Le Suroît) pour IM36 (en haut à gauche; initialisation à partir d'une simulation régionale MED36), IPSY (en haut à droite; initialisation à partir des analyses PSY2 de Mercator Océan), et IMAP (en bas à gauche; initialisation à partir des analyses ASICS-Med). En bas à droite : Séries temporelles pendant la SOP2 de l'IS observée et simulées. Figure extraite de Léger et al. (2016). . . . .	63
3.14	Domaine du modèle NEMO-NWMED72 illustré par sa bathymétrie (m) à gauche. A droite, détails de la grille verticale à 50 niveaux en bleu (la grille verticale à 50 niveaux de MED12 et WMED36 est indiquée pour information en noir). . . . .	64
3.15	(a) Débits (m <sup>3</sup> /s) sur la SOP1 d'HyMeX pour le Rhône dans la climatologie mensuelle (en noir, Beuvier et al., 2012b, lissage temporel appliqué par NEMO), observés (source : <a href="http://www.hydro.eaufrance.fr">http://www.hydro.eaufrance.fr</a> ) à fréquence quotidienne (en bleu) et horaire (en rouge). Profils verticaux en (b) salinité (psu) et (c) température (°C) près de l'Argens (Var) pendant la journée du 27 octobre 2012 (IOP16a) avec le forçage climatologique (N72_CL) en vert, les observations de débits à fréquence quotidienne (N72_DD) en rouge et horaire (N72_HH) en noir. La grille verticale est zoomée pour les 6 premiers mètres. Figures extraites de Sauvage et al. (2018). . . . .	65
3.16	Schéma de l'architecture des systèmes couplés centrés autour l'interface de couplage SURFEX-OASIS. Voir Voltaire et al. (2017) pour la description complète. . . . .	68
3.17	Le système couplé AROME-NEMO sur la zone WMED. Figure extraite de Rainaud et al. (2017). . . . .	69
3.18	Evaporation moyenne (mg/m <sup>2</sup> /s) sur le bassin pour le 14 octobre 2012 (IOP13) dans l'expérience AROME-WEMED forcé par l'analyse de SST AROME (ARCO), la prévision couplée AROME-NEMO WMED (CPLOA) et la prévision AROME-WMED avec la SST initiale de CPLOA (SSTHR, voir Rainaud et al., 2017, pour le protocole expérimental). "SR" désigne les prévisions courtes échéances (débutant le 14 oct à 00 UTC) et "LR" les prévisions "longues échéances" (débutant le 13 oct 00 UTC). . . . .	69

3.19	Evolution du volume d'eau (en km <sup>3</sup> ) plus dense que 29.12 kg/m <sup>3</sup> dans la simulation WMED36 forcée (IMAP) en vert et dans la simulation couplée AROME-NEMO WMED (CPL) en rouge (Lebeau-pin Brossier et al., 2017).	70
3.20	Architecture du système couplé AROME-NEMO-WW3 : Le domaine d'AROME-France est indiqué par le relief (boîte SURFEX) et le domaine NWMED72 par la bathymétrie (boîte NEMO). Figure extraite de Sauvage et al. (2021).	71
3.21	Enthalpie ( $H+LE$ en W/m <sup>2</sup> , négative pour une perte de chaleur de l'océan) et CAPE (isolignes rouges pour 500 et 1000 J/kg) moyennes entre 03 et 18 UTC le 13 octobre 2016 (phase 1 de l'évènement), et vent à 10 mètres (m/s, flèches) à 18 UTC le 13 octobre 2016 dans les simulations forcée en SST (AYSS-Tatl), couplées atmosphère-vagues (AW), océan-atmosphère (AO), océan-atmosphère-vagues (AOW) de Sauvage et al. (2020, 2021). La zone d'échanges air-mer intenses, dite "Azur", est indiquée par le rectangle pointillé.	72
3.22	Evolutions temporelles du vent à 10 mètres (m/s) et du flux de chaleur latente (LE, W/m <sup>2</sup> ) en moyenne pour la zone Azur (voir Figure 3.21) pour les différentes prévisions forcées et couplées démarrant le 13 octobre 2016 à 00 UTC (voir Sauvage et al., 2021).	72
3.23	A gauche : $\theta'_w$ (°C) et vent (m/s, flèches) à 925 hPa, CAPE (>750 J/kg, ligne bleu foncé) et réflectivités à 2000 m (dBz, ligne bleu clair). A droite : Divergence des vents (10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ) et vitesse verticale (Pa.s <sup>-1</sup> , contours noirs) à 950 hPa, et vent à 925 hPa (m/s, flèches) ; le 14 octobre à 00 UTC pour AYSS-Tatl, AW[C], AO et AOW (prévisions démarrant le 13 octobre 2016 à 00 UTC).	73
3.24	Schéma du système couplé AROME-NEMO sur la France métropolitaine : Le domaine d'AROME-France est indiqué par le relief (boîte SURFEX) et le domaine FRA36 par la bathymétrie (boîte NEMO).	74
3.25	Evolutions temporelles du flux de chaleur latente (LE, W/m <sup>2</sup> ) et du stress du vent (N/m <sup>2</sup> ) en moyenne pour la zone Azur (voir Figure 3.21) pour les différentes prévisions AROME forcées utilisant les paramétrisations ECUME, COARE et WASP (AY) démarrant le 13 octobre 2016 à 00 UTC. Les évolutions dans les simulations couplées AW, AO et AOW sont données à titre indicatif pour la comparaison (voir aussi Fig. 3.22).	79
3.26	Schémas décrivant l'impact de la prise en compte des vagues pour le cas de la POI8 (Bouin et al., 2017) à gauche et à droite pour le système convectif en mer pendant l'évènement du 12-14 octobre 2016 (Sauvage et al., 2020). Dans chaque schéma, la flèche rose symbolise la valeur du stress du vent.	80
4.1	Schéma résumant mes principaux axes de travail sur la période 2022-2026.	94



# Liste des tableaux

2.1	Systèmes couplés océan(-glace de mer)-atmosphère(-vagues) globaux mis en opération par des centres de prévision pour la moyenne échéance ( $\sim 2$ semaines) et détails. . . . .	26
-----	---	----



# Préambule

Il y a 20 ans, à l'automne 2003, je choisissais d'orienter mon travail sur l'étude des épisodes de précipitations intenses et l'analyse du rôle de la mer Méditerranée, grâce à la proposition de mes (futurs) directrice et directeur de thèse. Les événements de l'Aude en novembre 1999 et du Gard en septembre 2002 avaient marqué les esprits. Des simulations réalistes à résolution kilométrique étaient réalisées avec Méso-NH et permettaient une meilleure compréhension des processus impliqués. Le rôle de la Méditerranée comme source d'humidité était identifié, mais pas quantifié, ni caractérisé à petite échelle et ou en prenant en compte la dynamique océanique.

Aujourd'hui, après le développement de plusieurs outils de modélisation couplée et la mise en évidence du rôle complexe de la Méditerranée sur les épisodes fortement précipitants, je poursuis mes études sur la compréhension de la dynamique océanique superficielle à fine-échelle, sur la représentation des processus d'interactions air-mer dans les modèles et l'analyse des effets couplés sur les phénomènes météorologiques à enjeux. Je travaille à insérer les nouveaux développements de paramétrisation et de couplages dans les systèmes communs de modélisation et à leur insertion dans les outils et applications de la prévision.

Mes activités de recherche au sein du groupe de modélisation à moyenne échelle du CNRM, s'inscrivent donc dans la thématique générale de l'étude et la modélisation des phénomènes de méso-échelle dans les domaines de l'atmosphère et des surfaces en interactions avec les basses couches atmosphériques. Mes travaux portent plus spécifiquement sur la compréhension du rôle des interactions océan-atmosphère sur les systèmes convectifs fortement précipitants en région méditerranéenne, et sur leur représentation par la mise en place de modélisation couplée à échelle kilométrique. Ils répondent à l'objectif du CNRM de transfert de connaissances et d'améliorations des systèmes opérationnels de prévision de Météo-France.

Dans ce mémoire, j'illustrerai les enjeux pour la zone du bassin méditerranéen occidental, vis à vis des événements météorologiques à forts impacts qui s'y déroulent. Je présenterai le contexte de développement de modélisations couplées à fine échelle dont la complexité répond aux besoins de compréhension et de prévision. Je synthétiserai les résultats de mes travaux concernant le rôle des interactions océan-atmosphère sur les situations fortement pré-



cipitantes. Enfin je détaillerai les questions et perspectives scientifiques et techniques que je souhaiterais aborder ces prochaines années.

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Le bassin méditerranéen occidental

La région méditerranéenne est caractérisée par son bassin océanique quasi-fermé, avec à son pourtour des zones de relief marqué et des bassins versants en majorité de petite taille.

La partie occidentale du bassin méditerranéen possède également ces mêmes caractéristiques géographiques (Fig. 1.1) avec une mer quasi-fermée limitée par le détroit de Gibraltar au Sud-Ouest et le Canal de Sicile au Sud-Est. La mer est entourée dans sa partie boréale

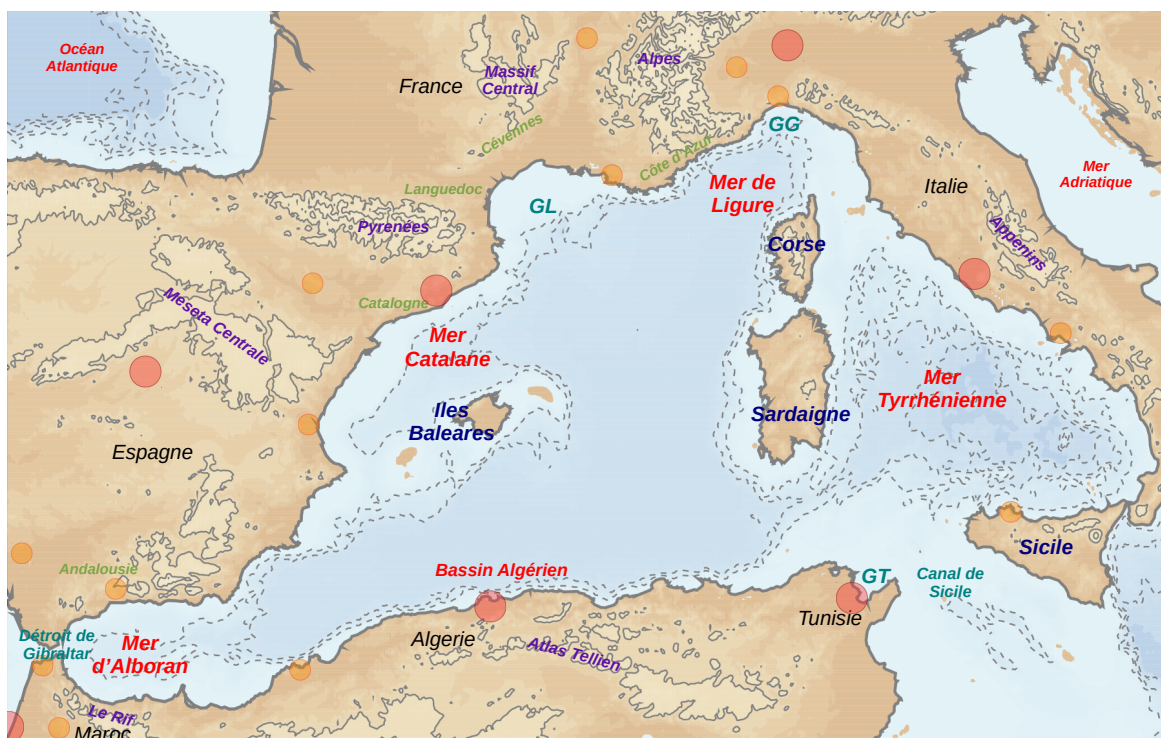


FIGURE 1.1 : La Méditerranée Occidentale. Les cercles rouges [orange] situent les villes de plus de 1 000 000 [500 000] habitants. GL désigne le golfe du Lion, GG le golfe de Gènes et GT le golfe de Tunis.

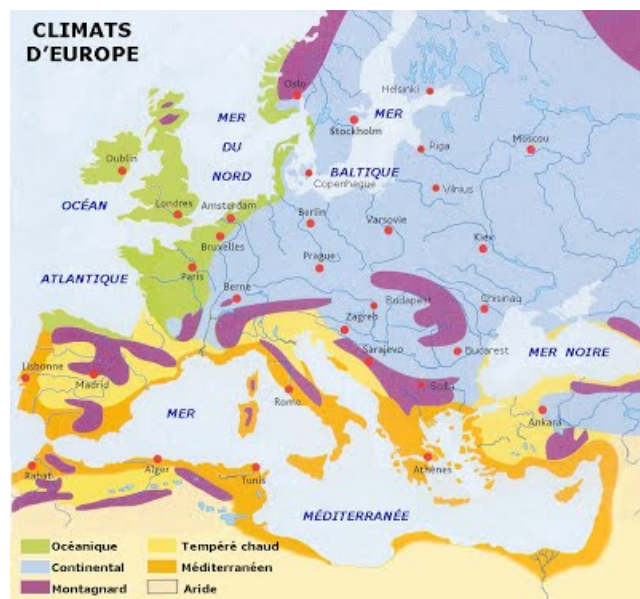


FIGURE 1.2 : Carte détaillant les différents climats européens et Nord-africains. Source : Université de Pau et des Pays de l'Adour, [sites.google.com/site/arclatinprojet/l-origine-de-l-arc-latin/le-climat-mediterraneen](https://sites.google.com/site/arclatinprojet/l-origine-de-l-arc-latin/le-climat-mediterraneen).

par le massif des Appenins, les Alpes, le Massif Central, les Pyrénées et le Meseta Centrale. Au Maghreb, deux massifs principaux bordent la Méditerranée occidentale : le Rif et l'Atlas. Les principaux fleuves du bassin méditerranéen occidental sont le Rhône ( $1721 \text{ m}^3/\text{s}$  en débit moyen à l'exutoire), l'Ebre ( $416 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et le Tibre ( $217 \text{ m}^3/\text{s}$ ), les autres fleuves ayant une contribution inférieure à  $85 \text{ m}^3/\text{s}$  en moyenne climatologique (Ludwig et al., 2009).

Généralement, le climat méditerranéen (Fig. 1.2) est décrit par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides avec peu de jours de gels. D'un autre point de vue (tel que présenté par Lionello et al., 2006b), la zone méditerranéenne constitue une transition entre le climat aride d'Afrique du Nord et les climats européens (océanique et continental) tempérés et plus humides. Au Nord, une grande partie de la variabilité atmosphérique est pilotée par des téléconnexions des moyennes latitudes et principalement par l'oscillation Nord-Atlantique, tandis que le Sud du bassin est influencé par la branche descendante de la cellule de Hadley (anticyclone des Açores) et plutôt soumis aux régimes de variabilité tropicale. A l'échelle du bassin, la région est ainsi affectée par des gradients thermique et humide importants.

La région est dans son ensemble marquée par une faible ressource en eau, bien que par ailleurs, elle soit fréquemment soumise à des événements météorologiques et hydro-météorologiques intenses (Fig. 1.3).

Le bassin méditerranéen est connu comme une région de forte concentration de cyclones, en particulier en hiver (Alpert et al., 1990; Campins et al., 2011; Flaounas et al., 2015). La Méditerranée occidentale se trouve en effet à la limite Sud des trajectoires privilégiées des dé-



FIGURE 1.3 : Photos d'illustration des évènements météorologiques et hydro-météorologiques intenses pouvant affecter le bassin méditerranéen occidental : tempête, vent fort, crue et sécheresse.

pressions et tempêtes de moyennes latitudes. Les dépressions venant de l'Atlantique peuvent ainsi atteindre directement la zone et éventuellement être réactivées. Si la formation des cyclones méditerranéens est ainsi due à des précurseurs d'altitude venant de l'océan Atlantique, leur développement apparaît favorisée par les reliefs du pourtour méditerranéen et la mer Méditerranée joue un rôle important dans leur intensification. La région du golfe de Gènes (Fig. 1.1) est particulièrement propice à ces systèmes dépressionnaires, et dans une moindre mesure les régions entre la Murcie et le bassin algérien, ainsi qu'autour de la mer catalane et le golfe du Lion (Jansa, 1986). Plus rarement, les dépressions méditerranéennes peuvent prendre un caractère tropical avec notamment la formation d'un cœur chaud. Ces systèmes sont alors nommés *medicanes* (Ernst et Matson, 1983; Cavicchia et al., 2014; Miglietta et Rotunno, 2019). Les cyclones méditerranéens sont en général de plus petite taille que les dépressions atlantiques (Trigo et al., 2002). Néanmoins, ils contribuent de manière très importante aux précipitations annuelles du bassin et sont fréquemment associés à de forts vents locaux.

Les vents forts régionaux qui affectent le bassin (Lionello et al., 2006a; Zecchetto et De Biasio, 2007; Chronis et al., 2011) résultent en fait principalement des contraintes dues au relief sur l'écoulement de basses couches qui est ainsi canalisé et accéléré dans les vallées,

notamment dans le cas de passage de dépression. Les principaux vents régionaux affectant la mer Méditerranée occidentale sont le Mistral, la Tramontane, le Sirocco, le Libeccio, le Levant et le Ponant, le Grégal et le Vendaval.

Les épisodes méditerranéens de fortes précipitations (Siccardi, 1996; Molini et al., 2011; Nuissier et al., 2011; Ricard et al., 2012) et les crues soudaines ou éclairs qui peuvent en résulter (e.g. Ramis et al., 1994; Sénési et al., 1996; Tripoli et al., 2005; Silvestro et al., 2012) sont les phénomènes hydro-météorologiques les plus dévastateurs qui affectent la région. L'occurrence de ces phénomènes est maximale entre la fin de l'été et l'automne, à la période où à la fois des masses d'air froid en altitude et plus au Nord progressent au Sud, atteignent le bassin et rencontrent les masses d'air qui, en basses couches, se sont chargées en chaleur et humidité au-dessus de la mer Méditerranée, ce qui conduit à une importante instabilité. Les évènements les plus sévères sont majoritairement générés par des systèmes orageux de meso-échelle qui restent quasi-stationnaires sous certaines conditions (voir section 1.2). Les cumuls typiques de ces évènements sont de l'ordre de plusieurs centaines de millimètres en 24 heures ou moins et sont le plus souvent très localisés ( $\sim 25$ -100 km de rayon).

Les canicules (e.g. Stéfanon et al., 2012; Darmaraki et al., 2019) résultent de la mise en place et de la persistance d'une zone de haute pression sur l'Europe de l'Ouest, ce qui déplace vers le Nord les trajectoires des dépressions atlantiques et induit un important chauffage diabatique, de la subsidence et une grande stabilité. Cette situation atmosphérique est dite "situation de blocage". Les fortes anomalies positives de température diurnes comme nocturnes, ainsi que l'absence de précipitation préconditionnant ou associée aux canicules conduit à l'apparition de phénomènes de sécheresse (Vautard et al., 2007) favorisant le déclenchement et la propagation de feux de forêt (Pereira et al., 2005; San-Miguel-Ayanz et al., 2013).

La circulation océanique en Méditerranée occidentale est décrite en détail par Millot (1999).

A grande échelle, il s'agit d'une circulation cyclonique avec l'entrée d'eau atlantique chaude et peu salée en surface au détroit de Gibraltar (Astraldi et al., 1999). Cette eau atlantique (Fig. 1.4a) progresse le long des côtes algériennes et sort partiellement vers le bassin oriental par le canal de Sicile, l'autre partie recirculant vers le Nord en passant soit à l'Ouest de la Sardaigne et la Corse, soit par la mer Tyrrhénienne. La circulation cyclonique de surface se prolonge par le courant Nord qui longe les côtes françaises puis catalanes.

Par action de l'évaporation, les eaux atlantiques ([M]AW pour *[Modified] Atlantic Water*) se densifient progressivement formant des eaux intermédiaires (WIW pour *Winter Intermediate Water* et LIW pour *Levantine Intermediate Water*) et profondes (EMDW pour *Eastern Mediterranean Deep Water*, WMDW pour *Western Mediterranean Deep* ou *Dense Water* et TDW pour *Tyrrhenian Dense Water*). Ces eaux, produites localement ou dans le bassin oriental puis passant le canal de Sicile vers l'Ouest, circulent de manière cyclonique en contournant

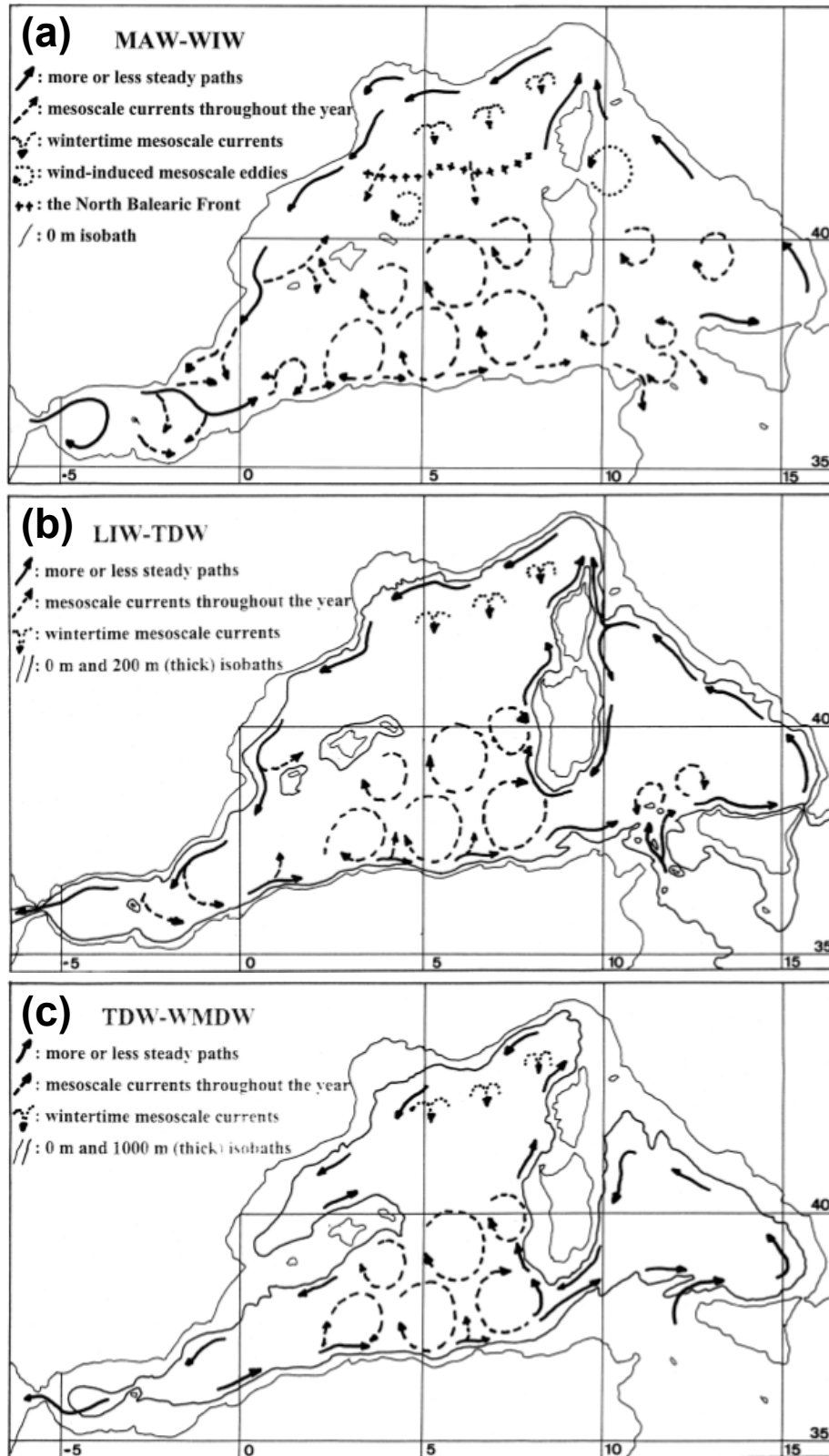


FIGURE 1.4 : Schémas de circulation océanique en Méditerranée occidentale en surface/sub-surface (MAW-WIW), à niveau intermédiaire (LIW-TDW) et dans les couches profondes (TDW-WMDW), d'après Millot (1999).

la bathymétrie du bassin occidental (Fig. 1.4b et c). Ces eaux sortent du bassin par le détroit de Gibraltar (MOW pour *Mediterranean Outflow Water*), constituant une source de sel et de chaleur pour l'océan Atlantique (Skliris, 2014).

En Méditerranée occidentale, plusieurs zones de formation d'eau dense sont identifiées : au niveau du *gyre* cyclonique du golfe du Lion (e.g. Testor et al., 2018) [en particulier à sa périphérie (Waldman et al., 2018)] et du plateau continental (par *cascading*, Canals et al., 2009), en mer Ligure (Schott et al., 1996) et au niveau du *gyre* semi-permanent à l'Est du détroit de Bonifacio (Fuda et al., 2002). La formation d'eau dense est caractérisée par une très grande variabilité interannuelle (Somot et al., 2018b) pilotée principalement par la perte de flottabilité due aux flux de surface et intégrée sur la saison hivernale, ainsi que par l'état de stratification océanique verticale à l'automne.

Le bassin méditerranéen occidental possède des structures océaniques très caractéristiques, chacune ayant fait l'objet d'études dédiées dont on ne cite qu'une partie ci-après :

- les tourbillons en mer d'Alboran (e.g. La Violette, 1984; Parrilla et Kinder, 1987; García-Lafuente et al., 1998; Viúdez et al., 1998; Renault et al., 2012b; Peliz et al., 2013) qui se forment juste après l'entrée du jet atlantique (AJ pour *Atlantic Jet*, dont la vitesse moyenne est de 1 m/s) par le détroit de Gibraltar. Deux gyres anticycloniques sont identifiables, l'un permanent à l'Ouest (WAG pour *Western Anticyclonic Gyre*), l'autre plus intermittent à l'Est (EAG pour *Eastern Anticyclonic Gyre*). Par ailleurs, des cyclones de plus petites tailles le long des côtes co-existent avec les anticyclones, et, la présence de l'AJ proche de la côte Nord rendent les conditions favorables pour le développement d'un *upwelling*. Il existe une grande variabilité de la circulation en mer d'Alboran, saisonnière notamment avec un mode typique de l'automne et de l'hiver où l'AJ est ralenti et orienté plus Sud, conduisant à une situation à un gyre (WAG) et un mode à deux gyres plutôt au printemps et en été quand la vitesse de l'AJ augmente et qu'il s'oriente plus au Nord. L'AJ est également influencé par les forces de marées et les conditions atmosphériques locales ;
- les tourbillons anticycloniques issus des instabilités du courant algérien (notés AEs pour *Algerian Eddies*, Millot et al., 1990) qui progressent vers l'Est le long de la côte africaine ou se détachent pour s'accumuler au Nord-Est (zone notée  $\sum A_E$  par Millot et Taupier-Letage, 2005) en transportant ainsi de l'eau plus légère vers le centre du bassin méditerranéen occidental. Leur diamètre peut dépasser 200 km, leur extension sur la verticale peut être de 3000 m (Ruiz et al., 2002) et leur durée de vie peut atteindre jusqu'à  $\sim 3$  ans (Puillat et al., 2002). ;
- le courant Nord (NC pour *Northern Current* - ou encore parfois appelé courant Liguro-Provençal) qui prend naissance en mer Ligure à la jonction entre le courant occidental corse (WCC pour *Western Corsica Current*) et le courant oriental corse (ECC pour *Eastern Corsica Current*) et qui circule ensuite le long du talus continental jusqu'à la

mer catalane et le canal d'Ibiza (e.g. Taupier-Letage et Millot, 1986; Font J, 1995; André et al., 2005; Duchez et al., 2012; Carret et al., 2019). Le NC est à la fois formé de MAW et de LIW en subsurface. Il possède en particulier une signature en température de surface puisqu'il transporte de l'eau plus chaude venant du Sud et de l'Est. Son intensité maximale est de 1.5 à 2 Sv en hiver lorsqu'il devient plus fin, plus profond et plus collé au talus. Le NC présente des méandres sur une gamme d'échelle entre 10 et 100 km (Crépon et al., 1982; Sammari et al., 1995), et, sous certaines conditions de vent et de stratification, le NC peut également s'introduire au niveau du plateau continental du golfe du Lion (Echevin et al., 2003; Petrenko et al., 2008);

- les tourbillons de méso-échelle circulant depuis le plateau continental du golfe du Lion jusqu'en mer catalane (Rubio et al., 2009; Garreau et al., 2011; Hu et al., 2011), particulièrement examinés dans le cadre du projet LATEX (*LAgrangian Transport EXperiment*, Kersalé et al., 2013; Petrenko et al., 2017);
- l'estuaire du Rhône qui constitue une zone importante d'échanges et de transport d'eau douce, de nutriments et de polluants entre le continent et la mer (Naudin et al., 2001; Fraysse et al., 2014), et son panache qui est caractérisé par une grande variabilité de son extension horizontale et verticale pilotée principalement par le vent et le débit du fleuve (Broche et al., 1998; Estournel et al., 2001; Gangloff et al., 2017);
- le front Nord-Baléares (e.g. Font et al., 1988; García et al., 1994; Mancho et al., 2008; Seyfried et al., 2019) qui ferme au Sud la circulation cyclonique du *gyre* et qui constitue une barrière "lagrangienne" (ou dynamique) quasi-permanente entre les eaux atlantiques "récentes" et les eaux plus salées situées dans le golfe du Lion. La position du front présente une grande variabilité - saisonnière notamment - en raison d'une part de son interaction avec la dynamique tourbillonnaire des AW (de la zone  $\sum A_E$ ) et d'autre part de la structure et dynamique verticales des eaux occupant la mer catalane et le centre du golfe du Lion;

Plusieurs zones d'*upwelling* [*downwelling*] côtiers ont par ailleurs été identifiées en réponse aux vents locaux, en particulier dans le bassin Nord-occidental (Millot, 1982), et de nombreuses structures de plus fine échelle sont présentes et circulent en Méditerranée occidentale, tels que des tourbillons côtiers (Millot, 1991) et/ou de subméso-échelle, des filaments, ou encore des *Submesoscale Coherent Vortices* (SCV, Testor et Gascard, 2003; Bosse et al., 2016).

En mer Tyrrhénienne, la circulation de surface est marquée par les passages aux détroits (Astraldi et al., 1999; Astraldi et Gasparini, 2013). Entrant par le canal de Sardaigne (au Sud de l'île), la veine d'AW alimentée par le courant algérien se sépare entre l'ATC (*Atlantic Tunisian Current*) et l'AIS (*Atlantic Ionian Stream*) passant le canal de Sicile et le BTC (*Bifurcation Tyrrhenian Current*) qui longe la côte Nord-sicilienne (Sorgente et al., 2011). La circulation cyclonique connaît une nouvelle bifurcation au large de la région du Latium



(ou *Lazio*) avec une partie ressortant par le canal de Sardaigne tandis qu'une autre partie circule vers le Nord, passant le canal de Corse (au Nord de l'île) et formant le courant Nord. Deux structures cycloniques permanentes sont ainsi identifiables, l'une au niveau du détroit de Bonifacio, l'autre au Sud au centre de la boucle de recirculation directe. L'intensité de la circulation cyclonique montre une forte variabilité saisonnière, avec un affaiblissement en été en particulier du courant à l'Est de la mer Tyrrhénienne, permettant l'apparition de structures océaniques plus fines (Artale et al., 1994; de la Vara et al., 2019);

Les interactions de la mer Méditerranée avec l'atmosphère sont, par bien des aspects, particulièrement déterminantes pour la circulation du bassin, à fine comme à grande échelle, pour sa variabilité intra-saisonnière à décennale, et dans la formation des masses d'eau et leur transport, comme l'atteste la riche littérature mettant en évidence le rôle du forçage atmosphérique sur les processus océaniques en Méditerranée (par exemple Mertens et Schott, 1998; Marshall et Schott, 1999; Castellari et al., 2000; Artale et al., 2002; Josey, 2003; Béranger et al., 2005, 2010; Olita et al., 2007; Herrmann et Somot, 2008; Langlais et al., 2009; Lebeau-pin Brossier et al., 2011; Small et al., 2012; Omrani et al., 2016; Seyfried et al., 2017; de la Vara et al., 2019, ...).

En matière de biogéochimie, la Méditerranée est l'une des mers les plus oligotrophes au monde (Béthoux et al., 1998). La rareté des nutriments contraint fortement la productivité biologique avec une biomasse qui reste particulièrement faible. D'un autre côté, du fait d'une grande adaptation des organismes au milieu, la biodiversité y est élevée. Cette biodiversité est particulièrement menacée en Méditerranée à la fois par les phénomènes conjoints d'eutrophication et introduction d'espèces exotiques (notamment par le canal de Suez), du changement climatique (réchauffement et acidification) et autres pressions anthropiques (pêche et aquaculture, tourisme, pollution, ...).

La végétation méditerranéenne typique est constituée d'espèces adaptées à la faible ressource en eau (conifères, feuillus sempervirents, garrigue et maquis). Néanmoins, la surface des zones naturelles du pourtour méditerranéen est en net recul. Progressivement, les paysages méditerranéens ont été transformés par l'agriculture (viticulture, vergers et oléiculture, horticulture, etc). Le territoire subit par ailleurs une très forte pression démographique qui conduit à une urbanisation croissante (Fig. 1.1), notamment au cours des dernières décennies. Il est également contraint par le développement du tourisme de masse. Ainsi, le pourtour méditerranéen est particulièrement vulnérable à l'érosion des sols, aux glissements de terrain et/ou au ruissellement.

Concernant la composition atmosphérique, la Méditerranée est située à un carrefour (Nabat et al., 2016) avec la présence d'aérosols naturels provenant de la mer ou du désert du Sahara, semi-naturels tels que ceux émis lors de feux de forêt, ou bien la présence de divers composés chimiques volatils, polluants et aérosols produits par les activités humaines (indus-

trie, combustion, transport et villes), tous ayant des impacts significatifs sur la qualité de l'air et la santé, le bilan radiatif et des conséquences sur la météorologie et le climat (effets directs, semi-directs et indirects), mais aussi sur l'océan (modification de la température de surface de la mer et plus généralement de la circulation océanique), sur la biogéochimie marine et la végétation continentale (dépôts de poussières désertiques et de carbone suie).

Tous ces éléments mettent finalement en évidence la très grande vulnérabilité de la mer Méditerranée et de son pourtour aux épisodes météorologiques intenses et aux futures évolutions atmosphériques et climatiques.

La Méditerranée est donc une zone d'étude riche ce qui a notamment motivé en 2010 la mise en place du chantier MISTRALS (*Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales*) de l'INSU. Lancé pour dix ans, le chantier MISTRALS avait pour objectif principal de fédérer les recherches scientifiques françaises et de renforcer les collaborations internationales en Méditerranée sur les questions scientifiques autour :

- du changement climatique ;
- du cycle de l'eau ;
- de l'évolution de la biogéochimie marine ;
- de la composition de l'atmosphère ;
- de la biodiversité et de sa vulnérabilité ;
- de l'évolution des milieux urbains et ruraux.

Ce chantier s'est décliné en plusieurs programmes et actions transverses (Fig. 1.5), parmi lesquels le programme HyMeX (*Hydrological cycle in the Mediterranean EXperiment*, HyMeX White Book, 2008; Drobinski et al., 2014) qui étudiait le cycle de l'eau en Méditerranée et en particulier les événements intenses qui marquent le cycle hydrologique du bassin (précipitations intenses, crues, vent et flux air-mer forts, convection océanique et formation d'eau dense, sécheresses) afin d'améliorer la connaissance des différents processus en jeu et la prévision des risques hydro-météorologiques.

La stratégie expérimentale du programme HyMeX se basait sur une imbrication à trois niveaux de plusieurs périodes pour le déploiement de moyens d'observation atmosphériques, en mer et sur le continent. Une période longue d'observation (LOP pour *Long-term Observation Period*) constitue une base de documentation des différentes composantes du cycle hydrologique à l'échelle du bassin et de la décennie, ainsi que de leur variabilité saisonnière à décennale et vise à renforcer les systèmes opérationnels d'observations et les efforts des différents observatoires. Une période d'observation étendue (EOP pour *Enhanced observation period*) de quelques années ou quelques saisons successives a permis à la fois d'évaluer le budget et d'étudier certains processus. Enfin, des périodes d'observations spéciales (SOP pour *Special Observation Period*) de quelques mois ont permis l'étude fine des processus ciblés et clés pour le cycle hydrologique sur des régions spécifiques du bassin.

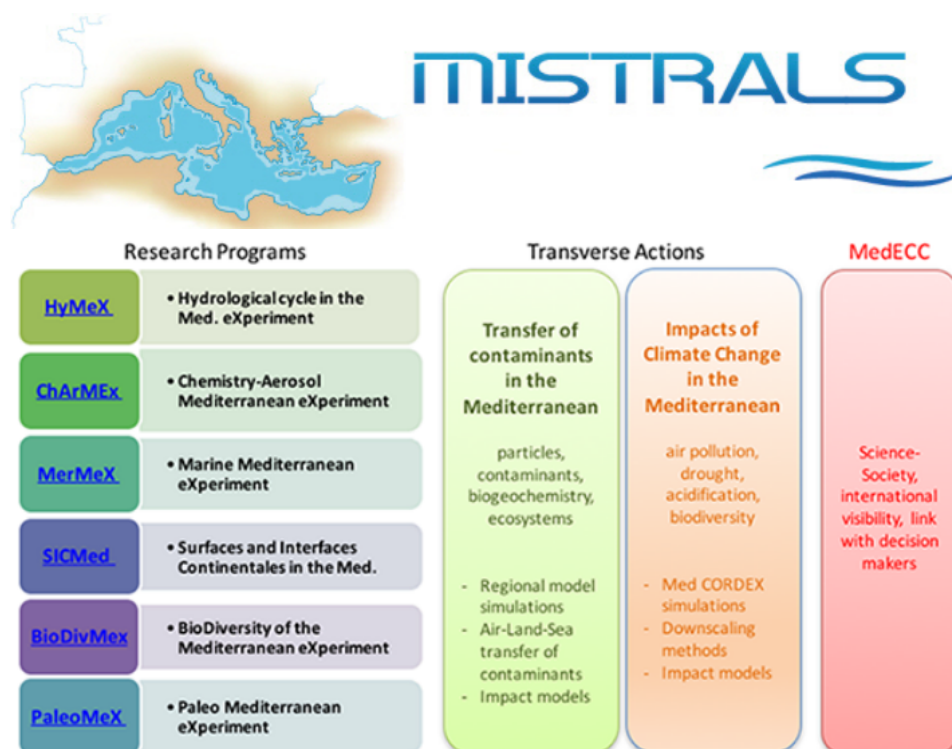


FIGURE 1.5 : Les programmes de recherche et les actions transverses du chantier MISTRALS de l'INSU. Source : <https://programmes.insu.cnrs.fr/en/mistrals-en/> (février 2019).

La première SOP (SOP1, Ducrocq et al., 2014), qui s'est déroulée dans le bassin occidental entre le 5 septembre et le 6 novembre 2012, a permis de documenter l'environnement, la formation et la dynamique de cas de précipitations intenses et de crues. Ducrocq et al. (2014) liste en détail les moyens d'observations déployés pendant la campagne et les cas (ou IOPs pour *Intensive Observation Periods*) pour lesquels des moyens sur alerte ont été mis en œuvre. Les principaux résultats de la SOP1 sont présentés dans Ducrocq et al. (2016) et, en résumé, concernent :

- l'apport de la synergie d'observations pour bien caractériser la SOP1, ainsi que pour la validation de nouveaux systèmes instrumentaux ou de modélisation ;
- la compréhension des processus en terme d'initiation de la convection profonde et de son cycle de vie, la dynamique et microphysique des systèmes convectifs, l'origine et le transport de la vapeur d'eau venant alimenter les systèmes fortement précipitants ;
- l'amélioration des modèles de prévision numérique du temps et des modèles régionaux de climat.

La deuxième SOP (SOP2, Estournel et al., 2016) visait à étudier la formation d'eau dense dans le bassin Nord-occidental et les mécanismes océaniques et atmosphériques associés (convection océanique profonde, vent forts et flux intenses). La campagne s'est déroulée du 27 janvier au 15 mars 2013, conjointement avec la campagne DEWEX (*DEep Water formation EXperiment*) du programme MerMEr (*Marine Ecosystems Response in the Mediterra-*

*nean Experiment*) du chantier MISTRALS (Fig. 1.5). Cette étude d'un cas de formation d'eau dense a également largement bénéficié de campagnes océanographiques réalisées en amont et à posteriori, à la fois par l'observatoire MOOSE (*Mediterranean Ocean Observing System for the Environment*) dans le cadre de la LOP et lors de campagnes MerMex dédiées. La synthèse de la SOP2 réalisée dans Testor et al. (2018) montre que les nombreuses observations collectées et les différents outils de modélisation mis en œuvre ont permis :

- de quantifier les contenus thermique et halin à l'échelle du bassin Nord-occidental et pour différentes échelles de temps ;
- d'estimer de manière robuste le taux de formation d'eau dense ;
- de décrire en détail l'évènement de formation d'eau dense, notamment sa couverture spatiale et temporelle ;
- de mettre en évidence l'importance de structures clés de la circulation pour la convection profonde océanique et le *bloom* qui s'en est suivi (plumes convectives, instabilités symétriques à la périphérie de la zone de convection, plongée d'eaux côtières et SCVs).

La fin du programme HyMeX a été marquée par la réalisation de campagnes de mesure dédiées : EXAEDRE (*EXploiting new Atmospheric Electricity Data for Research and the Environment*, PI : E. Defer LAERO), PERLE (*Pelagic Ecosystem Response in the Levant Experiment*, PI : X. Durrieu de Madron CEFREM) et LIAISE (*Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment*, PI : A. Boone CNRM).

Les efforts pluridisciplinaires au sein d'HyMeX ont été un atout clé pour faire progresser nos connaissances sur le cycle de l'eau de la région méditerranéenne et ses extrêmes. A titre d'illustration, l'article de Khodayar et al. (2021) présente une synthèse de l'avancée des connaissances sur la compréhension des mécanismes en jeu pendant les épisodes fortement précipitants en Méditerranée Occidentale et sur leur modélisation, dont certains éléments seront repris dans la section suivante (1.2).

## 1.2 Évènements fortement précipitants en Méditerranée occidentale

### 1.2.1 Principaux ingrédients de formation

De forts cumuls de précipitations peuvent être obtenus lorsque des perturbations frontales pluvio-orageuses stationnent sur la région pendant plusieurs jours. Ces perturbations peuvent être associées à des dépressions au-dessus de la mer Méditerranée parfois très creuses.

Les épisodes fortement précipitants sont plus communément favorisés par une circulation de grande échelle caractéristique telle que les situations synoptiques dites de blocage du fait

notamment de leur évolution lente (Martínez et al., 2008; Nuissier et al., 2008). Dans ces situations, en altitude, un thalweg ou un cyclone [parfois aussi appelé goutte froide ou encore *cutoff low*] se trouve à l'Ouest de la région d'intérêt. Ce type de circulation atmosphérique conduit à des anomalies de tourbillon potentiel (PV pour *Potential Vorticity*) en altitude qui contrôlent le flux en basses couches. Ainsi, elles génèrent un flux de Sud à Est diffluent qui transporte une masse d'air chaud et humide, déstabilisent la colonne d'air et induisent des ascendances (voir par exemple Romero, 2001; Romero et al., 2006). Jansa et al. (2001) ont pu montrer que la présence d'un cyclone/thalweg favorisant l'apparition et l'intensification du flux humide concernent  $\sim 90\%$  des cas de fortes précipitations en Méditerranée occidentale.

Dans les deux cas, la circulation en basses couches est ainsi contrôlée par une dépression, à l'avant de laquelle se forme un jet de basses couches humide et conditionnellement instable, le plus souvent de la mer vers les côtes, et qui vient alimenter le(s) système(s) précipitant(s).

Sur le Sud-Est de la France, l'étude statistique de Nuissier et al. (2011) fait ressortir 4 schémas synoptiques pouvant conduire à des événements fortement précipitants. Parmi ces 4 situations typiques, les configurations dites *Cyclonic SouthWesterly* (CSW) et *Cyclonic Southerly* (CS) sont les plus favorables. Elles présentent toutes les deux en altitude un thalweg d'altitude à l'Ouest de la France pouvant s'étendre jusqu'à la péninsule ibérique, tandis qu'une dorsale existe sur l'Europe centrale (Fig. 1.6 a,b). Ceci conduit au flux de Sud/Sud-Ouest diffluent au-dessus du golfe du Lion et du Sud de la France. Ces situations diffèrent en basses couches, avec un flux de Sud-Ouest entre le détroit de Gibraltar, les îles Baléares et qui pivote au Sud-Est au niveau du golfe du Lion pour la situation CSW (Fig. 1.6 c,e), et un flux de Sud-Est provenant de Méditerranée centrale et Sardaigne pour la situation CS (Fig. 1.6 d,f).

Les événements fortement précipitants qui affectent l'Est de l'Espagne sont typiquement associés à une goutte froide au Sud-Ouest de la péninsule ibérique (Ramis et al., 1994; Jansa et al., 2001; Homar et al., 2002; Ramos et al., 2014; Gilabert et Llasat, 2018). Ceux affectant le Nord-Ouest et le Centre de l'Italie sont associés à un thalweg entre mer du Nord/Scandinavie et Méditerranée occidentale qui dirige un flux d'altitude vers l'Europe de l'Est et interagit avec le relief (les Alpes et les Appenins) pouvant notamment induire une dépression sur le golfe de Gènes et en mer Tyrrhénienne (Rudari et al., 2004; Tartaglione et al., 2009; Ferretti et al., 2014).

Les mêmes ingrédients synoptiques sont impliqués dans des situations fortement précipitantes en Afrique du Nord. Par exemple, dans le cas des précipitations torrentielles ayant touchées Alger les 9-10 novembre 2001, la présence d'un thalweg profond entre la Scandinavie et l'Espagne et d'une dépression dans le golfe de Gènes, ont conduit à de l'advection d'air polaire d'altitude au niveau de l'Atlas favorisant la cyclogénèse et l'advection en basses couches d'air humide et instable vers les côtes algériennes (Argence et al., 2008).

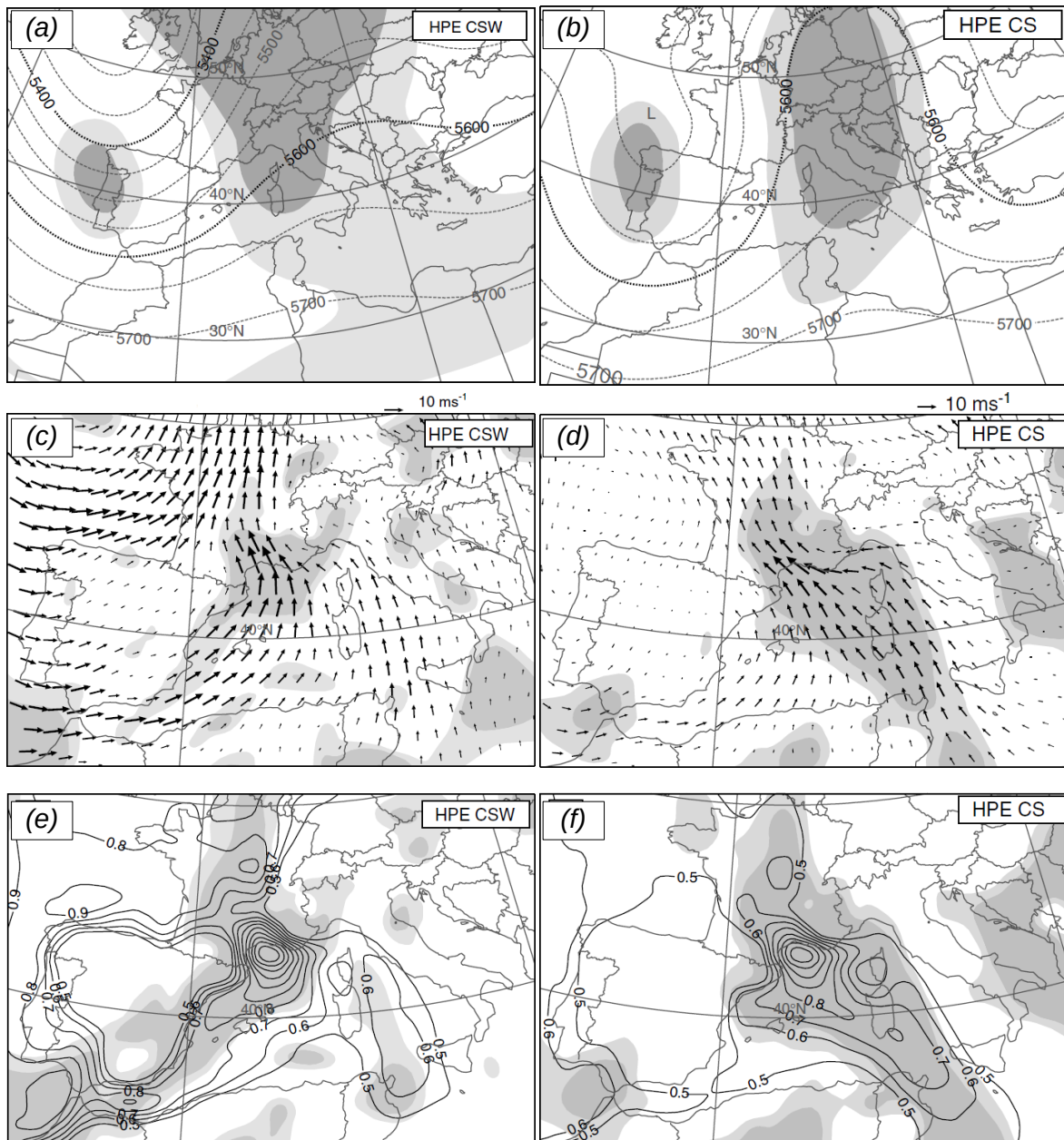


FIGURE 1.6 : Composites des situations CSW (à gauche) et CS (à droite) propices aux événements fortement précipitants du Sud-Est de la France, extraits de Nuissier et al. (2011) : (a,b) hauteur du géopotential (m, contour tous les 50m) à 500hPa; (c,d) vent horizontal ( $m s^{-1}$ ) à 925hPa; (e,f) flux d'humidité ( $kg m s^{-2}$ , contour tous les  $0.1kg m s^{-2}$ ) à 925hPa. Les zones grisées indiquent les différences avec les autres composites correspondant aux niveaux de confiance de 90% et 95% du t-test de Student.

L'ingrédient majeur conduisant à un événement fortement précipitant est donc le jet de basses couches conditionnellement instable au-dessus de la mer Méditerranée (Ricard et al., 2012) qui vient buter sur les reliefs du pourtour méditerranéen. Il est alors forcé à s'élever, enclenchant ainsi le processus de convection profonde (Fig. 1.7 a).

Au delà de ce simple effet d'obstacle, la vitesse et l'instabilité du flux de basses couches

en elles-mêmes sont des éléments importants qui participent au mécanisme de soulèvement (Bresson et al., 2012; Stocchi et Davolio, 2017). Ainsi, dans le cas d'un nombre de Froude - qui quantifie le ratio entre énergie cinétique et énergie potentielle (convective) - supérieur à 1, les conditions sont favorables au soulèvement, alors que s'il est inférieur à 1, le processus de contournement sera plus prononcé. Par ailleurs, le cisaillement vertical de vent joue aussi un rôle. Dans le cas d'une diminution [augmentation] du vent avec l'altitude, les ascendances seront plus [moins] fortes au pied du relief et il y aura une interaction constructive [destructive] entre tourbillon et relief favorisant [limitant] le soulèvement.

L'interaction entre la circulation de basses couches et l'orographie est donc un mécanisme de déclenchement direct, mais d'autres mécanismes contribuent également à l'initiation de la convection menant à des systèmes précipitants intenses (Ducrocq et al., 2016).

La convergence d'humidité est souvent à l'origine du développement de système convectif (Fig. 1.7 b), notamment en mer. La convergence du flux de basses couches peut être une conséquence de la circulation à grande échelle mais peut également résulter de contraintes dynamiques ou orographiques à méso-échelle sur le flux de basses couches. En particulier, la présence des reliefs et des îles en Méditerranée occidentale contraint l'écoulement en basses couches et conduit fréquemment à des flux de contournement qui indirectement vont jouer sur la convergence en basses couches (e.g. Scheffknecht et al., 2016). Duffourg et al. (2016) ont montré que dans le cas de l'IOP16a de la SOP1-HyMex la convergence entre un flux de Sud-Est et un flux de Sud-Ouest a été le mécanisme principal du déclenchement d'un train de cellules convectives dans le golfe du Lion. La ligne de convergence est en fait reliée à une dépression secondaire formée sur le Nord-Est de l'Espagne en aval des reliefs et est ensuite amplifiée en raison d'une circulation cyclonique qui se met en place autour de la plage d'air froid sous orage.

La formation et le développement de poches [ou dômes] d'air froid sous orage est également un mécanisme de soulèvement qui entretient la convection (Fig. 1.7 c). Ces poches sont formées en raison de l'évaporation des précipitations sous orage. Le cas du Gard, les 8 et 9 septembre 2002 (Delrieu et al., 2005), est un cas emblématique de soulèvement et entretien du système convectif par un dôme d'air froid. La modélisation numérique à haute résolution a en effet permis de montrer que reproduire ce dôme d'air froid est nécessaire pour simuler les précipitations les plus intenses au niveau de la plaine plutôt que sur les Cévennes (Ducrocq et al., 2008).

Enfin, d'autres écoulements en basses couches notamment topographiques peuvent aussi jouer un rôle dans le mécanisme de soulèvement, comme dans le cas de vent canalisé et accéléré par les vallées et/ou des effets de barrière (Fig. 1.7 d). En raison du blocage partiel du flux au pied du relief, la zone de soulèvement de la masse d'air se décale alors vers l'amont. Une ascendance peut aussi se développer au sommet du relief lorsque le chauffage solaire des flancs de la barrière orographique induit des mouvements ascendants le long des pentes qui

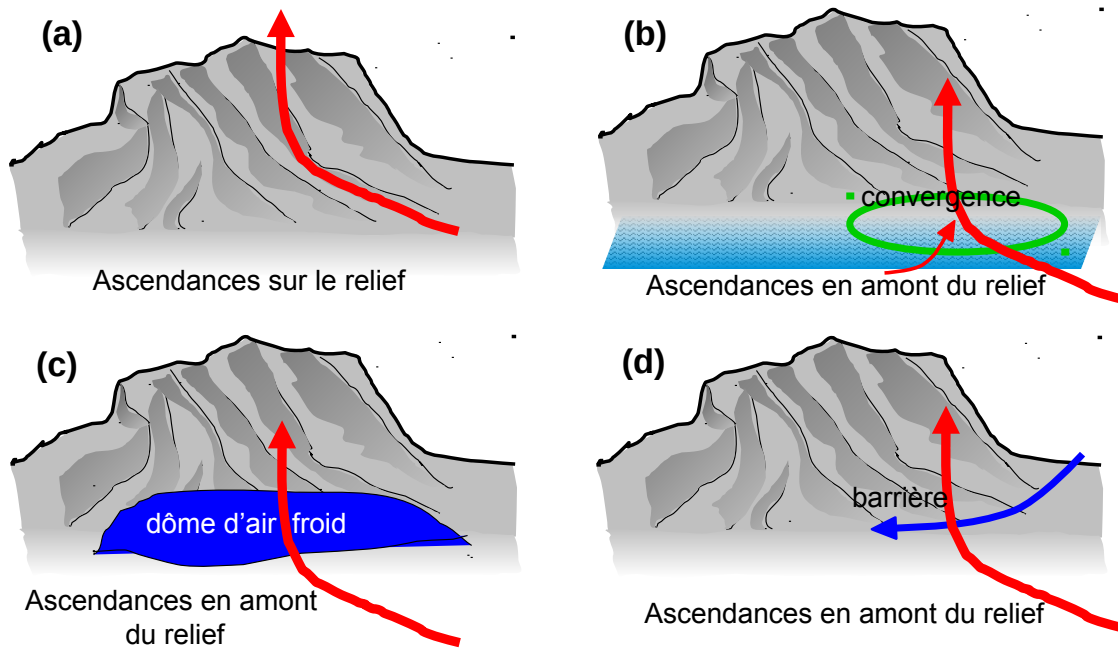


FIGURE 1.7 : Schémas décrivant les différents types de forçage de la convection dans les cas d'événements fortement précipitants méditerranéens (adaptés du document de stage pré-automne de Météo-France de rappels sur les évènements fortement précipitants, source : [sop.hymex.org](http://sop.hymex.org)).

convergent vers le sommet. Enfin, les ondes de gravité en aval du relief peuvent renforcer des ascendances thermiques sous le vent du relief et y déclencher la convection.

Le plus souvent les fortes précipitations sont produites par des systèmes convectifs de méso-échelle (MCS pour *Mesoscale Convective System*) quasi-stationnaires. Ces systèmes se caractérisent généralement par une forme en V de l'enclume détectable dans l'imagerie satellitaire infra-rouge (Scofield, 1985). Ils sont aussi caractérisés par une régénération dite rétrograde qui consiste en un renouvellement des cellules convectives à la pointe du V pendant que les cellules matures se déplacent en aval du flux le long des branches du V. La stationnarité de ces systèmes est liée au relâchement de l'instabilité convective au même endroit et sur plusieurs heures (du fait d'une alimentation continue, de la lenteur de la progression de ligne de convergence et/ou de par la configuration topographique), ce qui conduit à des cumuls de précipitations très importants et très localisés. Les MCS sont aussi à l'origine d'autres phénomènes violents de type vent fort, front de rafales, tornades, grêle et éclairs.

Cotton et al. (2011) donnent une description très détaillée des différentes caractéristiques, du cycle de vie et de la dynamique des MCS. Parmi les aspects décrits, les points importants à relever pour ce qui concerne les épisodes méditerranéens sont :

- les interactions avec la dynamique - en altitude par le relâchement de chaleur latente dans la partie stratiforme ce qui crée une rotation cyclonique et conduit à une anomalie positive de PV au milieu de la troposphère venant amplifier l'anomalie présente et



influencer le développement de nouveaux systèmes; en basses couches par la forte dépendance du cycle de vie du MCS au jet de basses couches;

- des mouvements verticaux en basses couches (subsidence/soulèvements) qui peuvent favoriser le *clustering* de la convection;
- la formation de poche d'air froid sous orage qui constitue une sorte d'optimum pour la stationnarité de ces systèmes;
- des interactions avec les ondes de gravité;
- une microphysique complexe sur laquelle peuvent impacter les aérosols.

Bien que les MCS soient majoritairement formés au-dessus des continents, plusieurs climatologies couvrant le bassin méditerranéen occidental montrent que la zone marine et les îles du bassin sont aussi propices au développement de MCS, particulièrement en fin d'été et automne (Tudurí et Ramis, 1997; Morel et Senesi, 2002).

Le réseau de mesure déployé pendant les campagnes d'observations du programme HyMeX et l'utilisation de nouvelles générations de modèles plus fins et/ou couplés ont permis une validation extensive des modèles, le développement de nouvelles paramétrisations, la mise au point d'ensemble à résolution fine et de nouvelles techniques d'assimilation (Khoury et al., 2021). Au total, HyMeX, et particulièrement la Science Team « Heavy Precipitation » a favorisé la mise en évidence de résultats théoriques, l'enrichissement de nos connaissances sur la genèse et l'évolution de la convection dans un environnement topographique complexe, et l'amélioration des prévisions de précipitations. Le rôle des cyclones dans l'apparition de fortes précipitations a ainsi été souligné, et le rôle crucial de la distribution spatio-temporelle de la vapeur d'eau atmosphérique pour la compréhension et la prévision du timing de l'emplacement de la convection profonde a été démontré, tout comme l'interaction complexe entre les processus à travers les échelles. L'importance des conditions de surface sur continent et océan, ainsi que les interactions entre les différents compartiments ont aussi été mises en évidence, et des systèmes numériques couplés à méso-échelle ont été spécifiquement développés dans le cadre d'HyMeX pour améliorer le réalisme des prévisions météorologiques et des simulations du climat régional.

## 1.2.2 Modifications dues au changement climatique ?

De par sa position à la frontière entre le climat tempéré au Nord et plus aride au Sud, la Méditerranée apparaît comme un *hot-spot* du changement climatique (Giorgi, 2006). La Méditerranée est une des zones du globe où les modèles s'accordent pour décrire un réchauffement très marqué et une diminution des précipitations en moyenne annuelle. Sur les dernières décennies, une tendance à la diminution des précipitations est ainsi observée (Xoplaki et al.,

2004) conduisant à de plus nombreuses sécheresses (Hoerling et al., 2012).

Cet assèchement moyen s'accompagne néanmoins d'une augmentation des extrêmes de précipitation.

L'étude de Jacob et al. (2014), utilisant les résultats d'un ensemble de modèles régionaux de climat (RCM pour *Regional Climate Model*) pour les scénarios d'émissions RCP8.5 et RCP4.5 (RCP pour *Representative Concentration Pathways*), montre une augmentation des précipitations les plus intenses notamment au Nord du bassin et un décalage saisonnier de ces précipitations les plus intenses vers l'hiver. Néanmoins, le signal obtenu apparaît comme non significatif sur une grande partie de la région et il existe une forte limitation sur l'interprétation des résultats concernant les épisodes convectifs fortement précipitants, car la convection n'est pas résolue explicitement dans ces modèles (la plus fine résolution étant 12 km).

L'étude de Ribes et al. (2019) montre la réponse en cours (sur la période 1961-2015) des événements fortement précipitants du Sud-Est de la France par une approche statistique basée sur le maximum annuel du cumul quotidien observé. Cette étude montre une augmentation de l'intensité sur la période (+22%, ré-évaluée à +12% avec intervalle de confiance à 90% : [-1% ; +28%] sur la période 1961-2022 dans Ribes et al., 2022) en accord avec le taux prévu par la relation de Clausius-Clapeyron (7% par degré de réchauffement) en prenant en compte le réchauffement climatique local. Une augmentation de la fréquence des épisodes méditerranéens les plus forts est également observée depuis 1961 (Fig. 1.8). Pour le seuil de 200 mm en 24h, l'augmentation de fréquence correspond à un doublement (intervalle de confiance à 90% : [1.0 ; 3.9]). L'étude de Blanchet et al. (2018) conclut également à une augmentation du maximum annuel de précipitations cumulées en 24h atteignant +60 mm en 20 ans sur le Sud-Est de la France, et plus particulièrement sur les zones de plaine et la vallée du Rhône.

La première explication concernant l'augmentation de l'intensité d'événements fortement précipitants méditerranéens en réponse au changement climatique est liée à une plus forte humidification de l'atmosphère en réponse à l'augmentation de température. Mais d'autres

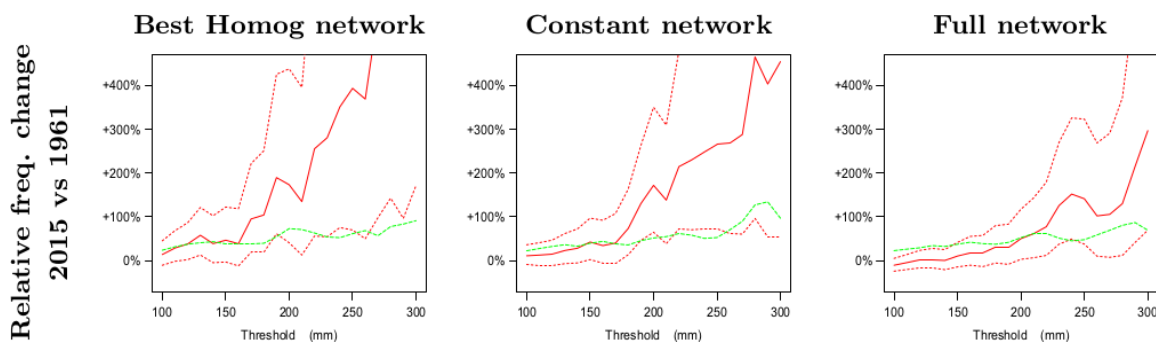


FIGURE 1.8 : Changement relatif de fréquence en fonction du seuil de précipitation considéré entre 2015 et 1961 selon trois différents réseaux d'observations (en rouge continu); les courbes pointillées rouges indiquant les limites de l'intervalle de confiance et la courbe pointillée verte est l'estimation à partir de la relation de Clausius-Clapeyron. Figure extraite de Ribes et al. (2019).

hypothèses et mécanismes restent encore à examiner plus avant, telle que la possibilité de changements dans la circulation atmosphérique de grande échelle pouvant conduire à une augmentation de leur occurrence. En ce sens, les travaux réalisés dans le projet CYPRIM ont notamment mis en évidence que l'augmentation des précipitations intenses pour la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle sur le Sud-Est de la France s'accompagne d'une augmentation de l'occurrence de situations synoptiques propices de type "situation Thalweg-Dorsale" [ou CS selon la nomenclature de Nuissier et al. (2011)] se traduisant par une accélération du flux de Sud-Est et un changement dans la répartition spatiale des précipitations extrêmes avec moins d'évènements sur les Cévennes et les Alpes et plus sur le Languedoc-Roussillon et les Pyrénées (Ricard et al., 2009). Enfin, les mécanismes de petite-échelle et les boucles de rétroactions entre différents compartiments du système climatique sont aussi des processus clés qui doivent être plus largement étudiés pour la compréhension de la réponse de événements méditerranéens au changement climatique.

### 1.2.3 Enjeux de prévision

Par plusieurs aspects, la mer Méditerranée est un ingrédient important à prendre en compte dans la modélisation des phénomènes fortement précipitants. La mer apparaît d'abord comme une source de chaleur et de vapeur d'eau nécessaire à l'instabilité à l'origine de la convection profonde. Le transfert d'énergie de la couche de mélange vers la couche limite atmosphérique est particulièrement contrôlé par le vent en basses couches et par la stratification verticale océanique.

Les structures fines de température de surface de la mer et gradients modifient également la dynamique atmosphérique principalement par effet de transfert de quantité de mouvement aux échelles courtes de temps et ces modifications du vent en basses couches peuvent jouer sur la convergence. L'état de mer a aussi un rôle sur le vent en basses couches au travers des échanges de quantité de mouvement.

Enfin, la mer peut aussi parfois jouer le rôle d'amplificateur des inondations en limitant l'écoulement par la montée du niveau de la mer par effet barométrique et par la génération d'une forte mer du vent se propageant vers les côtes due aux vents forts qui accompagnent les pluies intenses.

Ainsi, le couplage interactif d'un modèle atmosphérique à fine-échelle à un modèle océanique 3D et un modèle de vagues est à la fois nécessaire pour une meilleure représentation des échanges dynamiques et thermodynamiques et pour la compréhension des événements fortement précipitants méditerranéens. Le couplage apparaît aussi comme un outil pertinent pour leur prévision intégrée qui peut concerner plusieurs enjeux notamment en terme de vigilance (Fig. 1.9).

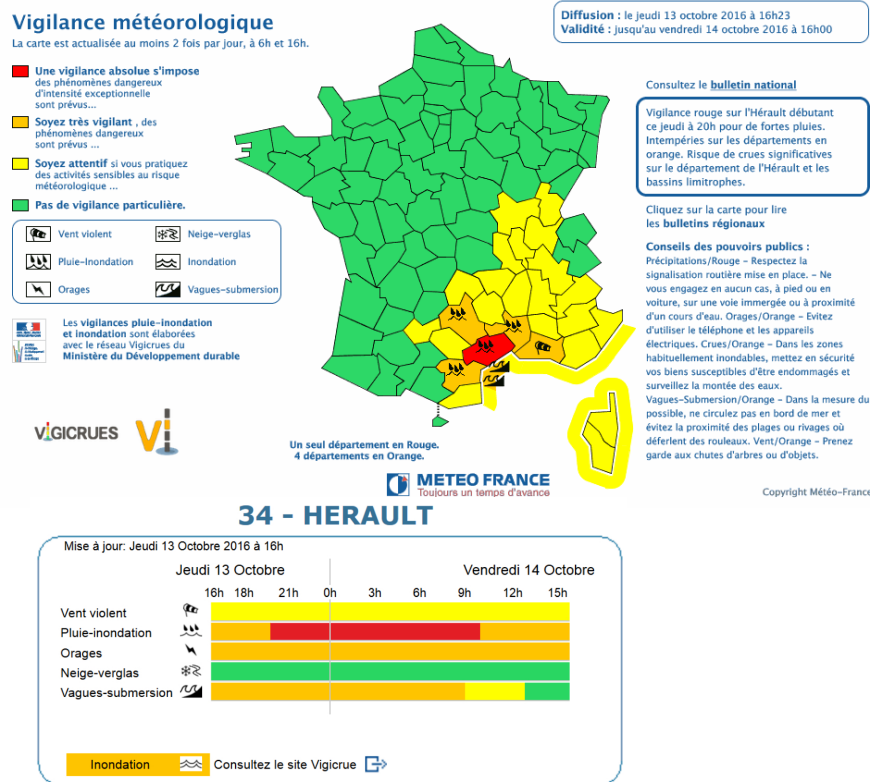


FIGURE 1.9 : Carte de vigilance de Météo-France diffusée l'après-midi du 13 octobre 2016 et détails temporels pour le département de l'Hérault. Pour cet évènement, les vigilances oranges sur le Sud-Est de la France ont concerné à la fois les aspects de vagues-submersion, de vent violent, d'orages, de fortes précipitations et inondations [rouge pour l'Hérault].

La prévision des épisodes fortement précipitants méditerranéens, qui constitue un fort enjeu au vu de la sévérité du phénomène, se confronte à de nombreuses incertitudes. En particulier, les erreurs sur la localisation ont des conséquences importantes en terme de réponse hydrologique et donc sur la prévision et l'alerte pour les crues rapides.

Les incertitudes sont liées au fait que les mécanismes en jeu sont de petites échelles (10 à 100 km), qu'il existe des interactions non-linéaires avec la situation à grande échelle et de multiple échanges et processus à l'interface de différents compartiments du système qui jouent sur l'alimentation (thermodynamique) et sur la dynamique des systèmes précipitants. Ces éléments rendent nécessaire l'utilisation d'un système de prévision adapté. Le système idéal aurait une haute résolution spatiale permettant de résoudre explicitement les mécanismes jouant sur le déclenchement et le maintien de la convection, serait couplé à d'autres modèles du système Terre ou inclus dans une chaîne intégrée de prévision et qui permettrait de produire des ensembles afin de quantifier et prendre en compte les incertitudes. Pour construire un tel système de prévision, il est important de considérer chaque point séparément (résolution, couplage, ensemble) en termes de bénéfice/coût mais aussi d'assurer une cohérence en matière de développement.

Le travail présenté dans la suite de ce manuscrit de HDR porte que la question du **couplage avec l'océan et les vagues** pour la **compréhension** et la **prévision** des épisodes méditerranéens; la résolution considérée étant *kilométrique* et le mode d'exécution ayant été jusqu'à présent *déterministe* (consistant à établir un unique scénario d'évolution de l'atmosphère à partir de conditions initiales au plus proche de l'état observé).

Le manuscrit détaillera dans un premier temps un état de l'art de la modélisation couplée océan-atmosphère-vagues (chapitre 2), en particulier à l'échelle kilométrique. Les travaux de recherche de l'auteurice seront ensuite résumés et discutés (chapitre 3). Enfin les perspectives de recherche seront présentées (chapitre 4).

## Chapitre 2

# État de l'art de la modélisation couplée océan-atmosphère

### 2.1 Le couplage : De l'étude du climat à la modélisation à fine échelle

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 et Bryan, 1969; Semtner, 1984; Nihoul, 1985; Terray et al., 1995). Ces systèmes ont actuellement une résolution typique de l'ordre de 1°, et intègrent également des représentations de la cryosphère et de l'hydrologie continentale (Fig. 2.1). Les développements actuels de ces systèmes visent à améliorer la représentation des processus physiques et leur diversité à la fois par des aspects de raffinement de résolution et la mise au point de paramétrisations dédiées. D'autre part, 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" (ESM pour *Earth System Model*).

Les modèles globaux couplés océan-atmosphère (et surface continentales) sont également les outils utilisés pour la prévision saisonnière (e.g. Stockdale et al., 1998). En effet, à ces échelles de temps (3 à 12 mois) l'état de surface, notamment océanique, prédomine la prévisibilité. La représentation de la variabilité du phénomène d'oscillation El Niño (ENSO pour *El Niño Southern Oscillation*) est particulièrement attendue pour ces systèmes (Jin et al., 2008), tout comme une bonne représentation des mécanismes jouant sur la réponse globale à ce type de perturbations. Bien que la majorité de la prévisibilité provienne des zones tropicales, les téléconnexions sont également des éléments importants de la prévisibilité à échelle saisonnière. Les prévisions saisonnières utilisent assez largement des ensembles de prévision

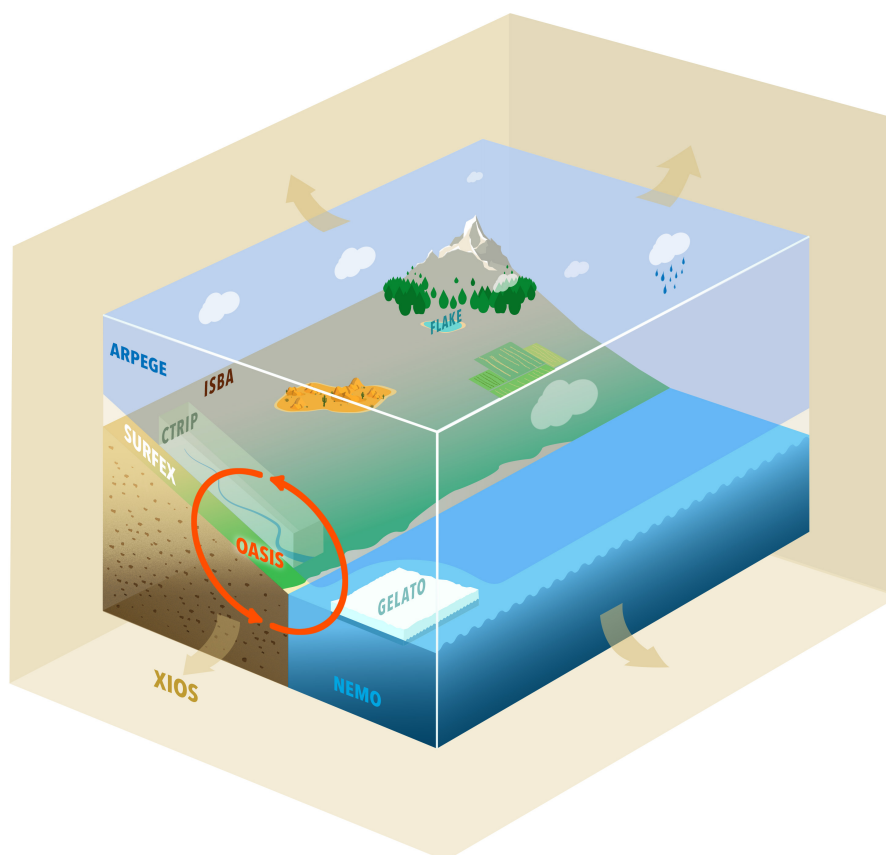


FIGURE 2.1 : Illustration des composantes du système couplé global de climat CNRM-CM6-1, extraite de Voldoire et al. (2019).

qui sont générés en perturbant les conditions initiales, plus rarement en utilisant des perturbations stochastiques de la physique des modèles (e.g. Luo et al., 2005; Vialard et al., 2005). La mise au point de conditions initiales cohérentes entre les différents compartiments reste l'un des enjeux actuels forts pour la prévision saisonnière (Balmaseda et Anderson, 2009). D'autres voies sont également suivies comme l'augmentation de résolution (en particulier pour l'océan), ou encore l'utilisation de *machine learning* pour la correction de biais ou la calibration des modèles de prévision saisonnière (e.g. Subramanian et al., 2019; Schepen et al., 2020).

A côté des modèles globaux, la modélisation régionale du climat qui permet d'atteindre des résolutions plus fines et de faire des focus sur les impacts locaux (Feser et al., 2011) a également progressé vers le couplage. 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). Plusieurs AORCMs ont également été développés pour étudier le climat présent en Méditerranée, sa variabilité et ses

tendances, motivés par les spécificités de la région avec de fortes interactions air-mer et un relief complexe (e.g. Somot et al., 2008; Artale et al., 2010; Dell'Aquila et al., 2012; Drobinski et al., 2012; Gualdi et al., 2013). Aujourd'hui, les AORCMs sont des modèles matures et des exercices d'inter-comparaison s'organisent, tels que les exercices CORDEX (Giorgi et al., 2009). L'exercice Med-CORDEX concernant la région méditerranéenne porte un intérêt particulier sur l'apport du couplage océan-atmosphère (Ruti et al., 2016). Cet exercice a permis de mettre à jour de nouveaux jeux de données à valeur de référence pour l'évaluation de modèle régionaux à haute-résolution et couplés tout en démontrant la valeur ajoutée de ces systèmes pour une meilleure compréhension et représentation des phénomènes physiques notamment dans l'océan, et pour prévoir l'évolution future du climat méditerranéen (Somot et al., 2018a). Les défis actuels de la modélisation climatique régionale couplée sont une augmentation de résolution dans les compartiments (en particulier dans l'atmosphère pour 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, ...), mais aussi de toujours mieux mettre en avant leurs qualités (ou défauts) par rapport aux AOGCMs et les inclure plus avant dans les démarches d'évaluation et d'inter-comparaison d'échelle internationale.

La mise au point des systèmes couplés océan-atmosphère à échelle fine (kilométrique) a débuté au même moment que les AORCMS (entre la fin des années 1990 et début des années 2000 : Hodur, 1997; Powers et Stoelinga, 2000; Estournel et al., 2003; Loglicsi et al., 2004), avec pour principales motivations l'étude des interactions air-mer associés à des événements intenses notamment pour les cyclones et tempêtes, ainsi que l'étude des effets très locaux notamment près des îles et en région côtière complexe. L'apparition des systèmes incluant les trois compartiments océan, atmosphère, vagues date de 2010 (voir Warner et al., 2010, pour le système COAWST *Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport*). Leur développement a pu notamment s'accélérer grâce aux différentes avancées technologiques ainsi que grâce à leur implication dans différentes campagnes de mesure et des exercices de modélisation (Pullen et al., 2017b).

Enfin, des systèmes couplés ont aussi été développés, typiquement pour répondre à des objectifs opérationnels pour la prévision [*prévision numérique du temps* (PNT) ou *océanographie opérationnelle* (OO)] à court (1 à 7 jours) ou moyen (10 à 21 jours) terme. Le tableau 2.1 liste les systèmes couplés globaux actuellement mis en œuvre par des centres de prévision du temps (c.f. Harris, 2018). *Environnement et Changement Climatique Canada* (ECCC) a développé et mis en opération en 2017 un modèle couplé océan-glace-atmosphère (GIOPS, pour *Global Ice Ocean Prediction System*). Les résultats de ce système présentés par Smith et al. (2018) montrent que l'impact le plus significatif est obtenu sur la prévision des cyclones tropicaux avec une intensification réduite conduisant à une diminution du taux



Centre	Modèle atmosphérique (résolution)	Modèle océanique (résolution)	Modèle de vagues (résolution)	Coupleur	Assimilation	Notes
NRL (USA)	NAVGEN (19km)	HYCOM (1/25°)	WAM (1/8°)	ESMF/ NUOPC	non couplée	Burnett et al. (2014)
MetOffice (UK)	UM (40km)	NEMO-CICE (1/4°)	-	OASIS3	non couplée (développement de l'assimilation couplée faible par Lea et al., 2015)	'GLO-CPL' sur CMEMS
ECMWF (EU)	IFS (9km)	NEMO (1/4°)	WAM (1/8°)	même exécutable	OA non couplée (développement de l'assimilation couplée faible par Browne et al., 2019), AW couplée faible	couplage limité aux tropiques (20°S-20°N) jusqu'à échéance +120h (c.f. Fig. 4 de Browne et al., 2019), Mogensen et al. (2017)
ECCC (CAN)	GEM (25km)	NEMO-CICE (1/4°)	-	GOSSIP	non couplée (développement de l'assimilation couplée faible par Skachko et al., 2019)	GIOPS, Smith et al. (2018)

TABLEAU 2.1 : Systèmes couplés océan(-glace de mer)-atmosphère(-vagues) globaux mis en opération par des centres de prévision pour la moyenne échéance (~2 semaines) et détails.

de fausses alarmes. De plus, dans cette étude, le couplage montre un impact positif et significatif sur la prévision entre 1 et 7 jours, par une réduction de la croissance d'erreur de 5% en juillet-août dans la zone extra-tropicale de l'hémisphère Nord et de 15% dans les tropiques en janvier-février. Au Centre Européen (ECMWF, pour *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), le couplage atmosphère (IFS, pour *Integrated Forecast System*) – vagues (WAM, pour *WAve prediction Model*) global depuis longtemps mis en œuvre, a été complété par l'insertion du modèle océanique NEMO (*Nucleus for European Modelling of the Ocean*) en 2018. L'insertion du compartiment océanique a en particulier été motivée par les résultats de Mogensen et al. (2017) montrant l'impact significatif de la stratification océanique sur la prévision de cyclones tropicaux. Les travaux actuels sur ces systèmes de prévision portent sur l'initialisation, afin de réduire le choc initial induit par les déséquilibres entre les compartiments dus à des schémas d'assimilation séparés (ou non couplés, Tab. 2.1). Pour cela, plusieurs centres de prévision testent actuellement des systèmes d'assimilation couplée (Lea et al., 2015; Browne et al., 2019; Skachko et al., 2019, , voir également section 2.2.3.3). Des modèles régionaux couplés sont également appliqués en opérationnel. C'est le cas notamment de COAMPS® (*Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System*) de la NRL

(*Navy Research Laboratory*) ou de la version régionale (ou LAM pour *Limited Area Model*) du système couplé de prévision GIOPS d'EEEC sur le golfe du Saint-Laurent (Pellerin et al., 2004) et la région des Grands Lacs. Le service météorologique national du Royaume-Uni (UK MetOffice), en collaboration avec les agences en charge de prévision environnementale et d'autres services météorologiques, développe et mature pour l'opérationnel un système couplé régional kilométrique (UKC4, Lewis et al., 2019c; Gentile et al., 2021).

La section suivante présente de manière non-exhaustive des résultats scientifiques récents de couplages océan-atmosphère-vagues à méso-échelle, ainsi que certaines questions techniques relatives à la mise en place de tels systèmes de modélisation.

## 2.2 Couplage océan-atmosphère-vagues à haute-résolution

### 2.2.1 Couplage et événements météorologiques intenses

#### 2.2.1.1 Cyclones tropicaux

Les cyclones tropicaux sont les systèmes météorologiques pour lesquels les interactions océan-atmosphère ont été les plus étudiées. En effet, les cyclones constituent une puissante machine thermodynamique qui extrait une très grande quantité d'énergie depuis la couche de mélange océanique (CMO). Bender et Ginis (2000) montrent que le refroidissement de surface induit a en retour un impact significatif sur l'intensité du cyclone, en particulier pour les systèmes se déplaçant lentement et dans le cas de cyclones rapprochés et sur des trajectoires similaires. De fait, des améliorations significatives sont généralement obtenues en utilisant un couplage océan-atmosphère-vagues (e.g. Bender et al., 2007; Doyle et al., 2014).

Parmi la littérature très riche concernant les études numériques couplées des cyclones tropicaux, Bao et al. (2000) montrent que le degré de refroidissement dépend fortement de la profondeur initiale de la CMO et que les tourbillons océaniques affectent le timing, le taux d'intensification et la durée d'un cyclone. Par ailleurs, la prise en compte de l'évaporation des embruns modifie sensiblement l'intensité du cyclone simulé. La sensibilité à une longueur de rugosité dépendant de l'âge des vagues apparaît moins importante. L'utilisation d'un système couplé sur le cyclone Katrina par Chen et al. (2010) a montré que le mélange turbulent induit par le vent, l'advection verticale et l'advection horizontale sont les 3 causes principales du refroidissement de la CMO. Cela réduit les flux de chaleur et d'humidité mais aussi augmente l'asymétrie de la structure thermodynamique et dynamique du cyclone, de part une augmentation de la convergence dans les cadrants nord-est et nord-ouest et une diminution de la convection dans le quadrant sud-ouest. Ces changements conduisent à un élargissement de l'œil, à une réduction de la force du vent et à un assèchement plus prononcé sur la zone interne

ouest. Par un bilan de chaleur, Zambon et al. (2014) confirment l'importance de l'advection [de l'advection et de la diffusion] pour bien représenter la réponse océanique des couches profondes [sur les plateaux de zone côtière] qui ne peut donc être reproduite correctement par un couplage 1D (e.g. Yablonski et Ginis, 2009).

Il est également important de bien représenter l'état de mer pour la prévision des cyclones tropicaux puisqu'il joue un rôle à la fois sur la vitesse du vent, les échanges air-mer et le mélange/les courants océaniques (e.g. Chen et al., 2007; Liu et al., 2012). Le couplage entre un modèle atmosphérique et un modèle de vagues conduit à une meilleure représentation du stress du vent qui est augmenté dû à la présence de vagues jeunes amplifiant largement la longueur de rugosité, mais modifie peu l'intensité du cyclone, sa trajectoire ou la structure de la couche limite atmosphérique marine (CLAM) (Doyle, 2002). Les simulations réalisées par Olabarrieta et al. (2012) sur les cyclones Ida et Nor'Ida montrent qu'inclure les effets de la rugosité dans le modèle atmosphérique améliore la prévision de l'intensité du vent (Fig. 2.2), ainsi que de vagues, des courants et de la surcote. En fait, la rugosité liée à l'état de mer conduit à deux effets opposés. Le premier est un transfert de quantité de mouvement de l'atmosphère vers l'océan qui en cas de vagues énergétiques réduit la force du vent et modifie l'asymétrie du cyclone. Le second effet est une augmentation des flux de chaleur et d'humidité. Dans cette étude néanmoins, si les modèles atmosphérique et océanique partagent le même flux de quantité de mouvement, le modèle de vague lui utilise sa propre paramétrisation pour le calcul du stress ce qui conduit à des incohérences.

L'assimilation de données, la prévision d'ensemble, et la possibilité de *downscaling* pourraient amener à revisiter les performances des systèmes couplés dans de futures études, et les modifications de l'environnement induites par l'utilisation de formulations améliorées du coefficient de friction, de la chaleur dissipative et des embruns doivent plus particulièrement être considérées (Zambon et al., 2014). Pianezze et al. (2018) montrent notamment que le couplage interactif entre un modèle atmosphérique et de vagues est nécessaire pour simuler les émissions de sels marins de manière cohérente avec les structures de vent et de vagues qui les génèrent. Or, les sels marins participent à la redistribution de la quantité de mouvement dans la CLAM, diminuent le vent près de la surface, libèrent de la vapeur d'eau par évaporation, perdent de la chaleur sensible au profit de l'atmosphère et finalement peuvent influencer la structure et l'intensité du cyclone tropical via la formation/durée de vie nuageuse et les précipitations.

### **2.2.1.2 Tempêtes et vent fort**

Les tempêtes des moyennes et hautes latitudes représentent les événements où les échanges à l'interface air-mer sont particulièrement intenses du fait notamment de l'intensité des vents en surface et de gradients très marqués entre la CLAM et la CMO. Plusieurs études ont mis

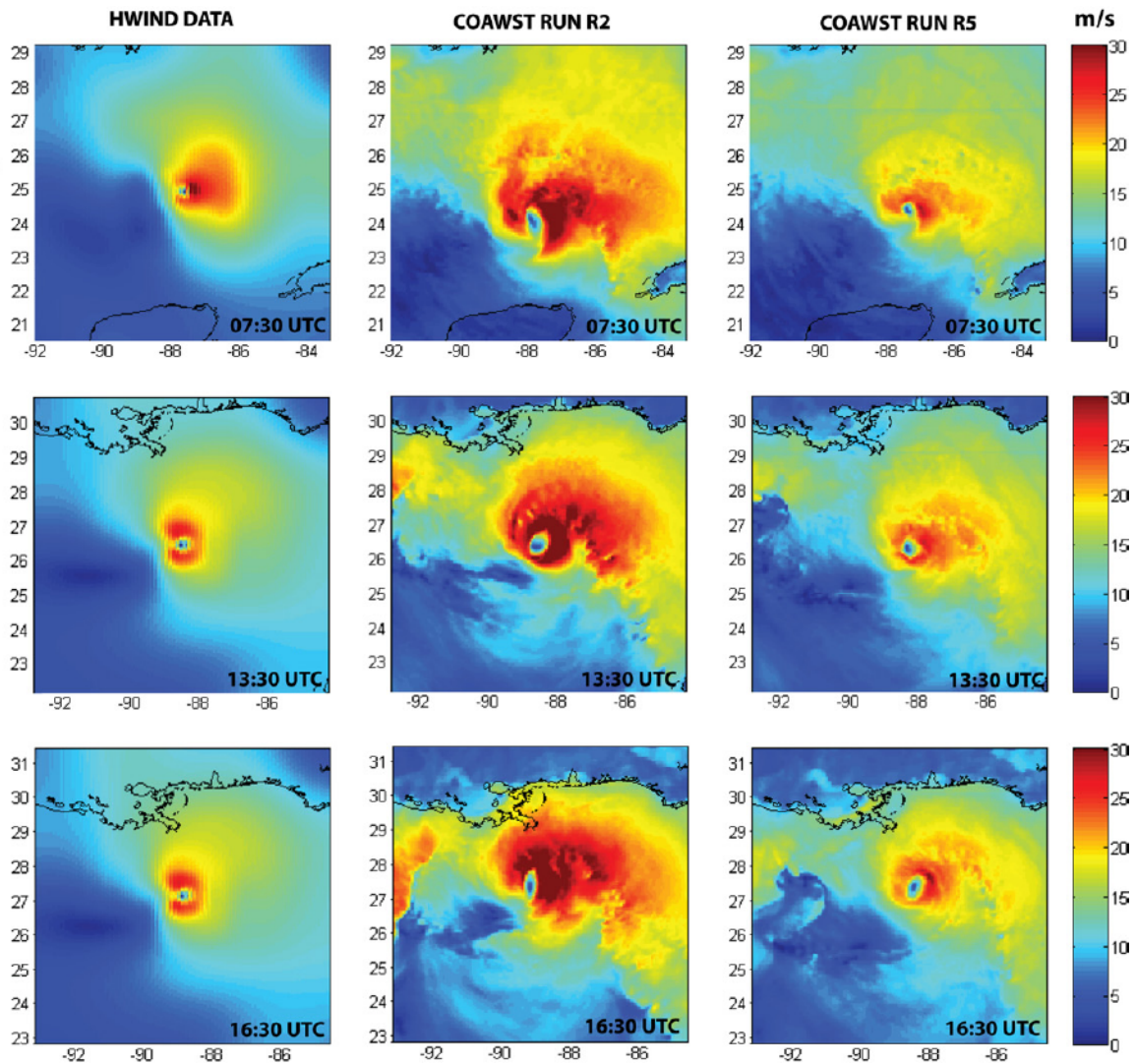


FIGURE 2.2 : Comparaison de l'intensité des vents de surface (m/s) simulés par le système COAWST à l'analyse Hwind (à gauche) pendant le cyclone Ida (9 novembre 2009), d'après Olabarrieta et al. (2012). La simulation R2 (au centre) est la simulation couplée océan-atmosphère (ROMS-WRF) avec une fermeture en Charnock (1955) pour les flux turbulents calculés dans WRF. La simulation R5 (à droite) est la simulation couplée océan-atmosphère-vagues (ROMS-WRF-SWAN) avec une prise en compte de l'âge des vagues et de leurs pentes selon Oost et al. (2002) dans les flux turbulents calculés dans WRF.

en évidence le rôle important de la structure spatiale du champ de température de surface de la mer (SST pour *Sea Surface Temperature*) sur la localisation des rails des dépressions de moyennes latitudes (Wilson et al., 2009; Brayshaw et al., 2011; Nakamura et al., 2013), là où de forts gradients de SST (jusqu'à 4°C en 100 km) sont notamment associés aux grands courants de bord Ouest (*Gulf Stream*, *Kuroshio* et courant des Aiguilles), au courant *Circumpolaire Antarctique*, ou peuvent correspondre à des *upwelling* côtiers. Les bassins océaniques fermés ou quasi fermés du fait de leur topographie (gradient océan/continent) et les zones côtières sont particulièrement propices à l'apparition de structures et anomalies fines en surface,

pouvant entrer en interactions avec les systèmes atmosphériques.

L'analyse de Small et al. (2008) présente en détail les mécanismes de la réponse atmosphérique au gradient de SST qui impliquent des différences de stabilité de la CLAM avec des variations du transfert de quantité de mouvement, ainsi que des anomalies de pression hydrostatique induites par différents contenus thermique et humide de la CLAM au passage du front et la formation de circulation secondaire. Cela crée des anomalies du rotationnel du stress du vent (parallèlement au vent) et de sa divergence (perpendiculairement au vent). La réponse atmosphérique n'est pas limitée à la couche limite. Des effets sur les précipitations et sur les anomalies de divergence troposphérique sont visibles en réponse à la présence d'un front de SST (Minobe et al., 2008). Les tourbillons sont également une source de variabilité à plus petite échelle qui influencent le rail des dépressions en raison d'un plus fort chauffage diabatique au sein des tempêtes, augmentent l'advection de vapeur d'eau, la baroclinicité et déplacent le jet et le rail vers les pôles (Foussard et al., 2019). Les anomalies du pompage d'Ekman induites conduisent par ailleurs à des changements des courants et de circulation océaniques, ce qui influence les trajectoires de tourbillons et modifie l'effet de freinage (par les courants) et donc la dissipation des tourbillons (Small et al., 2008).

Les dépressions des hautes-latitudes sont fréquentes, avec parfois un développement explosif dû au relâchement de chaleur latente par la convection (Rasmussen et Turner, 2003). Les interactions de ces systèmes avec l'océan sont assez méconnues (car peu échantillonnées par des observations in-situ) et difficiles à représenter dans les modèles du fait notamment de la présence de glace de mer (Gustafsson et al., 1998; Drusch, 2006; Valkonen et al., 2008; Smith et al., 2013). Avec un couplage océan-atmosphère (COAWST : WRF et ROMS à 10 et 12 km de résolution), Adakudlu et Sobolowski (2014) montrent une diminution de l'intensité d'un *polar low* arctique (-5 hPa) en couplé dû au refroidissement de surface (-1 à -1.5°C). Des modifications de structures et de localisation sont également trouvées et le profil en humidité est légèrement amélioré en couplé. Cependant, les auteurs mettent en évidence des larges erreurs induites par leur utilisation de ROMS sans module de glace de mer. En utilisant le modèle CRCM (25 km de résolution) en zone Arctique couplé au modèle océanique POM et à un modèle de glace de mer (CIOM) sur un cas de tempête, Long et Perrie (2012) montrent d'un côté une réponse océanique importante par effet de fonte à la frontière de la banquise et d'un autre côté sur la zone libre de glace avec un mélange produisant un refroidissement jusqu'à -2°C en 48h. Le vent de surface associé à la tempête est fortement augmenté (+4 m/s) en présence d'eau libre (par rapport à la banquise) en raison de l'augmentation du flux de quantité de mouvement et de l'instabilité (la température de l'air est augmentée jusqu'à +8°C). Néanmoins, dans cette étude, le couplage ne semble pas avoir d'effet significatif sur la formation de la tempête en elle-même.

Aux moyennes latitudes, l'étude de l'impact du couplage océan-atmosphère sur sept cas de tempêtes au Nord-Est des États-Unis (ou *nor'eastern*) par Nicholls et Decker (2015)

montre que le couplage permet de reproduire le refroidissement de surface, plus important pendant le début de saison hivernale, mais ne change pas significativement la trajectoire de la tempête, le vent maximum ou la pression au niveau de la mer minimale. Une faible sensibilité des précipitations est également obtenue. La comparaison entre un couplage 3D (avec ROMS) et 1D a également été faite dans cette étude et démontre que le couplage 3D tend à produire des simulations plus réalistes en général et que son impact peut être plus prononcé pour des simulations plus longues (que 72-180h). Concernant l'effet des vagues, Du et al. (2015), par exemple, ont examiné la sensibilité à la résolution et le rôle de la rugosité dans un système couplé atmosphère-vagues (WRF + SWAN) dans un contexte de production par éolienne offshore et sur différents cas de tempête en mer du Nord. Les résultats montrent une amélioration avec une résolution plus fine mais également en utilisant des conditions aux limites à plus haute-résolution. Dans cette étude, l'utilisation de la rugosité à partir de la formulation de Janssen (1991) donne les meilleurs résultats pour la simulation de la hauteur significative. L'étude de Pineau-Guillou et al. (2018) qui utilise le système couplé atmosphère-vagues (IFS-ECWAM) du CEPMMT a permis de montrer qu'il existe de forts biais sur la prévision des vents les plus forts ( $>18$  m/s) rencontrés pendant les tempêtes de l'Atlantique Nord-Est et également qu'il est difficile d'obtenir une valeur de référence observée pour les régimes de vent fort en raison des grandes différences entre les plateformes d'observations. D'autre part, cette étude a montré que les paramétrisations fonction de l'âge des vagues produisent des coefficients de friction irréalistes du fait de leur extrapolation dans les régimes de vent fort. Un ajustement sur le coefficient de Charnock permet de réduire la sous-estimation des vents forts. Néanmoins, ces méthodes reposent sur la représentation de la longueur de rugosité qui est difficile à interpréter et à observer, et apparaissent finalement comme peu pertinentes pour le couplage. Enfin, il est à noter que l'utilisation du ratio  $\tau_w/\tau$  dans Janssen (1991) (et ses dérivées) conduit à une forte sensibilité aux hautes fréquences du spectre de vagues qui sont souvent mal représentées par les modèles de vagues.

Pour les tempêtes affectant la région méditerranéenne, l'étude de Renault et al. (2012a) montre que de meilleurs résultats (en particulier sur le vent, Fig. 2.3) sont obtenus avec le système couplé océan-atmosphère-vagues 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 de 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. L'étude de Varlas et al. (2018) montre sur un cas de tempête en Méditerranée centrale (4-8 mars 2015) que le couplage de WRF (10 km de résolution) avec un modèle de vagues (WAM,  $0.1^\circ$  de résolution) conduit à la diminution du vent de 12% en raison d'une plus grande rugosité en surface dans les zones de formation

de vagues (jeunes en croissance). Cela conduit à des différences de flux de quantité de mouvement, d'entropie et d'humidité et change les caractéristiques de la CLAM, ainsi que les structures dynamique et thermodynamique de la basse et moyenne troposphère et finalement cela conduit à un affaiblissement de la dépression (+2 hPa de la pression minimale). Des effets non-linéaires sont également visibles sur les processus humides. Rizza et al. (2018) ont analysé les effets de l'état de mer sur la rugosité et la formation d'embruns sur un cas de *medicane* (25 septembre 2006). Les résultats obtenus montrent que considérer ces deux effets par un couplage atmosphère-vagues-aérosols permet de mieux reproduire le *medicane* en terme de trajectoire, vitesse de vent maximale et pression centrale minimale. Les flux de chaleur et d'humidité apparaissent également plus pertinents grâce au couplage.

La mer Méditerranée est également fréquemment soumise à des épisodes de vents régionaux forts générés par la canalisation et l'accélération des vents dans les vallées et/ou dus à la formation de cyclones intenses, qui transportent de l'air continental (froid et sec) au-dessus de la mer, produisant des flux turbulents de chaleur importants. Les études de modélisation couplée à haute-résolution en cas de Bora en mer Adriatique montrent que le couplage océan-atmosphère interactif améliore la prévision du vent et des flux à la surface marine (qui sont sur-estimés en mode forcé) (Pullen et al., 2006, 2007). Le couplage atmosphère-vagues mis

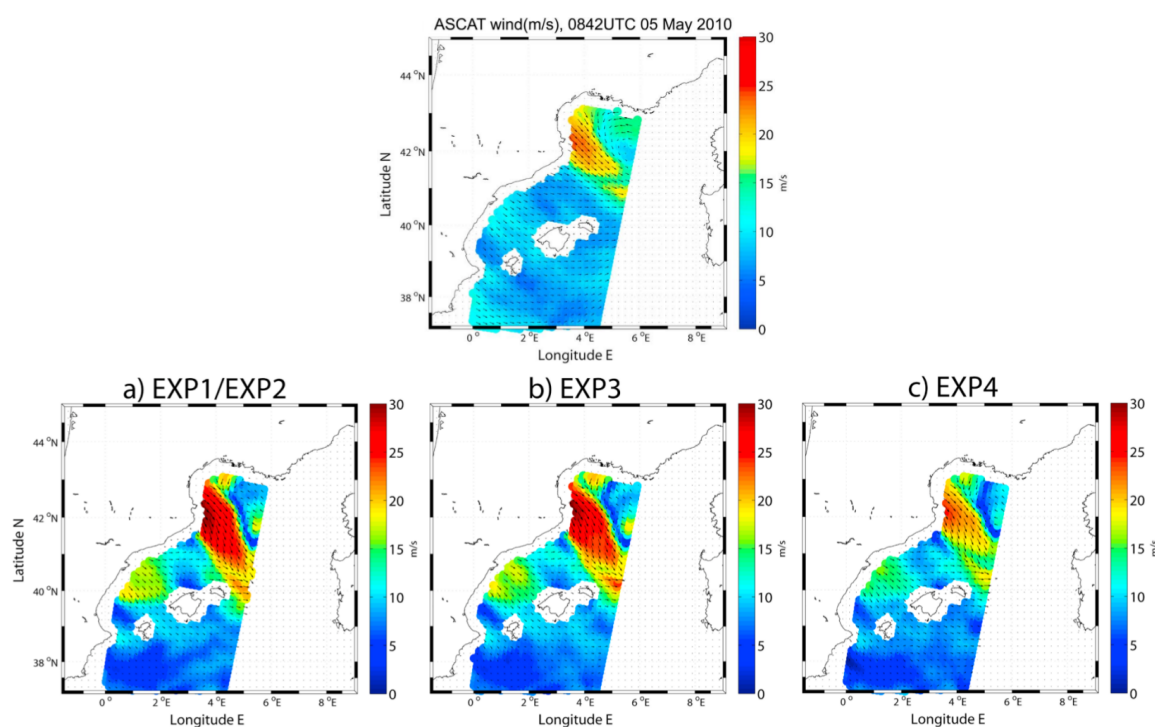


FIGURE 2.3 : Vents de surface (m/s) observés par ASCAT (en haut) sur un cas de cyclogénèse en mer des Baléares (4 Mai 2010) et simulés par le système COAWST (en bas) : EXP1[EXP2] correspond à une simulation atmosphérique WRF forcé par la SST de GFS; EXP3 est la simulation couplée océan-atmosphère (WRF-ROMS); EXP4 est la simulation couplée océan-atmosphère-vagues (WRF-ROMS-SWAN). Figures extraites de Renault et al. (2012a).

en œuvre par Doyle (2002) montre quant à lui un impact limité sur la prévision atmosphérique à courte-échelle en vent et température mais est capable de bien reproduire l'amplification de la rugosité de surface dû au fetch à la sortie des vallées. 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 que peu d'effets sur la prévision du vent à 10m et de la température à 2m, vu aussi la petite taille de la mer Adriatique et la rapidité du flux de Bora. En Méditerranée occidentale, Lebeau-pin Brossier et Drobinski (2009) dans des simulations WRF à 7km de résolution couplé à un océan 0D (*slab model*) montrent sur deux cas de Mistral que l'évolution océanique dépend fortement de l'intensité et de la durée de l'épisode de vent fort. Ces simulations montrent également que dans ces situations les échanges de chaleur contraignent fortement l'évolution océanique par rapport à l'effet des échanges de quantité de mouvement. De manière similaire aux résultats obtenus sur des situations de Bora (Pullen et al., 2006, 2007), la dynamique atmosphérique est finalement peu influencée par le couplage. Small et al. (2011, 2012) montrent que le système couplé océan-atmosphère COAMPS + NCOM permet sur un mois de simulation en été de réduire les biais sur le flux de chaleur latente et la SST par rapport aux observations in-situ en zone côtière (mer Ligure). Small et al. (2012) montrent plus particulièrement que au-delà du fort refroidissement de surface, les effets du Mistral se propage dans l'océan en subsurface via le mélange et le cisaillement mais aussi via la formation d'ondes internes de gravité. Le couplage diminue la convection atmosphérique et l'épaisseur de la CLAM. Les différences au-dessus de la CLAM et sur la dynamique de la dépression sont mineures suggérant plutôt des effets sur la vorticit   potentielle (plutôt que des effets d'Ekman).

### 2.2.1.3 Évènements fortement précipitants

*Certains travaux brièvement décrits ici seront détaillés dans le chapitre 3.*

Les évènements fortement précipitants qui affectent fréquemment le pourtour méditerranéen sont favorisés par un rapide flux marin instable et humide en basses couches. La mer Méditerranée est donc une source importante de chaleur et d'humidité pour ces systèmes. Pour la prévision haute-résolution de ces évènements intenses, le couplage océan-atmosphère(-vagues) permet de prendre en compte de manière plus réaliste l'environnement à méso-échelle en mer, où les observations sont généralement peu nombreuses.

L'impact du couplage océan-atmosphère sur ces évènements fortement précipitants a tout d'abord été examiné par Lebeau-pin Brossier et al. (2009) à l'aide du modèle MESO-NH couplé à modèle océanique 1D en énergie cinétique turbulente. L'effet modérateur du couplage sur les réponses des deux couches limites a été mis en évidence par comparaison au mode forcé ; le refroidissement (et approfondissement) de la CMO sous le jet de basses couches diminuant significativement les échanges air-mer. Les modifications obtenues avec le couplage



océan-atmosphère interactif sont apparues moins importantes que lors d'un changement de la paramétrisation des flux air-mer ou de la SST initiale. Cependant, cette étude ne considérait que de très courtes échéances (18 à 24h) et des petits domaines maritimes.

Rainaud et al. (2017) présente le système couplé AROME-NEMO sur la Méditerranée occidentale et son évaluation pour deux cas fortement précipitants (IOP13 et IOP16a) de la SOP1 du programme HyMeX. Pour chaque cas, l'expérience couplée a été comparée à deux simulations AROME (atmosphère seule, sans évolution de SST) : l'une forcée par l'analyse de SST, l'autre utilisant la SST de l'expérience couplée. Ceci permet de distinguer l'effet du champ initial de SST de l'effet d'un océan 3D interactif. Les résultats confirment que la SST initiale modifie la prévision du système précipitant en terme d'intensité et de localisation. L'océan 3D interactif contribue quant à lui significativement à la diminution de l'évaporation, donc à l'apport d'humidité pour le système précipitant.

L'étude de Meroni et al. (2018b) examine l'impact du profil vertical océanique de température sur un cas fortement précipitant ayant affecté la région de Gènes (Ligure, IT) en octobre 2014. L'utilisation du système couplé WRF + CROCO avec différentes conditions océaniques initiales, réalistes et idéalisées, a montré que plus la CMO est fine, plus le refroidissement par entraînement est important et plus l'effet du couplage sur l'atmosphère et en particulier sur le système précipitant est marqué (Fig. 2.4. La stratification est également un élément important qui contraint le refroidissement. Il existe donc un seuil sur l'épaisseur de la CMO, seuil qui lui-même dépend de la stratification locale et de l'intensité du vent, qui contraint fortement le système et qui ne peut être pris en compte que par le couplage.

Concernant l'impact des vagues, les études de Bouin et al. (2017) et Sauvage et al. (2020) montrent l'importance de leur prise en compte direct dans le calcul des flux turbulents de surface. Les modifications conduisent principalement à des différences significatives sur le vent de basses couches et sur la localisation de la convergence. Pour l'étude de la POI8 (Bouin et al., 2017), la prise en compte de l'état de mer modifie la formation d'une dépression secondaire à méso-échelle et la formation de *cold pools* sous le système convectif qui sont des ingrédients majeurs dans la formation et dynamique du système fortement précipitant. Les flux de chaleur sensible et latent sont eux, pas ou peu modifiés. Sauvage et al. (2020) confirment les faibles modifications des flux de chaleur par la prise en compte des vagues dans un cas fortement précipitant d'octobre 2016, et ce malgré des conditions plus favorables (mer jeune développée et vent fort, froid et sec en basses couches) et aussi la forte sensibilité de la convergence.

L'utilisation d'un couplage océan-atmosphère-vagues à fine-échelle par Sauvage (2019) a permis de quantifier les apports des différents couplages sur ce même épisode, en confirmant l'importance du couplage avec les vagues sur la dynamique des basses couches atmosphériques. Le couplage avec un océan interactif joue lui un rôle important sur les échanges de chaleur venant modifier l'alimentation des systèmes convectifs fortement précipitants avec

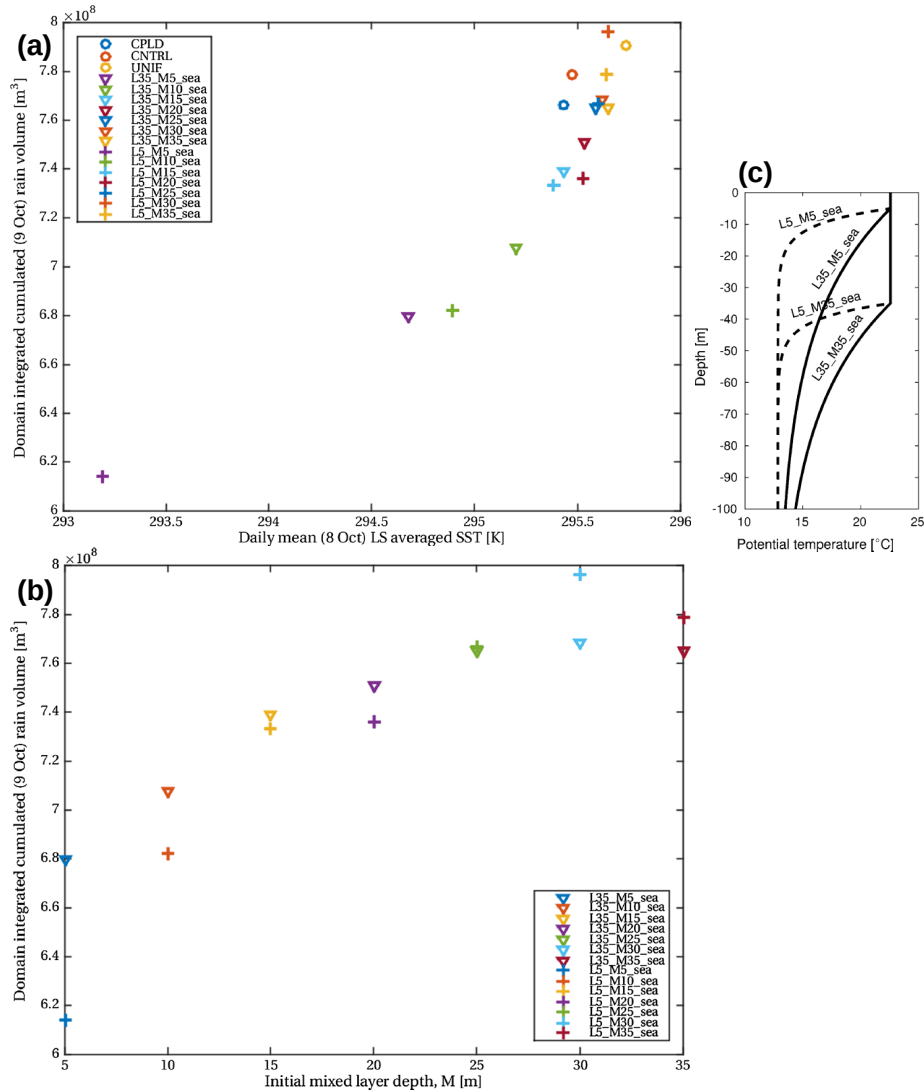


FIGURE 2.4 : Cumuls de précipitation moyennés sur le domaine de simulation (a) en fonction de la SST moyenne en mer Ligure après 48-72h de simulation et (b) en fonction de la profondeur de couche de mélange initiale ( $M$  dans la figure c); (c) Profil océanique initial de température idéalisé :  $M$  est l'épaisseur de la couche de mélange et  $L$  traduit la courbure de la thermocline. Dans (a), UNIF et CNTRL sont les simulations atmosphériques non couplées avec des champs initiaux de SST uniforme et analysé, respectivement, et constants au cours du temps; CPLD est la simulation couplée avec un océan réaliste (modèle ROMS). Figures extraites de Meroni et al. (2018b).

notamment un renforcement de la ligne de convergence en mer et la mise en place d'un système mieux organisé.

## 2.2.2 Autres études sur le couplage à haute-résolution

Le couplage a également été examiné dans le cadre d'autres conditions météorologiques de vent faible à modéré, pour des situations de brise, mais aussi plus largement pour l'étude et la prévision océanographique. En effet, les systèmes couplés apparaissent de plus en plus

comme des outils pouvant permettre d'améliorer la prévision marine aux courtes échelles de temps, en particulier en milieu côtier où les contrastes continent-océan pilotent la circulation atmosphérique à méso-échelle, la formation de brouillard, les upwellings et le mélange lié à la marée (Edson et al., 2007).

L'étude de Perlin et al. (2007) sur un cas d'upwelling côtier sur les côtes de l'Oregon, montre que les interactions entre la CLAM et l'eau froide remontée par l'upwelling conduit à la formation d'une couche limite interne dans les 100 premiers mètres d'altitude et à une réduction de moitié du stress en couplé. La comparaison des simulations "océan forcé" et en mode couplé montre aussi des modifications spatiales de l'upwelling liées à une redistribution de la divergence du transport d'Ekman. Edson et al. (2007) présente la campagne CBLAST-LOW qui portait sur l'étude des couplages océan-atmosphère-vagues dans les conditions de vent très faible à nul, conditions pour lesquelles les termes de flottabilité dominant dans les 2 milieux et où le déferlement et les circulations de Langmuir jouent un rôle significatif. Les différentes études conduites dans le cadre de CBLAST-LOW ont notamment permis de mettre en évidence 1) le rôle important des vagues et plus particulièrement de la houle (pouvant être formée à distance par une tempête) sur les échanges air-mer et les processus couplés des couches limites, même dans ces conditions de vent faible et 2) les modifications de la structure verticale des couches limites dues à la variabilité fine-échelle de la SST.

Chen et al. (2010) ont réalisé une expérience couplée dans un cas de sillage des Channel Islands (Californie) qui montre que le couplage interactif conduit à de nombreuses variations à fine-échelle du vent, du courant et de la stabilité statique. Ces variations prennent la forme de fines anomalies de vorticités et de température dans l'océan et l'atmosphère, dans la zone sous-le-vent. Sur la région de Madère, les simulations couplées à 2km de résolution de Pullen et al. (2017a) mettent en évidence le réchauffement diurne de l'océan superficiel (jusqu'à +2°C sur 20m d'épaisseur par rapport aux eaux environnantes) pour les zones abritées favorisées par le ciel clair, ce qui module en retour l'épaisseur et la stabilité de la CLAM sur plusieurs jours.

Comme mentionné en section 2.1, le UK MetOffice a développé un système de prévision à très fine résolution et couplé océan-atmosphère-vagues-hydrologie (Lewis et al., 2018, 2019c). L'impact le plus important du couplage est une meilleure représentation de la CMO et en particulier de la SST par le modèle d'océan (Lewis et al., 2019c) due très largement à l'insertion des interactions vagues-océan qui amplifie le mélange (Lewis et al., 2019b), et à un meilleur forçage atmosphérique en couplé (par comparaison au modèle océanique forcé par des champs atmosphériques de grande échelle Lewis et al., 2019a). Avec ce système (UKC3) sur un cas d'étude de nuages bas marins et côtiers autour des îles britanniques, Fallmann et al. (2019) démontre l'impact positif de cette évolution de SST à fine échelle pour la prévision du temps et sur plusieurs réseaux de prévisions successifs.

En Méditerranée, des simulations couplées océan-atmosphère ont également été réalisées

pour évaluer l'impact du couplage sur la dynamique océanique, notamment sur la formation d'eaux denses comme dans Carniel et al. (2016) en Adriatique pendant l'hiver 2012 (voir aussi Ricchi et al., 2016), ou Lebeaupin Brossier et al. (2017) et Seyfried et al. (2017) dans le cadre des SOPs du programme HyMeX (2012-2013), ainsi que sur la dynamique du front Nord-Baléares (Seyfried et al., 2019).

## 2.2.3 Architecture de couplage des systèmes à méso-échelle

### 2.2.3.1 Description des échanges et couplages

L'objectif de cette partie est de décrire les principes généraux régissant les différents échanges entre les compartiments de systèmes couplés océan-atmosphère-vagues (Fig. 2.5).

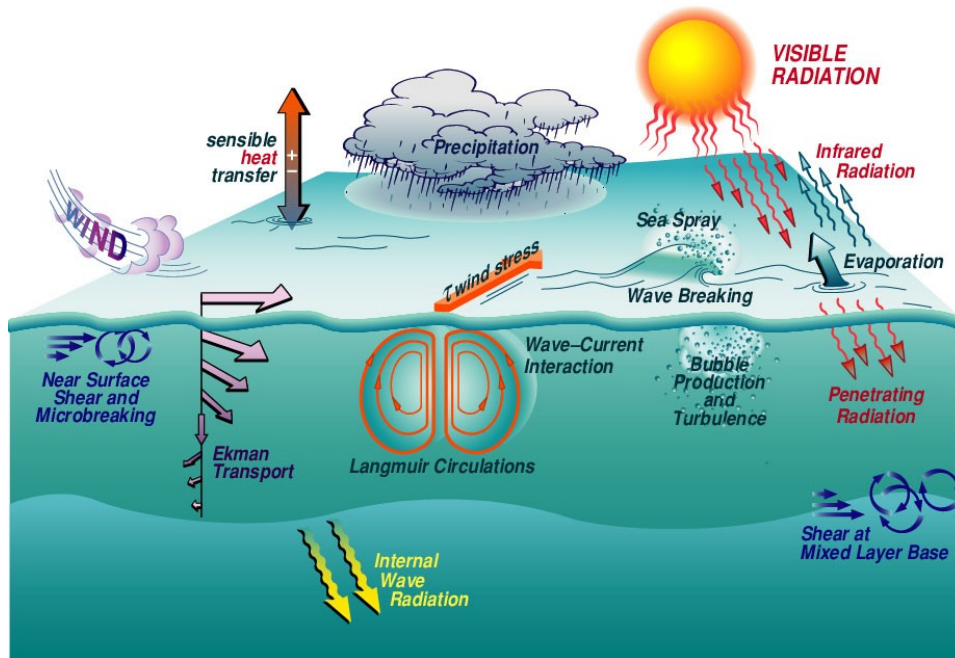


FIGURE 2.5 : Principaux processus affectant les échanges à l'interface air-mer et entre les couches limites océanique et atmosphérique. Schéma extrait de Edson et al. (2007).

**Océan-Atmosphère** : Les échanges océan-atmosphère sont représentés sous la forme du flux de quantité de mouvement ( $\tau$ ) et des flux nets de chaleur ( $Q_{sol} + LW + H + L \times E$ ) et d'eau ( $E - P$ ).  $P$  représente les précipitations (solides et liquides) résolues par le modèle atmosphérique.  $Q_{sol}$ ,  $LW$  sont calculés par un schéma radiatif alors que  $H$ ,  $L \times E$  et  $\tau$  sont calculés par une paramétrisation des flux turbulents. Dans la plupart des cas, ces flux sont calculés dans le modèle atmosphérique et sont envoyés au modèle océanique, qui lui envoie la SST au modèle atmosphérique. Les courants océaniques de surface peuvent également être envoyés par le modèle océanique pour être pris en compte dans le calcul du stress (e.g. Rainaud et al., 2017; Pianezze et al., 2018). Dans le cas d'un modèle de glace de mer, les

champs de couverture de glace et d'albédo sont également envoyés au modèle atmosphérique (e.g. Bruneau et Toumi, 2016; Voltaire et al., 2017). En dehors de ce schéma général, il existe certains systèmes pour lesquels le calcul des flux est réalisé dans le modèle océanique (e.g. Warner et al., 2010; Zambon et al., 2014; Ricchi et al., 2016) qui peut conduire à des incohérences (*i.e.* les flux air-mer vus par les deux compartiments ne sont pas égaux). Enfin, le calcul du stress peut être plutôt réalisé dans un modèle de vagues lorsqu'il est présent (voir ci-dessous).

**Atmosphère-Vagues** : Les vagues modifient la rugosité de surface, qui s'exprime par le coefficient de Charnock  $\alpha$  et la longueur de rugosité  $z_0$ , et par conséquent le coefficient de traînée  $C_D$  et le stress du vent  $\tau$ . Pour représenter cet effet dans le schéma de surface du modèle atmosphérique, deux approches sont possibles. La première consiste à utiliser directement le coefficient de Charnock calculé par le modèle de vagues qui est cependant très sensible à la partie haute-fréquence du spectre qui est paramétrée. Cette méthode est celle utilisée dans le couplage opérationnel IFS-WAM du CEPMMT (Janssen et al., 2001). La seconde approche consiste à utiliser les paramètres des vagues (notamment la hauteur significative  $H_s$ , la longueur d'onde de pic  $L_w$  et/ou la période pic  $T_p$ ) pour permettre le calcul de  $\alpha$  et de  $z_0$  (e.g. Renault et al., 2012a, et Fig. 2.6a). Les variables échangées peuvent ainsi être plus directement validées par comparaisons à des observations. En retour, et dans ces deux cas, le modèle de vagues nécessite de recevoir les deux composantes du vent près de la surface (généralement le vent à 10m).

Une autre possibilité consiste à réaliser le calcul du stress du vent dans le modèle de vagues (e.g. Chen et al., 2007; Chen et Curcic, 2016) pour être ensuite redistribué au modèle atmosphérique (et au modèle d'océan) (Fig. 2.6b).

**Océan-Vagues** : Comme décrit par exemple par Breivik et al. (2015), les principales interactions vagues  $\rightarrow$  océan peuvent se décrire en trois processus : (i) le stress en surface, (ii) le flux d'énergie cinétique turbulente lié au déferlement et (iii) la dérive de Stokes. Le premier processus peut être considéré comme la captation d'une partie du flux océan-atmosphère de quantité de mouvement en cas de croissance des vagues, jusqu'à un équilibre correspondant à une mer du vent pleinement développée (*i.e.* les vagues ne peuvent devenir plus hautes et le déferlement s'intensifie) où le flux de quantité de mouvement est "équitablement" distribué entre les vagues et l'océan. D'un autre côté, dans le cas d'un vent faiblissant, le champ de vagues (ou houle) devient une source de quantité de mouvement additionnel pour l'océan. Le deuxième terme peut être explicité comme une production d'énergie cinétique induite par les cellules de Langmuir et peut s'exprimer comme une modification du profil vertical de dissipation due au déferlement. Enfin, la dérive de Stokes (ou force de Stokes-Coriolis) correspond à un déplacement lagrangien des structures océaniques dans la direction du champ de vagues. L'impact des courants ( $u$ ) sur les vagues est décrit à différentes échelles par le papier de Ardhuin et al. (2017) qui considère quatre principaux mécanismes.

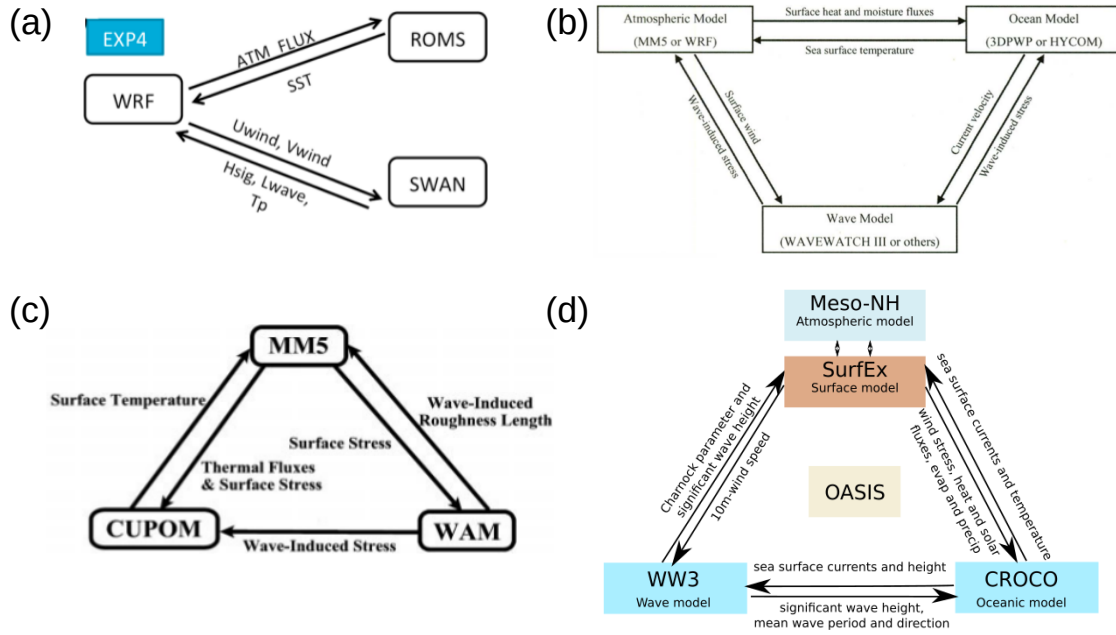


FIGURE 2.6 : Schéma des échanges (a) d’après Renault et al. (2012a) (COAWST sur la Méditerranée nord-occidentale); (b) d’après Chen et al. (2007) pour la campagne CBLAST-Hurricane, (c) d’après Bao et al. (2000) et (d) d’après Pianezze et al. (2018) (MSWC, cyclone Bejisa).

1. un terme de réfraction : le retournement des vagues peut produire de grandes variations de hauteur des vagues dans le cas d’ondes monochromatiques ;
2. une advection de l’action des vagues à la vitesse  $c_g + u$  ( $c_g$  est la vitesse de groupe) ;
3. une modification du nombre d’onde ou effet “concertina” liée à un changement de longueur d’onde dû à un échange d’énergie entre vagues et courants + un changement de la vitesse de groupe ;
4. un terme source sur le flux de quantité de mouvement lié aux différences relatives entre le vent et le courant de surface.

Ainsi le couplage océan-vagues porte sur un même milieu et n’est donc pas uniquement limité à un problème de flux à l’interface mais implique des contributions agissant sur les schémas physiques des compartiments. Récemment, Couvelard et al. (2020) ont développé un couplage entre NEMO et WaveWatchIII permettant d’ajouter dans le modèle NEMO les termes induits par les vagues et jouant sur l’équation de continuité et le schéma de turbulence 1D en TKE. Il résulte notamment de ce couplage appliqué en global (au  $1/4^\circ$ ) un mélange vertical océanique plus important modifiant significativement la température et les courants de surface, plus particulièrement en conditions hivernales.

**Océan-Atmosphère-Vagues :** Ainsi, le principal challenge d’un système tri-couplé océan-atmosphère-vagues consiste à considérer la cohérence et la distribution des différents termes contribuant au flux de quantité de mouvement à partir du (ou des) modèle(s) qui les cal-

cule(nt). Dans Bao et al. (2000) par exemple, le stress de surface est calculé dans le modèle atmosphérique puis envoyé aux modèles océaniques et de vagues, alors que le stress induit par les vagues est transféré du modèle de vagues au modèle océanique (Fig. 2.6c). Dans Pianezze et al. (2018) (Fig. 2.6d), le stress du vent est calculé dans le schéma de surface du modèle atmosphérique à partir des champs de vagues reçu et est transféré au modèle océanique. Les effets des vagues sur l'océan sont estimés dans le modèle océanique à partir des champs de vagues reçus. Concernant les flux de chaleur et d'eau, le tri-couplage peut aussi permettre de considérer la contribution des embruns (Fig. 2.5), à conditions d'être ensuite traités dans la paramétrisation des flux turbulents de surface.

### 2.2.3.2 Techniques numériques de couplage

Les systèmes couplés peuvent être construits selon différentes architectures numériques.

Bao et al. (2000) décrit par exemple un couplage séquentiel, dans lequel les modèles tournent séparément puis fournissent des informations sous la forme de champs interpolés. Le couplage séquentiel impose une exécution fractionnée des modèles qui apparaît peu pertinente pour des simulations longues et/ou dans un cadre opérationnel et peut finalement s'avérer coûteux en terme de gestion de fichiers.

Brassington et al. (2015) donne un aperçu de différents systèmes de prévision couplés à l'échelle globale ou régionale, actifs ou en développement. La plupart des systèmes présentés utilise un coupleur - les plus connus étant OASIS (Craig et al., 2017) et ESMF (Theurich et al., 2016) (Fig. 2.7) - qui permet la communication entre les différents modèles. Le grand

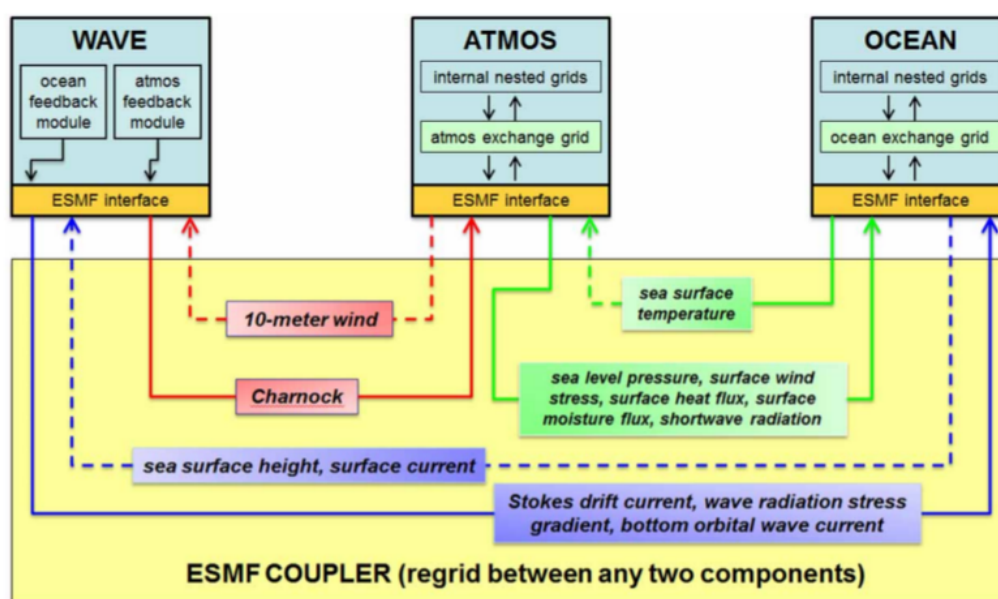


FIGURE 2.7 : Schéma d'utilisation du coupleur ESMF pour le système couplé océan-atmosphère-vagues COAMPS et variables échangées. Figure extraite de Brassington et al. (2015).

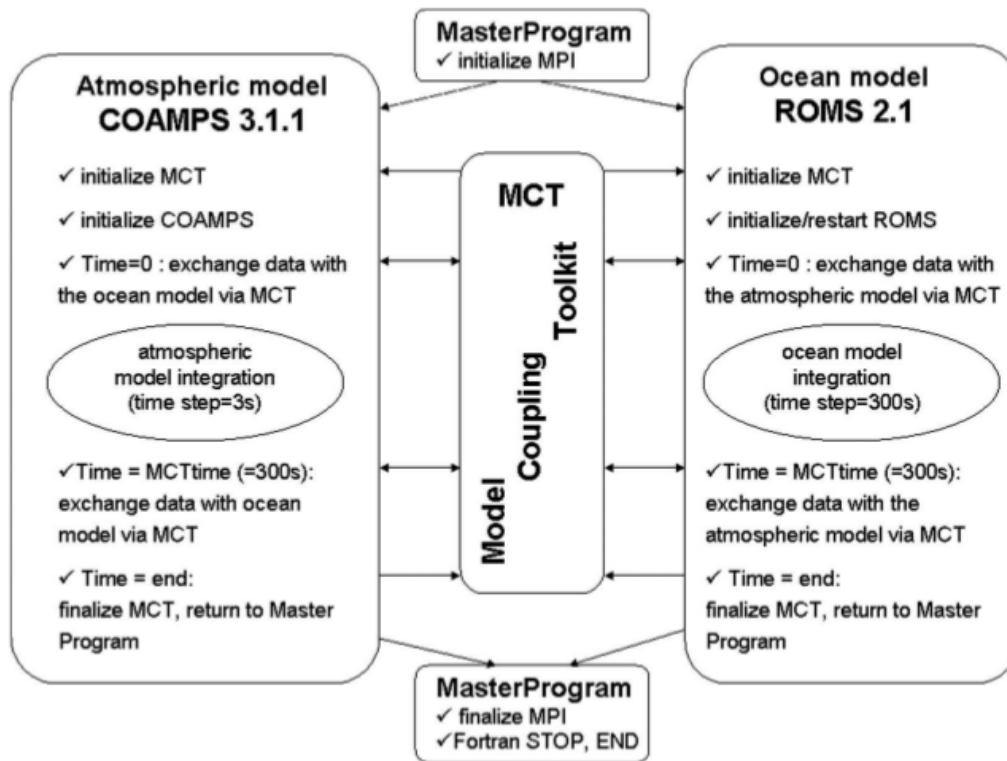


FIGURE 2.8 : Exemple d'introduction de la librairie de couplage MCT. Figure extraite de Perlin et al. (2007).

avantage de l'utilisation d'un coupleur est la modularité du système. Chaque modèle composante peut, en effet, être mis à niveau et amélioré indépendamment du reste des modèles participant au couplage. Néanmoins, selon le coupleur choisi, l'introduction des directives de couplage peut conduire à des modifications plus ou moins importantes de la structure initiale du code.

Dans la liste présentée par Brassington et al. (2015), seul le système du CEPMMT utilise une architecture sans coupleur, c'est-à-dire en ayant inclus toutes les composantes (IFS, WAM, NEMO+LIM2) dans un seul code produisant un binaire unique. Un autre exemple est le modèle COAWST (Warner et al., 2010) 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, ROMS, SWAN et le modèle de transport de sédiments CSTMS. Si l'assemblage en un exécutable fournit l'avantage de la plus grande cohérence dans les échanges (absence d'interpolation, couplage à chaque pas de temps, physique de surface partagée, ...), il peut aussi conduire à des difficultés liées à l'assemblage des différentes sources (voir Fig. 2.8), à la portabilité et à la maintenance du code.

Voltaire et al. (2017) présente dans son introduction des éléments plus détaillés sur ces aspects techniques du couplage.



### 2.2.3.3 Initialisation et assimilation

Dans la plupart des études citées précédemment, l'initialisation est faite séparément pour chaque compartiment. Plusieurs centres de prévision développent désormais des systèmes d'assimilation pour les modèles couplés océan-atmosphère-vagues (Penny et al., 2017); le principal objectif étant donc de produire des conditions initiales cohérentes pour ces systèmes de prévisions (ou pour les ré-analyses) couplées. Parmi les autres objectifs de l'utilisation de l'assimilation couplée listés par Penny et al. (2017), on peut également mentionner les possibilités d'extension des capacités de prévisions du temps, une meilleure utilisation des observations disponibles en permettant qu'elles influencent plusieurs compartiments et l'identification des faiblesses des systèmes couplés et aussi des réseaux d'observations.

Deux niveaux d'assimilation couplée sont généralement définis. L'assimilation couplée dite forte consiste à utiliser un système d'assimilation unique pour les modèles couplés 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. Les principales difficultés pouvant intervenir pour l'application de l'assimilation couplée forte et mentionnées par Penny et al. (2017) concernent les inadéquations possibles entre les différents modèles couplés (domaine, résolution, paramétrisation à l'interface) pour estimer les incertitudes et les erreurs de covariances, l'insuffisance des méthodes actuelles d'assimilation pour produire des analyses de différents compartiments contenant des échelles spatio-temporelles d'intérêts multiples, la non-standardisation des différents systèmes fournissant les observations et les différents formats, le transfert des erreurs/biais d'un modèle à un autre conduisant à des biais du modèle couplé et une possible dérive à long terme.

Les méthodes d'assimilation couplée dite faible sont donc généralement appliquées dans un premier temps. Dans l'assimilation couplée faible, une même ébauche (océanique et atmosphérique) est corrigée à partir d'observations, mais les corrections sont calculées indépendamment dans chaque compartiment. Par exemple, pour l'initialisation des simulations couplées de COAMPS-TC, à la fois le NCODA (Navy Coastal Ocean Data Assimilation, Cummings, 2005) et le NAVDAS (Navy Atmospheric Variational Data Assimilation System, Daley et Barker, 2000) sont appliqués en utilisant comme ébauche la prévision couplée à courte-échéance précédente (Doyle et al., 2014).

L'étude idéalisée de Smith et al. (2015) démontre les bénéfices attendus de l'assimilation couplée en permettant d'avoir une analyse plus équilibrée, réduisant le choc d'initialisation et son impact sur la prévision. Par ailleurs, en comparant avec une assimilation couplée forte, il apparaît que la majorité des améliorations sont obtenues même avec une assimilation couplée faible, même si celle-ci apparaît plutôt sensible au choix des paramètres utilisés dans les

schémas d'assimilation.

Au-delà de ces deux niveaux, il existe également des méthodes intermédiaires telles que celle développée par le CEPMMT dans le cadre du système CERA (Laloyaux et al., 2016a,b) qui utilise plusieurs itérations dans la formulation variationnelle des incréments pour synchroniser les systèmes atmosphérique (4D-Var) et océanique (3D-Var). Ces itérations se décomposent en itérations “externes” qui intègrent le modèle couplé de prévision produisant une estimation de l'état océan-atmosphère 4D et les écarts aux observations, et, d'une itération “interne” qui résout une version linéarisée de la formulation variationnelle pour le contrôle des incréments. Laloyaux et al. (2018) ont montré que cette méthode est efficace dans le cas où la fenêtre d'assimilation est suffisamment longue pour permettre la mise à l'équilibre des incréments océaniques et atmosphériques alors que l'assimilation couplée forte (*i.e.* utilisant une formulation explicite des corrélations croisées à partir de prévisions d'ensemble couplées) apparaît plus pertinente dans le cas de fenêtres d'assimilation plus courte ( $\leq 6$  heures).

Finalement, Penny et al. (2017) formulent plusieurs recommandations pour le développement et l'application de l'assimilation couplée :

- une standardisation des réseaux d'observations des différents compartiments et l'identification des manques (d'observations) dans le cadre d'assimilation couplée (ex : flux à l'interface) ;
- le support pour des recherches académiques qui explorent les aspects fondamentaux de l'assimilation couplée et une coordination internationale pour la comparaison des approches utilisées par les centres opérationnels ;
- le développement de méthodes pouvant s'appliquer à différentes échelles spatio-temporelles afin de faciliter leur application dans des systèmes “*seamless*” ;
- le développement de méthodes permettant l'identification des biais modèles de manière à directement améliorer les prévisions couplées ;
- une meilleure représentation des incertitudes des systèmes couplés via par exemple l'introduction d'une physique stochastique et une meilleure compréhension/représentation des erreurs dans les compartiments non-atmosphériques (surface continentale, océan-glace de mer, vagues) pour les échelles temporelles de la prévision numérique du temps ;
- la collaboration avec les scientifiques et experts en informatique pour permettre la modernisation des schémas d'assimilation et pour aborder les aspects techniques inhérents aux développements de systèmes d'assimilation couplée, en particulier ceux se rapportant aux méthodes de big data.

En résumé, il existe une diversité de systèmes couplés (présentés ci-dessus ou encore par exemple dans des articles de synthèse comme Brassington et al., 2015; Pullen et al., 2017b; Voltaire et al., 2017; Harris, 2018, ...) variant dans leurs développements techniques comme dans les aspects concernant la physique du couplage ou dans leurs possibilités d'application. De manière globale, les travaux de couplage démontrent un potentiel important des systèmes couplés pour représenter les phénomènes plus finement et de manière plus intégrée, et pour améliorer les prévisions atmosphériques, océaniques ou de l'état de mer, du fait d'une utilisation plus pertinente de l'information détaillée contenue dans la modélisation de chaque compartiment.

Il existe encore bien sûr des enjeux forts pour ces systèmes couplés. Les principales questions concernent leur initialisation, leur modularité, leur coût numérique du point de vue technique, mais plus largement il s'agit de promouvoir leur utilisation afin notamment de revisiter un certain nombre de questionnements et hypothèses physiques, dont les développements ont été faits typiquement dans un cadre non-couplé donc limité et contraint.

Dans la suite de ce mémoire, je présente les résultats de mes études sur les échanges air-mer à fine échelle et de mes travaux de couplage en regard des éléments clés cités ci-dessus.

# Chapitre 3

## Synthèse des travaux de recherche

Ce chapitre présente les principaux éléments de mes travaux de recherche par différentes études numériques réalisées pour mieux comprendre le rôle de la surface marine et des interactions air-mer pendant les événements fortement précipitants.

### 3.1 La température de surface de la mer

Dans la modélisation atmosphérique, la température de surface de la mer (SST, pour *Sea Surface Temperature*) est, sauf très rares exceptions, l'unique variable océanique prise en compte. Il s'agit également d'une variable largement observée, à la fois par des mesures in-situ (mesures bateaux routinière ou issues de campagnes, flotteurs, bouées ancrées, etc) et satellites (radiomètres), ce qui permet de bien qualifier la robustesse du (ou des) champ(s) appliqué(s) en condition de surface du modèle. Il est ainsi facilement et rapidement aisé de conduire des tests de sensibilité à ce paramètre, en variant la source fournissant la condition de SST au modèle atmosphérique ou en lui appliquant des modifications de structures ou d'amplitudes.

Dans la suite, les principaux résultats que j'ai obtenus concernant la sensibilité des événements fortement précipitants à la SST et sur la représentation des phénomènes pilotant les structures et évolutions de la SST en Méditerranée nord-occidentale sont présentés.

#### 3.1.1 Sensibilité des événements fortement précipitants à la valeur de SST

À l'issue de ma thèse (Lebeaupin Brossier, 2007), nous avons montré à l'aide d'expériences numériques avec le modèle MESO-NH (Lafore et al., 1998; Lac et al., 2018) à 2.5km de résolution que les quantités de précipitations prévues sont augmentées [diminués] lorsque la SST ou les flux de chaleur sont augmentés [diminués] en moyenne sur le bassin (Lebeaupin

et al., 2006). Une anomalie positive de SST conduit à une augmentation plus importante du volume précipité, en comparaison à la diminution obtenue en réponse à une anomalie froide. Cette asymétrie est reliée à la forme exponentielle de la formule de *Clausius-Clapeyron* utilisée par la paramétrisation des flux dans le calcul de l'humidité spécifique à saturation et la dépendance du coefficient de transfert de chaleur à la stabilité thermique. Les processus diabatiques associés à la convection peuvent eux aussi accentuer cet effet non-linéaire de la réponse au forçage de SST.

En utilisant différents champs de SST de résolution spatiale et de valeur moyenne différentes pour l'état initial, des réponses différentes ont été trouvées selon le type et la localisation des systèmes précipitants. Si les systèmes convectifs de méso-échelle ont généralement montré un déplacement plus rapide en réponse à une SST plus élevée (très probablement en raison d'un environnement de basses couches plus humide et d'une accélération du jet de basses couches Bresson et al., 2012), le cas d'un système frontal (cas de l'Hérault en décembre 2003) a montré des interactions entre la convection atmosphérique et la dynamique frontale. En réponse à une SST plus élevée, une intensification de la convection et une plus grande stationnarité du front dont la progression est bloquée par la convection, conduisent à une importante surestimation des cumuls de précipitations, et inversement dans le cas d'une SST diminuée.

De manière plus récente, les études couplées de Rainaud et al. (2017) et Sauvage (2019) ont conduit à analyser l'impact d'un changement de SST amené par l'initialisation du compartiment océanique. En effet, en initialisant le modèle NEMO (Madec et al., 2017), le champ initial de SST vu par le modèle de prévision AROME (Seity et al., 2011; Brousseau et al., 2016) n'est plus sa propre analyse mais une analyse océanique ou, après plusieurs échéances de prévision couplée, un champ pronostique. La Figure 3.1 présente le champ initial de SST dans une expérience tri-couplée de Sauvage (2019) (Fig. 3.1c) ainsi que les analyses AROME (Fig. 3.1a) et du système global PSY4 (Fig. 3.1b,d) de Mercator Océan International (Lellouche et al., 2013, 2018) utilisées sur ce même cas (12-14 octobre 2016) comme forçage d'expériences en "atmosphère-seule". Les cartes de SST sur le domaine AROME-France (Fig. 3.1a,b) montrent bien dans un premier temps la différence de résolution effective entre AROME avec des structures de 100km ou plus et des gradients lisses et PSY4 présentant des structures plus fines (de 30km diamètre environ sur la Méditerranée). Cette basse résolution effective de l'analyse de SST d'AROME est due principalement au faible nombre d'observations in-situ (bouées et bateaux) disponibles sur la fenêtre d'assimilation et d'une utilisation de données satellites seulement de manière indirecte au travers du rappel vers l'analyse quotidienne de SST OSTIA (*Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis* Donlon et al., 2012) ce qui vient fortement filtrer l'information dans l'espace et dans le temps [la procédure de construction de l'analyse de SST AROME avec l'interpolation optimale CANARI (Taillefer, 2002) et le rappel vers l'analyse OSTIA est détaillée dans Rainaud et al. (2016)].

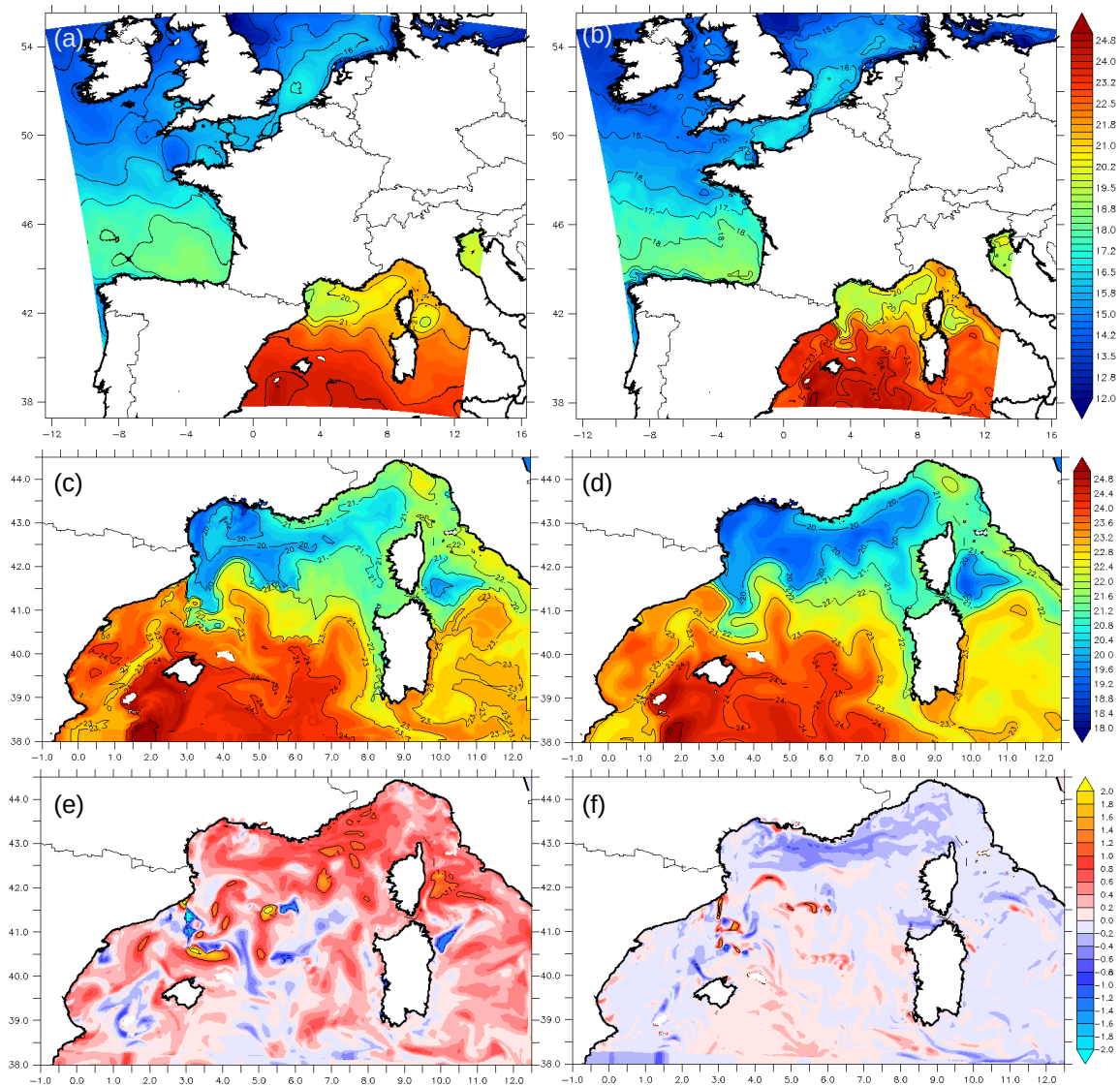


FIGURE 3.1 : Champs initiaux de SST ( $^{\circ}\text{C}$ ) utilisés pour différentes prévisions AROME démarrant le 13 octobre 2016 (à 00UTC) : (a) l'analyse AROME et (b) l'analyse du système PSY4, sur le domaine AROME-France, et, sur le bassin méditerranéen nord-occidental (c) pour l'expérience tri-couplée AOWr (voir Sauvage, 2019, pour la nomenclature des simulations) et (d) pour l'expérience AROME forcée par PSY4 (AYSSAtl). (e) Différences de SST entre AOWr et AYSSAtl le 13 octobre 2016 (à 00UTC), et, (f) différences entre la SST d'AOWr moyennée sur les 24 premières heures de prévision et sa SST initiale.

La comparaison entre l'analyse quotidienne PSY4 (Fig. 3.1d) et le champ pronostique produit sur la Méditerranée nord-occidentale par NEMO à la résolution  $1/72^{\circ}$  (Fig. 3.1c) dans l'expérience couplée (AOWr) montrent moins de différences en terme de structures (mis à part des déplacements de méandres dans le front Nord-Baléares). En revanche, AOWr présente un biais chaud important le long de la côte d'Azur, en mers Ligure et Tyrrhénienne par rapport à l'analyse PSY4 (Fig. 3.1e). Le biais résulte de l'effet du spin-up qui a consisté à réaliser une simulation "libre" (sans assimilation) de NEMO sur 7 jours, initialisée à partir de l'analyse

PSY4 le 5 octobre 2016 avec un forçage horaire en flux venant des prévisions d'AROME-France, mais aussi du fait que AOWr considère un champ instantané à l'état initial alors qu'il s'agit d'un champ moyen quotidien lorsque l'analyse PSY4 est utilisé. Or cette analyse par effet de moyenne tient compte du refroidissement lié à l'évènement météorologique au travers de son forçage atmosphérique et conduit à une forme d'anachronisme. Ainsi dans AOWr, le biais chaud tend à s'atténuer au cours des premières 24h de la simulation couplée (Fig. 3.1f). Sur ce cas d'étude, le couplage avec l'océan engendre au final des précipitations plus intenses pour le système sur l'Hérault qu'en forcé (Fig. 3.2), avec un cumul moyen légèrement supérieur et de meilleurs scores sur les précipitations. La plus forte intensification du système sur l'Hérault, est expliquée par la présence d'un air en basses couches légèrement plus humide et chaud sur le golfe du Lion. En mer, le cumul 24h maximum est également supérieur avec le couplage de l'océan et le système est décalé vers l'est, de plus de 30 km. Ces différences s'expliquent par un système convectif plus intense et mieux organisé en ligne dans la simulation couplée en raison principalement d'une alimentation du système convectif en humidité et en chaleur plus importante. Le refroidissement sous orage, plus intense, vient par ailleurs légèrement renforcer la convergence qui est ainsi plus marquée en couplé.

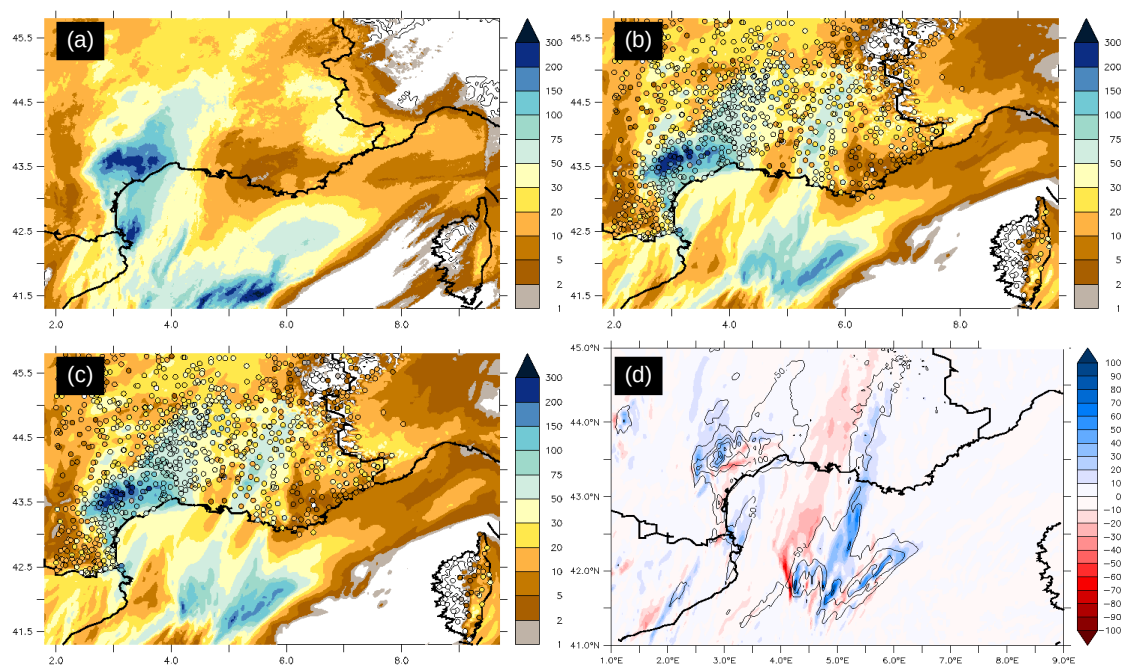


FIGURE 3.2 : Cumul de précipitation en 24h (mm) le 14 octobre 2016 00UTC (a) dans le produit fusionné radars-pluviomètres ANTILOPE (Laurantin, 2008), (b) simulé dans l'expérience couplée océan-atmosphère (AOC, voir Sauvage, 2019, pour la nomenclature des simulations), et (c) dans l'expérience couplée océan-atmosphère-vagues (AOWr). (d) Différences de cumul 24h (mm) entre AOC et la simulation forcée par l'analyse de SST PSY4 sur la Méditerranée nord-occidentale (AYSStatl). Les cercles dans (b,c) représentent les valeurs de cumuls observés par les pluviomètres des stations de surface de Météo-France.

Si les résultats montrent bien une amplification de la chaleur extraite de l'océan en raison d'une anomalie chaude, il existe un raccourci commun (et faux) qui sous-tend qu'une mer chaude (ou plus chaude que la normale) constitue un élément déclencheur d'évènements fortement précipitants. En fait, la valeur moyenne de SST n'est pas un facteur discriminant pour le développement des systèmes convectifs de méso-échelle. Les évènements précipitants résultent de conditions propices du point de vue dynamique (flux d'altitude rapide, vent marin fort en basses couches et soulèvement) et thermodynamique (instabilité en basses couches). Ainsi une mer chaude constitue plutôt un potentiel d'amplification du phénomène. Néanmoins, même sur ce point, le discours doit être prudent. En effet, plusieurs des expériences réalisées ont également montré une moindre stationnarité des systèmes convectifs fortement précipitants, dont la cause peut être trouvée par l'accélération du flux de basses couches, ce qui conduit à considérer que s'il existe bien un lien entre volume précipité et anomalie de SST, la valeur de cumul maximum localement peut finalement être peu modifiée. Les modifications de la localisation du ou des systèmes précipitants par la SST (anomalie et structures), particulièrement importantes dans le cas de systèmes convectifs initiés en mer, constitue en revanche une incertitude importante à laquelle il faut veiller pour la prévision déterministe à fine-échelle.

### 3.1.2 Structures de SST à fine-échelle : origine et impacts

Comme présenté dans l'introduction, la couche océanique superficielle en Méditerranée est marquée par des structures de fine échelle liées à sa circulation horizontale liée à la topographie de la région [circulation cyclonique de l'AW, tourbillons et gyres (cyclonique dans le golfe du Lion), fronts (notamment au nord des Baléares), circulation de plateau, contournement d'îles et tourbillons côtiers, etc] et aux interactions complexes avec l'atmosphère (par exemple par effet de cycle diurne, d'upwelling, de stratification comme lors de dessalure due aux précipitations qui isole la couche océanique de surface). Or, le rôle de ces structures ayant une signature forte en SST sur la CLAM est assez méconnu aux échelles kilométrique et sub-kilométrique et dans la majorité des cas il est négligé pour la prévision du temps.

Dans les expériences numériques de ma thèse, avec MESO-NH (Lafore et al., 1998; Lac et al., 2018) à 2.5 km de résolution, l'utilisation de champs de SST à très haute résolution obtenus à partir d'observations satellites n'a pas montré de réponses significatives de fines échelles sur les champs atmosphériques de basses couches. Dans les situations fortement précipitantes étudiées, nous avons conclu que le jet de basses couches convertissait les fines structures de SST, se retrouvant également dans les champs de flux de surface, en énergie intégrée disponible pour la convection (Lebeaupin et al., 2006).

Par la modélisation régionale couplée, j'ai mis en évidence le rôle de la circulation et principalement du gyre du golfe du Lion dans la formation et la persistance d'une anoma-



lie négative de SST sur plusieurs jours ce qui modifie la simulation des précipitations (cas de l'Aude en novembre 1999, Lebeau-pin Brossier et al., 2013). Le refroidissement dû à un évènement de mistral les jours précédents est plus important dans le modèle 3D que dans un modèle colonne (Lebeau-pin Brossier et Drobinski, 2009) dû notamment à l'approfondissement de 50 m de la couche de mélange et à l'entraînement en conséquence d'eau plus froide ainsi qu'à un upwelling côtier. La stratification au sein de la gyre est par ailleurs relativement faible, ce qui conduit à l'isolement de l'eau au centre et empêche son réchauffement par mélange latéral. Les deux effets d'entraînement vertical et de circulation horizontale de la gyre permettent donc à l'anomalie de persister sur 1 à 3 semaines dans le golfe du Lion. Les anomalies de SST en couplé (de  $-2^{\circ}\text{C}$  au centre de la gyre et de  $+0.5^{\circ}\text{C}$  près des côtes relié au courant Nord) modulent les flux de chaleur. Le vent de surface est aussi réduit au-dessus de l'anomalie froide et la convergence d'humidité est affectée. Ceci conduit à un décalage des précipitations de 40 à 80 km vers l'est et une augmentation du maximum de précipitations en couplé.

Cet effet, appelé "*mémoire océanique*" ou couplage sous-mensuel (de l'ordre de 2 semaines) a ensuite été étudié en détail et sur un plus grand nombre de situations fortement précipitantes au LMD, dans le cadre de la thèse de Ségolène Berthou (Berthou, 2015). Pour deux cas dans les Cévennes, les papiers Berthou et al. (2014) et Berthou et al. (2015) mettent en évidence deux mécanismes par lesquels l'anomalie de SST simulée en couplé et de l'ordre de quelques degrés impacte les précipitations intenses modélisées (à 20 km de résolution) : i) des différences de température atmosphérique en amont de la zone de convergence conduisant à une différence de pression ce qui modifie la dynamique de la zone de convergence et décale les précipitations, et, ii) une stabilisation des masses d'air au-dessus d'une anomalie froide qui augmente le blocage des masses d'air par le relief des Alpes et qui influence la dynamique de la zone de convergence qui se trouve en aval. L'analyse statistique de la relation entre les différences de précipitations et celles de SST par le biais d'indicateurs a montré que les régions des Cévennes, de Valence (Espagne) et la Calabre (Italie) présente des relations significatives (Berthou et al., 2016). Dans la région de Valence notamment les effets sont importants en raison d'une forte influence du mistral dans la zone amont (refroidissement par évaporation en surface et déplacement vers le sud du front Nord-Baléares) alimentant les systèmes précipitants de cette région (Berthou et al., 2018). Pour toutes les zones, les mécanismes reliant les différences de précipitations aux différences de SST semblent liés à des différences de vent plutôt que d'humidité dans le flux convergent à l'origine des précipitations. Ces résultats démontrent ainsi l'impact des structures de SST sur la dynamique de basses couches. Ils ont cependant été obtenus avec des AORCMs dont la résolution et la paramétrisation de la convection ne permettent pas une représentation correcte des processus de plus fine échelle, tels que l'étalement des poches froides sous les cellules convectives et les interactions fine-échelle avec le relief, qui sont pourtant primordiaux pour l'étude des

systemes fortement précipitants.

Dans les expériences AROME, deux cas étudiés [POI16a dans Rainaud et al. (2017) et le cas du 13 octobre 2016 dans Sauvage (2019)] avaient pour élément commun un déclenchement en mer lié à de la convergence en basses couches et une très forte sensibilité aux conditions à la surface marine [SST, couplage mais également prise en compte des vagues dans Sauvage et al. (2020), (voir aussi Thévenot et al., 2016, avec MESO-NH)]. Ces résultats tendent à montrer que la convergence est particulièrement sensible à de petites perturbations telles que pouvant être engendrées par l'apparition et/ou le déplacement de structures océaniques fines visibles en SST. Dans le cas d'octobre 2016, la sensibilité aux structures de SST est amplifiée en raison de la réponse de l'intensité du système formant une poche froide sous orage et venant jouer sur la convergence (Sauvage, 2019). L'étude de Meroni et al. (2018a) sur un événement fortement précipitant (Gènes, Italie, 9 octobre 2014) dans laquelle la SST est filtrée afin de lisser les structures de fines tout en conservant une valeur moyenne de SST identique montre que la convergence en mer simulée est modifiée en quelques heures par un mécanisme de mélange de la quantité de mouvement vers le bas qui vient déstabiliser l'air en basse couche en passant du côté froid d'un front vers le côté chaud et produit une accélération du vent au-dessus de l'anomalie chaude. Le rôle de la SST par ajustement du champ de pression apparaît très faible en présence de structures très fines mais devient comparable au mélange de quantité de mouvement lorsque le champ de SST possède des structures larges ( $O100$  km) (telles que par exemple vu dans les AORCMs, c.f. Berthou, 2015). L'ajustement de pression peut également jouer un rôle de filtre sur les structures de (sub)méso-échelle de SST lorsque la vitesse du vent en basses couches est importante.

En résumé, la prévision à courte échéance est relativement peu sensible à une description à très fine échelle du champ de SST dans le cas de forçage dynamique fort, mais peu s'avérer pertinente dans le cas de systèmes fortement précipitants dont le déclenchement est piloté par une forte instabilité (*i.e.* un important forçage thermique), comme dans le cas du Gard en 2002, ou par de la convergence en mer, comme dans les cas de la POI16a ou celui d'octobre 2016. En outre, ces derniers cas d'étude démontrent qu'une description dynamique et tridimensionnelle de l'océan peut modifier rapidement la SST et jouer significativement sur la convergence de basses couches.

Plusieurs indicateurs océaniques ont ainsi été mis au point durant le stage d'Arthur Masse (2020) à partir des analyses océaniques globales de Mercator Océan International afin de mieux caractériser l'état de la couche océanique superficielle en Méditerranée occidentale en amont de systèmes précipitants. Une présentation originale sous forme de cadran a notamment été réalisée (Fig. 3.3) permettant l'obtention d'informations synthétiques et conjointes de diagnostics clés. Appliqués pour l'automne 2020, ils illustrent des états de couche de mélange très différents pour deux épisodes fortement précipitants successifs sur le Sud-Est de la

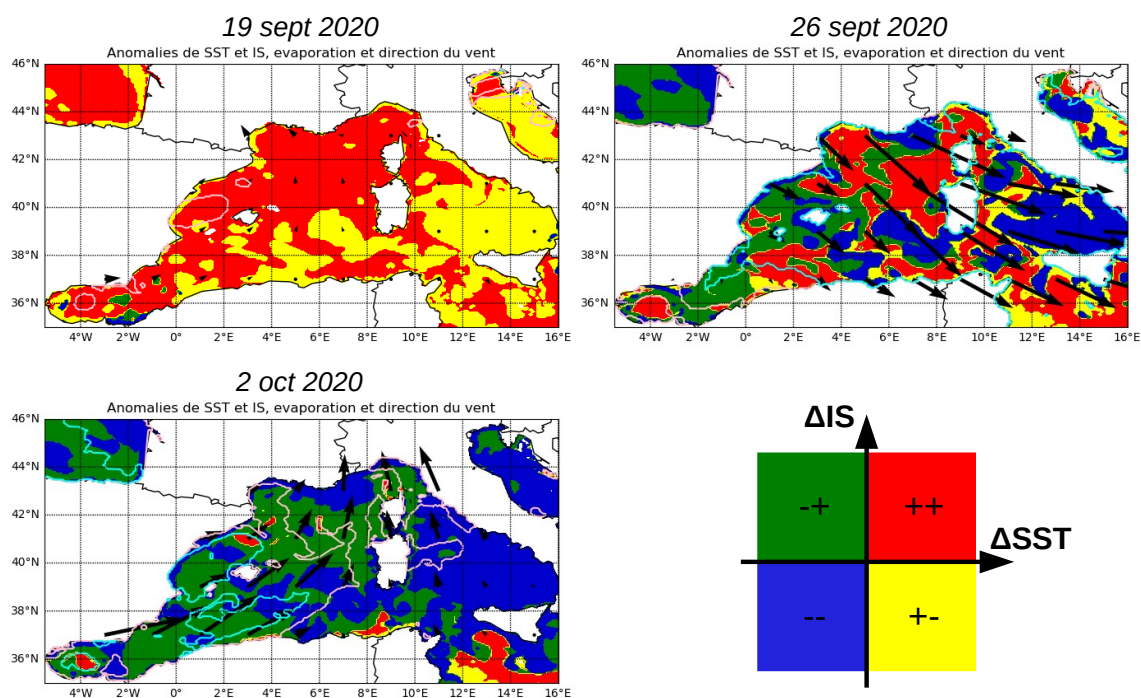


FIGURE 3.3 : Carte quotidienne représentant l'état océanique et de surface : relation anomalies de SST et d'indice de stratification ( $\Delta SST/\Delta IS$ ) en couleurs, vent à 10m (flèches) et évaporation (isolignes, rose si supérieure à  $3.10^{-5} \text{ kg/m}^2/\text{s}$  et cyan si supérieure à  $10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ) pour le 19 (cas de fortes précipitations à Valleraugue), 26 septembre (épisode de mistral) et 2 octobre 2020 (cas de Saint-Martin-de-Vésubie) à partir des analyses PSY4 (voir Masse, 2020).

France : des anomalies de SST et de stratification fortement positives sur une grande partie du domaine pour l'épisode de Valleraugue (Gard) le 19 septembre, et une anomalie de SST négative mais une anomalie de stratification plutôt positive en amont du cas de Saint-Martin-de-Vésubie (Alpes-Maritimes) le 2 octobre. Les changements (refroidissement de  $\sim 2^\circ\text{C}$  en moyenne et l'approfondissement de la couche de mélange passant de 20 à 40 mètres environ) se produisent sur une période très courte entre le 25 et le 28 septembre en raison d'un épisode de mistral affectant largement le bassin. Ainsi, les diagnostics développés pendant ce projet peuvent permettre d'identifier les zones potentielles de forte contribution océanique mais mettent aussi en évidence le caractère non systématique de l'importance d'une anomalie de SST et des mécanismes plus complexes à l'oeuvre notamment sur la verticale (Fig. 3.4).

L'évolution de la SST sur de courtes échéances (12-48h) est donc contrôlée par la dynamique de la CMO en interface avec l'atmosphère par les flux et avec les couches plus profondes de l'océan par le mélange, et généralement dans une moindre mesure par l'advection et la diffusion (Lebeaupin Brossier et al., 2014). Ainsi, le contenu de chaleur relié à l'épaisseur de la CMO et la capacité à extraire de la chaleur vers l'atmosphère plutôt que vers l'océan plus profond au travers de la stratification sont des structures à prendre en compte (voir Fig. 3.3, 3.4 et aussi 2.4) par la modélisation océanique et le couplage.

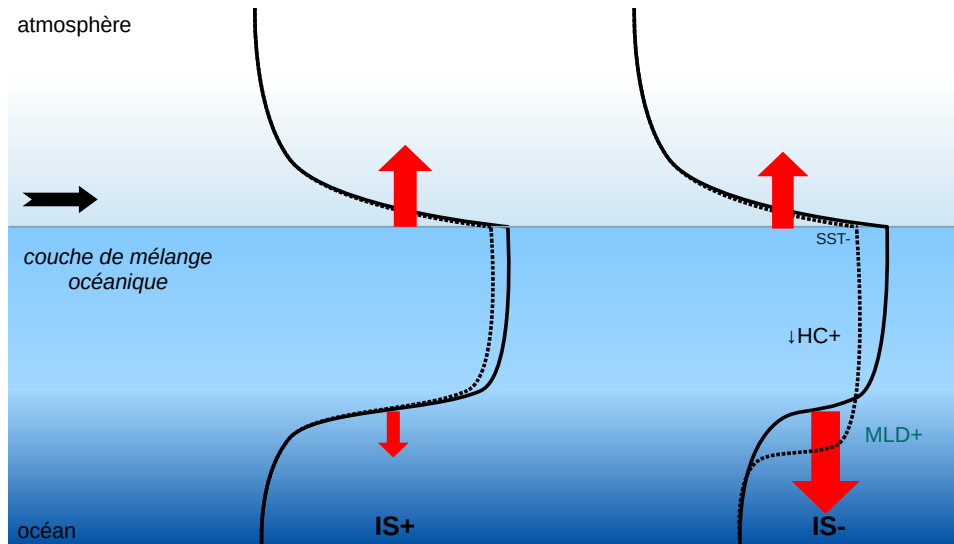


FIGURE 3.4 : Schéma illustrant les caractéristiques de la CMO (via le profil vertical en température) importantes à prendre en compte sur les échanges, en particulier les effets de la stratification, d'après le stage de Arthur Masse (2020).

## 3.2 Les couplages océan-atmosphère à méso-échelle

Au cours de mon parcours, j'ai mis au point ou utilisé différents couplages de degrés de complexité croissants. Les principes généraux de ces couplages et les résultats associés sont présentés dans cette section.

### 3.2.1 Couplages simplifiés

Le premier couplage réalisé a consisté à estimer une évolution pronostique de la SST dans des simulations MESO-NH au travers d'un modèle en couche (*slab model* ou 0D). Dans ce cas, on a considéré l'océan comme une couche océanique d'épaisseur  $h$  constante dans le temps et identique pour tout le domaine marin, homogène en température sur la verticale  $T_s(x, y, t)$  dont l'équation pronostique ne dépend que du flux de chaleur en surface (Lebeaupin et al., 2006) :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{Q}{\rho c_p h} = \frac{SW_{net} + LW_{net} + H + LE}{\rho c_p h} \quad (3.1)$$

Pour les trois cas d'étude de ma thèse [événements fortement précipitants de l'Aude (12-13 novembre 1999), du Gard (8-9 septembre 2002) et de l'Hérault (3 décembre 2003)], nous avons pu ainsi simuler très rapidement et simplement une évolution de la SST cohérente avec l'évolution atmosphérique (refroidissement sous le jet de basses couches et sous la convection, cycle diurne localement dans le cas du Gard) sans montrer un impact significatif sur la simulation des systèmes précipitants ou sur la dynamique ou l'environnement de basses couches.

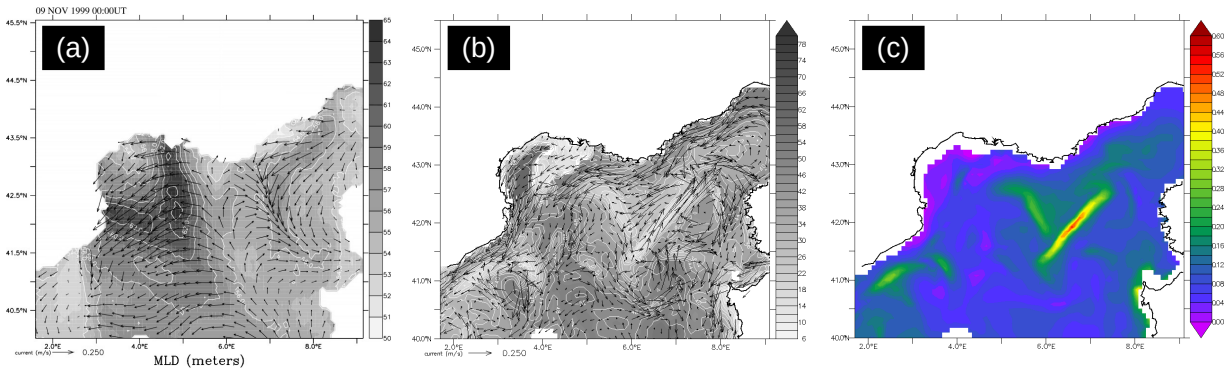


FIGURE 3.5 : Profondeur de la CMO (ou MLD pour Mixed Layer Depth,  $h$ , en m) et courants (m/s) simulés après 4 jours dans le golfe du Lion par le modèle océan en couche complet dans WRF pour le cas de mistral du 5 au 9 novembre 1999 (Figure extraite de Lebeau-pin Brossier et Drobinski, 2009). (b) MLD (m), courants de surface (m/s) et (c) estimation de la stratification thermique ( $\frac{T_s - T_{65m}}{h} \simeq \gamma$ , K/m) dans la ré-analyse océanique GLORYS (1/12°, Ferry et al., 2010) pour le 9 novembre 1999.

Dans Lebeau-pin Brossier et Drobinski (2009), le couplage du modèle WRF (Skamarock et al., 2008) avec un modèle océanique en couche (quasi-1D d'après Pollard et al., 1973; Price, 1981, développé pour la simulation de cyclones tropicaux) a été utilisé sur deux situations de mistral. Ce couplage était mal documenté et l'analyse du code a montré que seul les effets du stress et de l'entraînement étaient pris en compte pour l'évolution de la température tandis que l'effet des flux de chaleur en surface ( $Q$ ) était coupé. De manière assez attendu, l'utilisation du schéma complet (*i.e.* avec la prise en compte du flux de chaleur en surface) a permis de produire une évolution océanique plus cohérente sans néanmoins modifier significativement la simulation atmosphérique largement pilotée par la situation synoptique et les flux continentaux.

Bien que très faciles à mettre en œuvre, plusieurs problèmes se posent pour l'utilisation d'un couplage à ce type de modèle en couche. Tout d'abord une grande partie de l'évolution océanique repose sur le choix de l'épaisseur  $h$ . La SST est ainsi fortement contrôlée par  $h$ , qui si trop épaisse limite les évolutions rapides et intenses de la SST même en situation de vent fort. Inversement, dans le cas d'une couche trop fine, les réponses océaniques aux échanges en surface sont surestimées. Dans le cas du schéma dans WRF, un deuxième paramètre est entré en *namelist*,  $\gamma$ , qui définit la stratification thermique. Or ce paramètre présente des gradients importants et de fine échelle en Méditerranée, tout comme  $h$  (Fig. 3.5), ce qui rend problématique une initialisation pertinente du schéma. Enfin, la salinité est absente de ces schémas océaniques simplifiés et seul un approfondissement de la couche de mélange peut-être simulé par le schéma de Pollard et al. (1973); Price (1981). L'impossibilité de reproduire des phénomènes de restratification limite donc leur intérêt pour les situations calmes ou pour des régimes de vent modéré (cycle diurne) et/ou fortement précipitantes (barrière de sel).

Au cours de ma thèse, j'ai développé un couplage océan-atmosphère entre le modèle atmosphérique MESO-NH et le modèle océanique 1D de Gaspar et al. (1990) via le schéma de surface SURFEX (Masson et al., 2013). Comparé au modèle en couche, le modèle 1D permet de représenter l'évolution d'une colonne océanique (de la surface jusqu'au fond fonction de la bathymétrie) pour chaque point de grille en tenant compte des flux de quantité de mouvement, de chaleur et d'eau et du mélange vertical turbulent, ce qui signifie que les effets de restratification peuvent notamment être simulés. Le modèle 1D apporte également plus de réalisme, car ses champs de température et de salinité peuvent être initialisés à partir d'analyses (ou d'observations) océaniques, ce qui permet de prendre en compte des structures océaniques fines (et non plus uniquement de considérer des champs homogènes dans l'espace) telles que présentes en Méditerranée.

Appliqué sur trois cas d'épisodes fortement précipitants méditerranéens (Aude novembre 1999, Gard septembre 2002, Hérault décembre 2003), le système couplé a permis d'analyser la réponse océanique aux événements et les rétroactions induites sur l'atmosphère. Un approfondissement et un refroidissement significatifs de la couche de mélange océanique sous le jet de basses couches ont ainsi été reproduits, notamment pour la situation de l'Aude en novembre 1999 qui montre le régime de vent le plus fort, ainsi que la formation de couches internes fines relativement peu salées sous les précipitations les plus intenses, en particulier pour le cas de l'Hérault où un effet de barrière de sel amplifie localement le refroidissement de surface. Sur le cas du Gard en septembre 2002 qui présente un forçage dynamique plus faible au-dessus de la mer, le modèle océanique a produit une évolution diurne du contenu thermique de la couche de mélange avec une amplitude de la SST moyenne de  $0.3^{\circ}\text{C}$  en 24h et une salinisation progressive de la CMO.

Les simulations couplées ont finalement montré que l'évolution de la SST au cours de l'intégration modifie progressivement l'instabilité convective et l'intensité de la convection et des fortes précipitations associées. De faibles modifications de la localisation du système convectif ont aussi été obtenues. Le jet de basses couches, quant à lui, n'a pas été significativement modifié par le couplage. Ces résultats ont permis de conclure que le couplage interactif amortit les réponses des milieux océanique et atmosphérique par rapport au mode forcé.

La sensibilité des basses couches atmosphériques et des MCS au couplage est finalement apparue faible au moment de la thèse parce que comparée aux modifications produites par des changements de SST ou de paramétrisation des flux (Lebeau-pin Brossier, 2007). Le couplage a néanmoins montré des effets intéressants si l'on considère les courtes échéances regardées (18 à 24h), notamment des effets de stratification à fine échelle, une modification de l'alimentation en basses couches et des structures de courants d'Ekman venant s'opposer à l'écoulement des rivières. Malgré l'absence d'advection, le modèle 1D a montré du réalisme pour produire une évolution océanique locale, rapide et intense, ainsi que sa robustesse

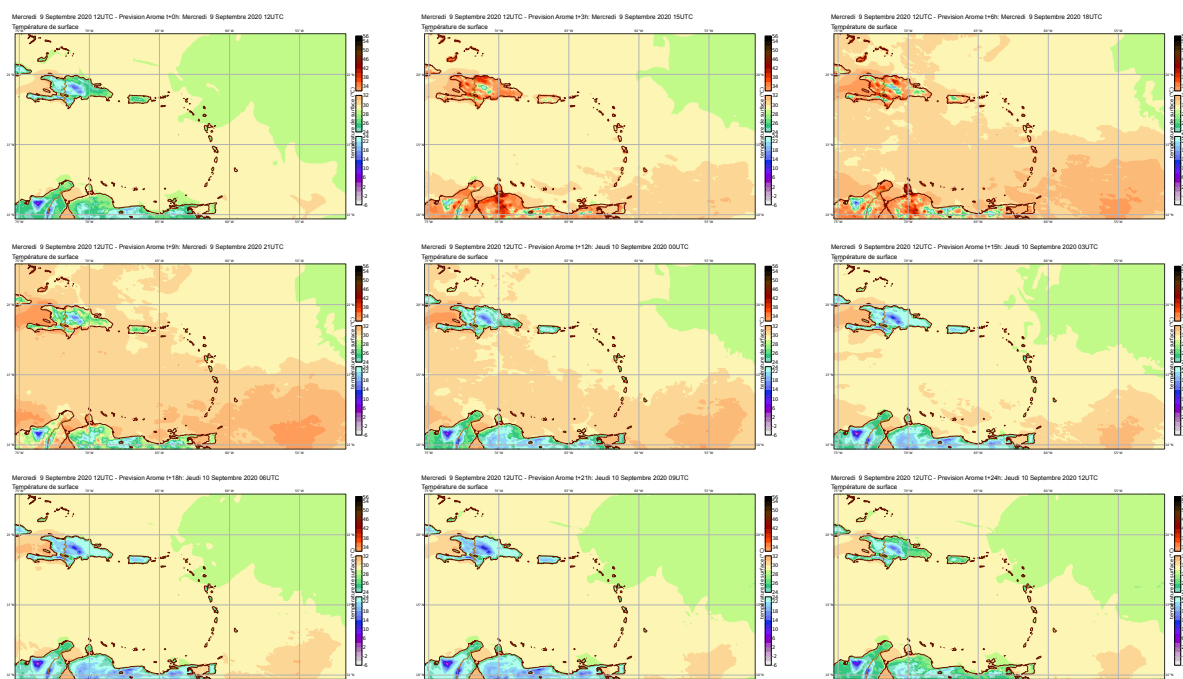


FIGURE 3.6 : Evolution du champ de SST ( $^{\circ}\text{C}$ ) dans la prévision opérationnelle AROME-Caraïbes (2.5 km de résolution) du 9 septembre 2020 12UTC (soit 8h00 loc. pour les Antilles françaises), sur les premières 24 heures par pas de trois heures (de +0 à +24h).

numérique même pour les zones côtières peu profondes.

Le couplage 1D a notamment été utilisé au LACy avec MESO-NH (puis AROME, *e.g.* Bousquet et al., 2020) pour la représentation des interactions air-mer en situation cyclonique sur le bassin de l’océan Indien.

L’insertion du modèle océanique 1D de Gaspar et al. (1990) dans SURFEX a permis d’introduire dès leur conception le 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 pour les situations météorologiques à enjeux comme pour la prévision du temps sensible. La Figure 3.6 montre un exemple de l’évolution pronostique de la SST simulée par le modèle 1D couplé à AROME sur la zone des Caraïbes<sup>1</sup> et sa capacité à reproduire et à prendre en compte pendant la prévision un cycle diurne de la surface marine. La collaboration avec Mercator Océan International (notamment par l’étude de Céline Vargel) a par ailleurs permis d’améliorer le réalisme de l’état initial du modèle océanique 1D pour les quatre réseaux distincts de prévision (00, 06, 12 et 18 UTC) des AROME-OM, en permettant l’utilisation des champs instantanés prévus par le système global PSY4 ( $1/12^{\circ}$ ) plutôt que des moyennes quotidiennes.

1. modèle impliqué dans la campagne du projet européen EUREC4A (Bony et al., 2017)

Le couplage au modèle océanique 1D a récemment été utilisé dans des expériences LES (*Large Eddy Simulation*, 50 m de résolution) avec MESO-NH par Brilouet et al. (2021) sur un cas de cycle diurne pendant la campagne DYNAMO. Le modèle océanique 1D utilisé avec une résolution verticale très fine (10 cm d'épaisseur jusqu'à 5 m de profondeur, puis étirée jusqu'à 300 m de profondeur) permet une bonne représentation de la couche diurne chaude (ou DWL, pour *Diurnal Warm Layer*) formée par l'absorption du flux solaire visible, et montre le rôle du stress pour la simulation du jet océanique et du mélange vertical qui induit de l'instabilité et l'approfondissement de la DWL. Le flux non-solaire lui contrôle le refroidissement nocturne et donc la durée de vie de la DWL. La LES couplée montre une turbulence dans la CLAM organisée en cellules ouvertes avec des thermiques intenses au bord des cellules ainsi que l'apparition de poches froides dues aux précipitations sous des cumulus peu profonds, conformément aux observations. En particulier, le déclenchement de la convection profonde semble être directement lié aux échanges air-mer et la présence d'une DWL 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 CLAM.

Des tests exploratoires sont enfin en cours dans le groupe GMAP du CNRM pour évaluer l'impact d'une surface océanique pronostique par le biais du couplage 1D pour l'océan libre (en plus de la glace de mer via SURFEX/GELATO<sup>2</sup>-1D, Salas Mélia, 2002; Sénési, 2014) pour le modèle global de PNT ARPEGE (Courtier et al., 1991).

Depuis 2007, la disponibilité du modèle océanique 1D dans SURFEX a ainsi permis de rendre accessible le couplage océan-atmosphère pour les différents modèles interfacés (avec SURFEX), permettant de progresser dans la représentation de la surface océanique puisque pouvant évoluer au cours du temps et des flux à l'interface air-mer. Néanmoins, l'utilisation de colonnes indépendantes conduit à certaines discontinuités et incohérences de surface. surtout, le modèle 1D reproduit, de fait, un nombre limité de processus océaniques, puisqu'aucun processus horizontal (advection, diffusion) n'est inclus. Dans les cas très intenses comme les cyclones tropicaux notamment, la modélisation 1D ne peut représenter l'upwelling et sous-estime ainsi la réponse océanique (c.f. Yablonski et Ginis, 2009, qui estime que jusqu'à la moitié du refroidissement n'est pas représenté avec un modèle 1D pour les cyclones se déplaçant à moins de 2 m/s). Enfin, pour des conditions stables fortement stratifiées, le schéma de turbulence du modèle de Gaspar et al. (1990) semble devoir également être ajusté (Brilouet et al., 2021).

De manière évidente, le couplage d'un modèle océanique tri-dimensionnel est ainsi apparu nécessaire pour encore progresser dans la représentation et compréhension des processus

---

2. *Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean*



couplés océan-atmosphère à fine échelle.

### 3.2.2 Modélisation couplée régionale

Mes travaux sur la modélisation océanique 3D avec NEMO (Madec et the NEMO system team, 2008) ont commencé au cours de mon post-doctorat entre le LMD et l'ENSTA, dans le cadre du projet MORCE-MED (*Modélisation Régionale Couplée pour l'étude des impacts régionaux du changement climatique - Application à la région Méditerranée*) financé par le GIS "Climat, Environnement et Société" et d'un projet de partenariat renforcé (PPR) avec Mercator Océan (projet SIMED, pour *Simulation de la mer Méditerranée*), par la mise au point du système de modélisation de la mer Méditerranée NEMO-MED12 (1/12° de résolution, Fig. 3.7, Lebeaupin Brossier et al., 2011, 2012a,b; Beuvier et al., 2012a,b).

En préparation du couplage, j'ai réalisé plusieurs simulations NEMO-MED12 en utilisant comme forçage atmosphérique des expériences WRF pour une année variant par la résolution spatiale (20 versus 7 km localement sur le golfe du Lion) ou par la fréquence d'entrée du forçage (quotidien versus 3 heures). Les résultats de ces différentes simulations ont montré des modifications significatives de la circulation océanique avec l'augmentation des résolutions spatiales et temporelles du forçage (Lebeaupin Brossier et al., 2011) telles qu'illustrées par l'augmentation importante de l'énergie cinétique turbulente sur l'horizontale et la verticale (Fig. 3.8) en réponse notamment à une augmentation du stress du vent moyen et de sa variabilité temporelle (Lebeaupin Brossier et al., 2011). La haute fréquence temporelle est par ailleurs importante dans la représentation des événements de courte durée comme les précipitations (Lebeaupin Brossier et al., 2012a), du cycle diurne et des maximums de vent (Lebeaupin Brossier et al., 2011). Notamment l'utilisation de champs atmosphériques à méso-échelle (à 7 km) permet une représentation réaliste de la convection océanique à la fois dans le golfe du Lion et en mer Ligure (Lebeaupin Brossier et al., 2012b).

Le couplage au modèle atmosphérique WRF (*Weather Research and Forecasting*, Skamarock et al., 2008) a par la suite été développé (Drobinski et al., 2012). Ce développement a été réalisé grâce notamment à des échanges avec le LOCEAN (Sébastien Masson, Gurvan Madec, Guillaume Samson) où s'engageaient des travaux de couplage WRF-NEMO au même moment, et à consister techniquement à introduire les appels au coupleur OASIS (*Ocean Atmosphere Sea Ice Soil*, Craig et al., 2017) au sein des routines de WRF (les appels similaires étant déjà présents dans le code NEMO). Une configuration du système couplé sur la région méditerranéenne (voir domaine en Figure 3.10) a été définie afin de participer à l'exercice d'inter-comparaison MED-CORDEX (Ruti et al., 2016). Des simulations de 20 ans (1989-2008) avec une résolution horizontale de 20 km pour l'atmosphère ont ainsi été réalisées en adaptation (*downscaling*) dynamique des ré-analyses ERA-interim (Simmons

et al., 2007) avec WRF seul (forcé par les SST d'ERA-interim) et couplé à NEMO-MED12 (avec une fréquence de couplage de 3 heures). La comparaison des simulations océaniques forcées et couplées avec l'atmosphère permettent également de quantifier l'influence des processus couplés de fine échelle sur la circulation générale, le cycle de l'eau et sa variabilité (Lebeaupin Brossier et al., 2015). Notamment, les résultats ont montré qu'à ces échelles de temps la SST contrôle directement le budget en eau de la mer Méditerranée par ses composantes principales que sont l'évaporation et les précipitations, avec une réduction de 6 et 3% respectivement dans l'expérience couplée liée à une SST plus basse en moyenne (mais de seulement  $-0.17^{\circ}\text{C}$ ). En réalité, le couplage conduit à des diminutions significatives de l'occurrence d'extrêmes de précipitation (Fig. 3.9) et d'évaporation, ce qui contribue pour 50% dans la réponse moyenne obtenue. Des disparités spatiales à méso-échelle et la propagation ses effets du couplage sur les zones côtières (jusqu'à 750 km des côtes) ont également été mises en évidence.

Comme décrit précédemment les simulations régionales couplées de 20 ans ont permis de mettre en évidence un effet de mémoire océanique (Lebeaupin Brossier et al., 2013) et en complément des travaux de thèse de Ségolène Berthou, une large utilisation des expériences régionales couplées a été faite au LMD dans le cadre de travaux d'étudiants et post-doctorants autour de la plateforme MORCE (e.g. Flaounas et al., 2013, 2016; Di Luca et al., 2014; Stéfanon et al., 2014; Omrani et al., 2016, 2017).

Actuellement le système couplé WRF-NEMO constitue l'architecture de base de système de modélisation régional de l'IPSL (RegIPSL, Fig. 3.10) et le modèle NEMO-MED12 (avec 50 ou 75 niveaux verticaux) ainsi que sa configuration "petite sœur" NEMO-MED36 (Arsouze et al., 2013) sont partagés dans une large communauté de modélisation océanique de la mer Méditerranée (e.g. Palmiéri, 2014; Guyennon et al., 2015; Hamon et al., 2016; Adloff

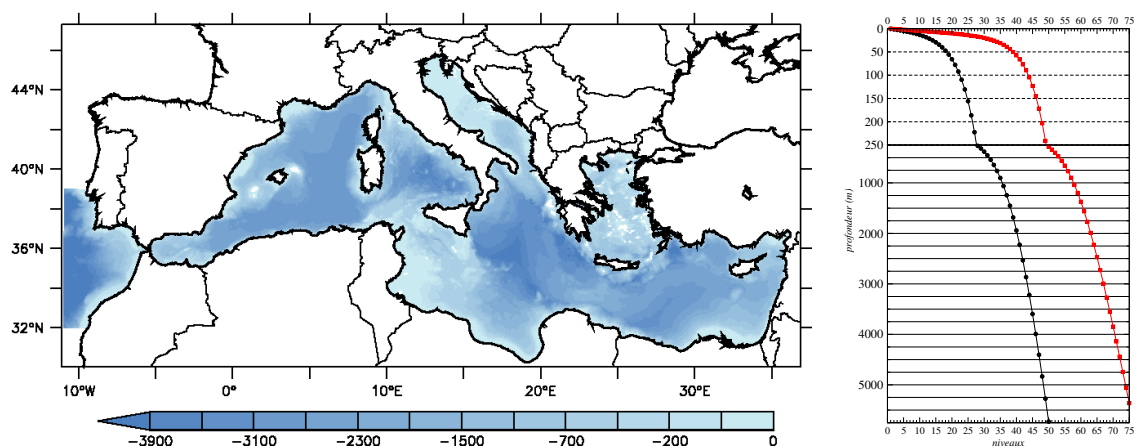


FIGURE 3.7 : Domaine du modèle NEMO-MED12 illustré par sa bathymétrie (m) à gauche. À droite, détails de ses grilles verticales : à 50 (grille originale en noir) et 75 (grille raffinée en rouge) niveaux.

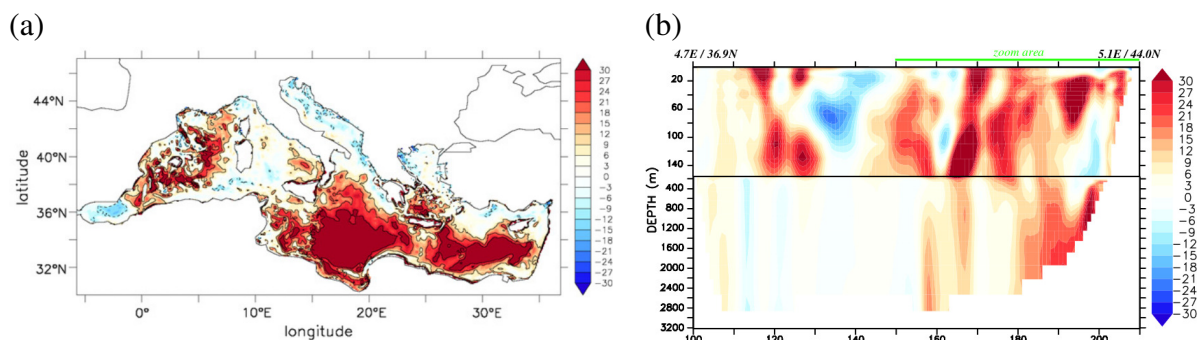


FIGURE 3.8 : Différences en terme d'énergie cinétique turbulente entre la simulation NEMO-MED12 utilisant le forçage à haute résolution spatiale et temporelle (7 km, 3h) et la simulation de contrôle (20 km, 24h) : (a) variabilité additionnelle (%) en surface et (b) différence relative (%) pour une section verticale traversant le golfe du Lion. Voir Lebeaupin Brossier et al. (2011) pour plus de détails.

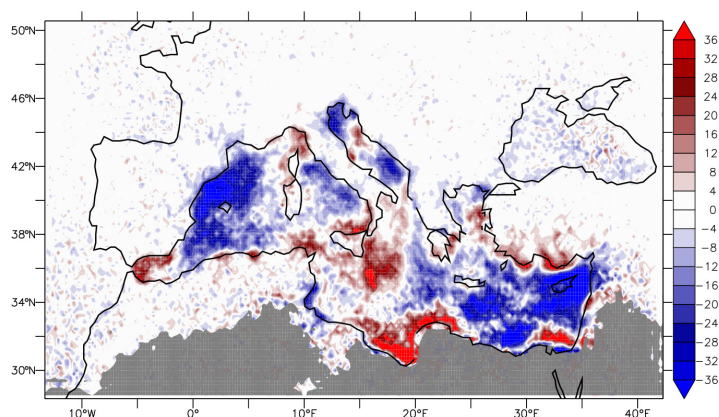


FIGURE 3.9 : Différence relative (%) d'occurrence de précipitations intenses (supérieures à 50 mm en 24h) sur la période 1989-2008 entre l'expérience couplée WFR-NEMO (CPL) et l'expérience WRF forcé par les champs de SST quotidiens d'ERA-interim (CTL). La zone grise représente la zone où l'occurrence dans CTL est inférieure à 0.05%. Figure extraite de Lebeaupin Brossier et al. (2015).

et al., 2018; Harzallah et al., 2018; Akhtar et al., 2019; Pages et al., 2020).

Dans le cadre d'un post-doctorat au CNRM sur le projet FP7 CLIM-RUN (*Climate Local Information in the Mediterranean region : Response to User Needs*), j'ai également analysé des expériences régionales couplées océan-atmosphère avec ALADIN/NEMO-MED8 (Sevault et al., 2014) et comparer les effets de l'utilisation de différentes paramétrisations des flux turbulents air-mer et par une comparaison aux observations de bouées.

Mes études de modélisation océanique en Méditerranée et de simulations couplées régionales au LMD comme dans le groupe GMGEC du CNRM m'ont permis de mieux connaître les spécificités de la circulation océanique du bassin méditerranéen à fine échelle et en particulier la zone nord-occidentale, d'analyser le rôle des processus couplés sur les événements extrêmes et sur le cycle de l'eau et d'acquérir la maîtrise des outils numériques permettant de définir et construire le couplage océan-atmosphère pour de plus fines échelles de temps et

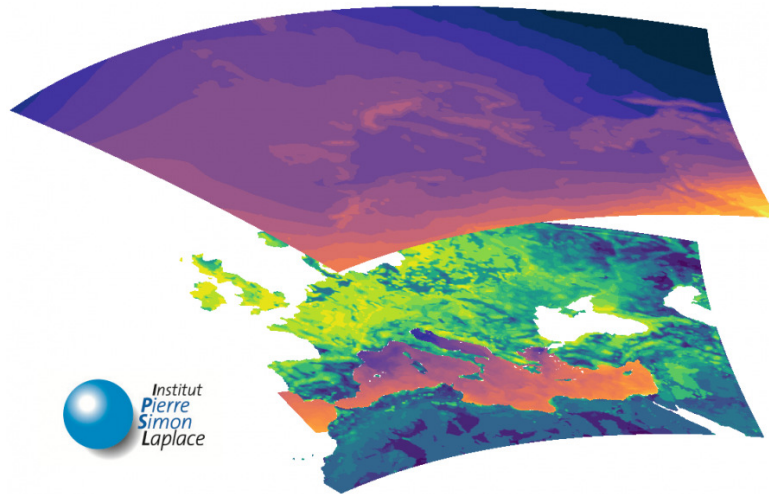


FIGURE 3.10 : Représentation de la plateforme de simulation régionale RegIPSL (WRF-NEMO-ORCHIDEE-CHIMERE) sur le domaine méditerranéen (domaine MED-CORDEX) [reproduite avec l'aimable autorisation de Romain Pennel (LMD)]. Pour plus d'information, voir <https://sourcesup.renater.fr/wiki/morcemed/home>.

d'espace.

### 3.2.3 Couplage 3D à méso-échelle

Cette sous-section décrit la construction de systèmes couplés à échelle kilométrique, en passant tout d'abord par la mise au point de configurations régionales dédiées du modèle océanique (NEMO) et l'évaluation des réponses océaniques aux épisodes intenses par l'utilisation d'un forçage à haute résolution (voir 3.2.3.1), le développement coordonné de l'interface de couplage SURFEX-OASIS et ses principes généraux (voir 3.2.3.2) et enfin les différentes applications et analyses des simulations couplées (voir 3.2.3.3).

#### 3.2.3.1 Modélisation océanique dédiée et réponse aux évènements intenses

Dans l'objectif de simuler le bassin méditerranéen occidental avec une échelle fine, la configuration régionale WMED36 ( $1/36^\circ$  sur la Méditerranée Occidentale, Fig. 3.11, Lebeaupin Brossier et al., 2014) a tout d'abord été développée. Elle a dans un premier temps permis d'examiner la réponse océanique aux évènements intenses pendant la SOP1 HyMeX à l'automne 2012 (Ducrocq et al., 2014). En utilisant un forçage atmosphérique à fine-échelle (prévisions d'AROME-WMED, Fourrié et al., 2015, 2.5 km de résolution, fréquence horaire), une forte variabilité spatio-temporelle des flux de surface a été obtenue en lien avec les processus atmosphériques de fine-échelle, permettant de reproduire les changements rapides de CMO : fort refroidissement et mélange sous les vents forts potentiellement associés à des upwellings, et, dessalure en surface produite par des pluies intenses. De plus, par l'analyse de bilans, la contribution majeure du terme d'entraînement [détraiement] dû au mélange [à

la restratification] sur l'évolution de la CMO a été mise en évidence. La Figure 3.12 montre

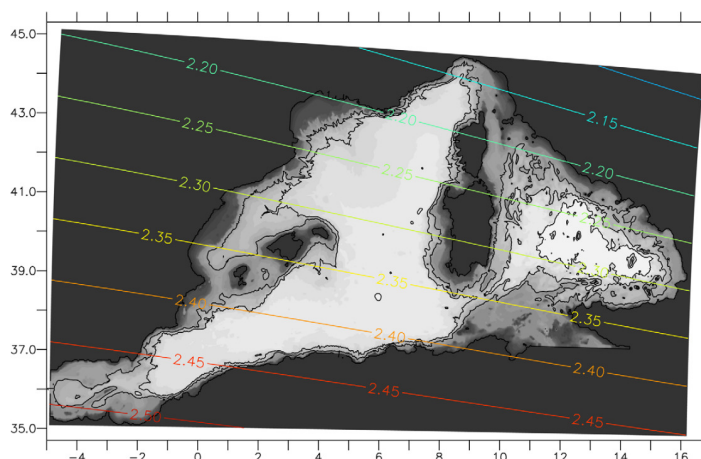


FIGURE 3.11 : Domaine du modèle NEMO-WMED36 illustré par sa bathymétrie (m). Les lignes colorées indiquent la résolution (en km) de la maille (grille ORCA au  $1/36^\circ$ ). La grille verticale de WMED36 est identique à la grille à 50 niveaux de MED12 (voir Fig. 3.7 ou 3.14).

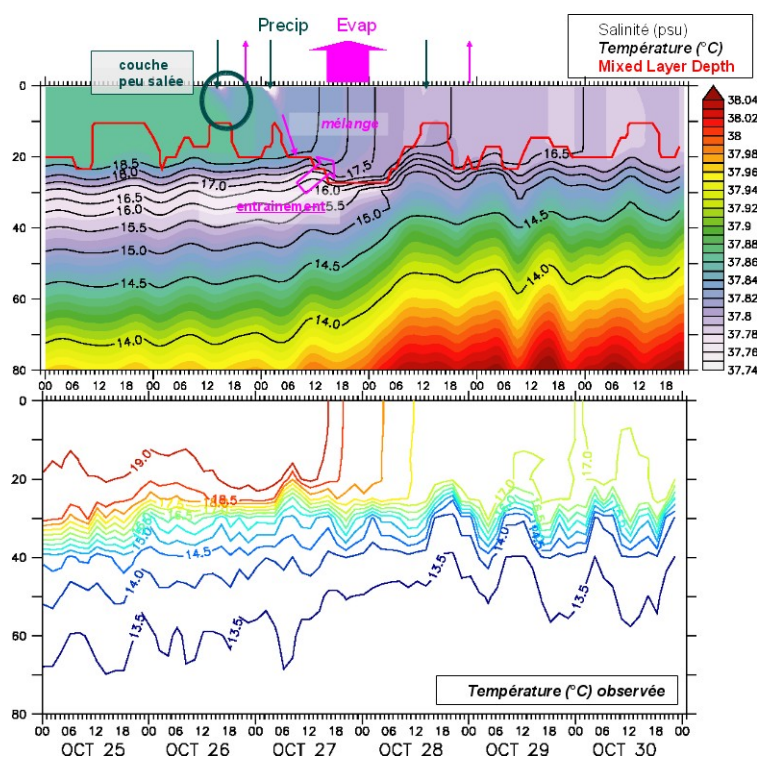


FIGURE 3.12 : En haut : Evolution pendant les IOP16a et 16b à AZUR [ $7.8^\circ\text{E}$ - $43.4^\circ\text{N}$ ] des profils en salinité (couleurs, psu), température (isolignes,  $^\circ\text{C}$ ) et de la profondeur de CMO (MLD) dans la simulation NEMO-WMED36 forcée. En bas : Evolution du profil en température ( $^\circ\text{C}$ ) observé par la chaîne de thermistance à la bouée (Lebeau-pin Brossier et al., 2014).

en particulier l'évolution des profils  $\theta$  et S au niveau de la bouée Azur pendant les IOP 16a (26 octobre 2012) et 16b (27-28 octobre 2012). Elle montre la formation de couches superficielles peu salées sous les pluies les plus intenses (IOP16a) et le refroidissement sous la forte

évaporation due au mistral pendant l'IOP 16b, en accord avec les observations. Elle montre également que la présence d'une couche peu salée (37.74 psu) à 30m de profondeur amplifie la diminution de la salinité en surface par mélange, malgré une forte évaporation. D'autres simulations océaniques forcées ont été réalisées avec NEMO-WMED36 sur la SOP1 par Romain Rainaud dans la seconde partie de sa thèse, pour évaluer la sensibilité de la CMO à l'état initial [PSY2 (Lellouche et al., 2013) ou MED36 (Arsouze et al., 2013)] et à la paramétrisation des flux turbulents [ECUME (Belamari, 2005; Belamari et Pirani, 2007) ou COARE (Fairall et al., 2003)]. Les résultats confirment que l'état de la CMO ( $\theta$ , S et épaisseur) dépend de l'état initial, alors que ses tendances sont contrôlées principalement par le forçage en surface et le mélange (ou la stratification) (Rainaud, 2015).

Dans le cadre du travail avec Fabien Léger sur le projet ASICS-Med, NEMO-WMED36 a été forcé par les prévisions d'AROME-WMED pour évaluer la représentation de la formation d'eau dense hivernale et la convection océanique profonde en Méditerranée nord-occidentale. Les résultats de trois simulations couvrant les SOPs HyMeX (du 1er septembre 2012 au 15 mars 2013) montrent ainsi la forte sensibilité de la formation d'eau dense en terme de chrono-

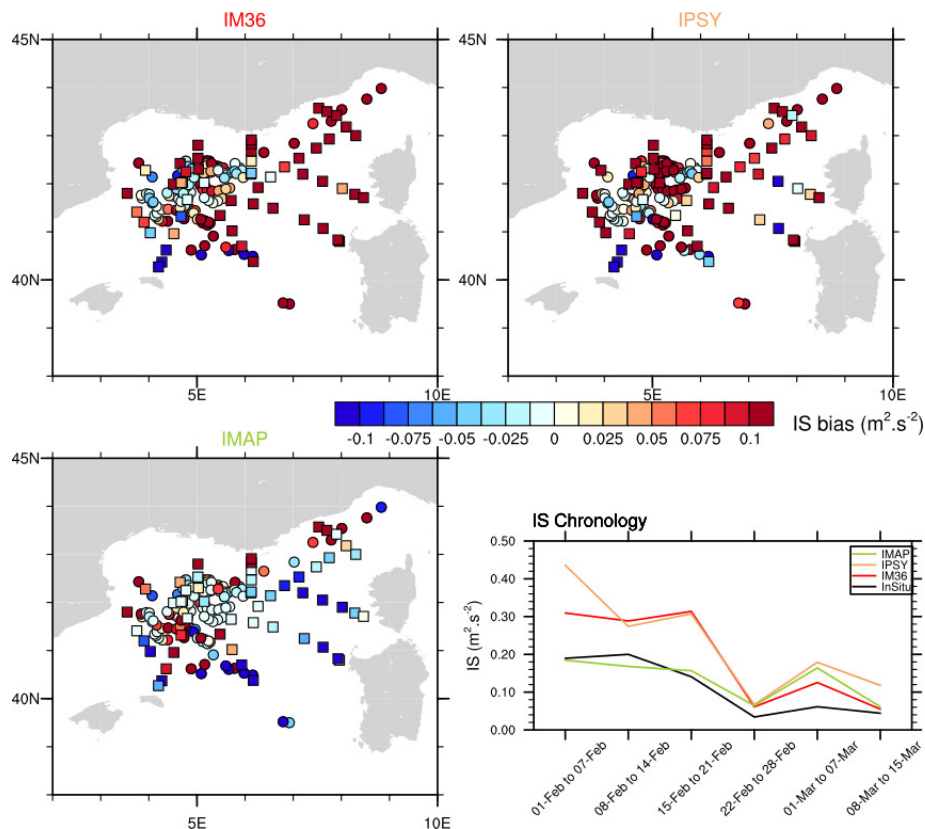


FIGURE 3.13 : Biases en IS (en  $m^2/s^2$ ) par rapport aux profils in-situ (flotteurs ARGOs et CTDs du R/V Le Suroît) pour IM36 (en haut à gauche; initialisation à partir d'une simulation régionale MED36), IPSY (en haut à droite; initialisation à partir des analyses PSY2 de Mercator Océan), et IMAP (en bas à gauche; initialisation à partir des analyses ASICS-Med). En bas à droite : Séries temporelles pendant la SOP2 de l'IS observée et simulées. Figure extraite de Léger et al. (2016).

logie et d'extension spatiale aux conditions initiales, en particulier à l'indice de stratification (IS, Fig. 3.13) précédant la convection. Les meilleures caractéristiques  $\theta$ ,  $S$  des eaux denses formées ont été obtenues avec la simulation ayant un état initial issu de l'analyse assimilant un grand nombre de données in-situ et satellite (Léger et al., 2016). En utilisant les résultats de WMED36, l'étude fine des mécanismes de formation d'eau dense à l'aide de bilan en vorticité potentielle (Giordani et al., 2017) sur la SOP2 HyMeX (Estournel et al., 2016) a mis en évidence le rôle significatif de la circulation du bassin, des interactions vent-surface, mais aussi des tourbillons de petite taille à la bordure du patch convectif sur la formation d'eau dense. En effet, ces structures océaniques fines produisent de forts gradients de température de surface qui influencent les flux air-mer et la couche limite atmosphérique par ajustement. Ces structures sont également le siège de mouvements verticaux intenses et sont ainsi des vecteurs ou à l'inverse des inhibiteurs de mélange.

Au début de la thèse de César Sauvage, une nouvelle maquette de NEMO, NWMED72, couvrant le bassin méditerranéen nord-occidental (Fig. 3.14) avec une résolution horizontale de  $1/72^\circ$  ( $\sim 1.2$  km), une nouvelle bathymétrie et une grille verticale raffinée près de la surface (épaisseur du premier niveau de 50 cm et 24 niveaux dans les 30 premiers mètres) a été développée dans l'objectif d'être couplée au modèle AROME-France (voir en section 3.2.3.3). Dans un premier temps, nous avons examiné l'impact d'une amélioration de la contrainte hydrodynamique côtière, en particulier en améliorant la représentation des débits et du ruissellement côtier. Partant du constat que dans la modélisation régionale en Méditerranée, ceux-ci sont imposés au compartiment océanique sous la forme d'un flux d'eau douce à la surface et à partir d'une climatologie mensuelle, nous avons travaillé afin de décrire de manière plus

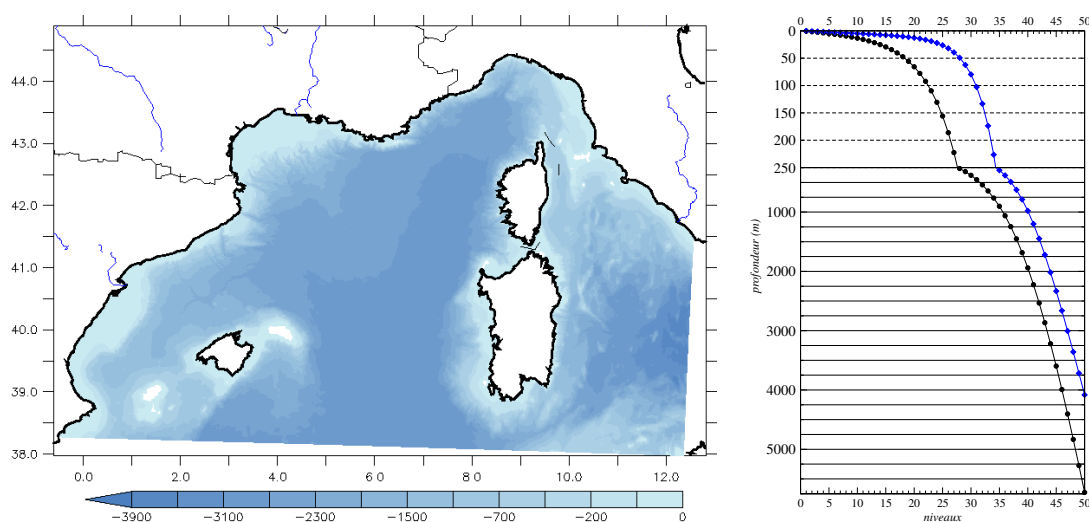


FIGURE 3.14 : Domaine du modèle NEMO-NWMED72 illustré par sa bathymétrie (m) à gauche. A droite, détails de la grille verticale à 50 niveaux en bleu (la grille verticale à 50 niveaux de MED12 et WMED36 est indiquée pour information en noir).

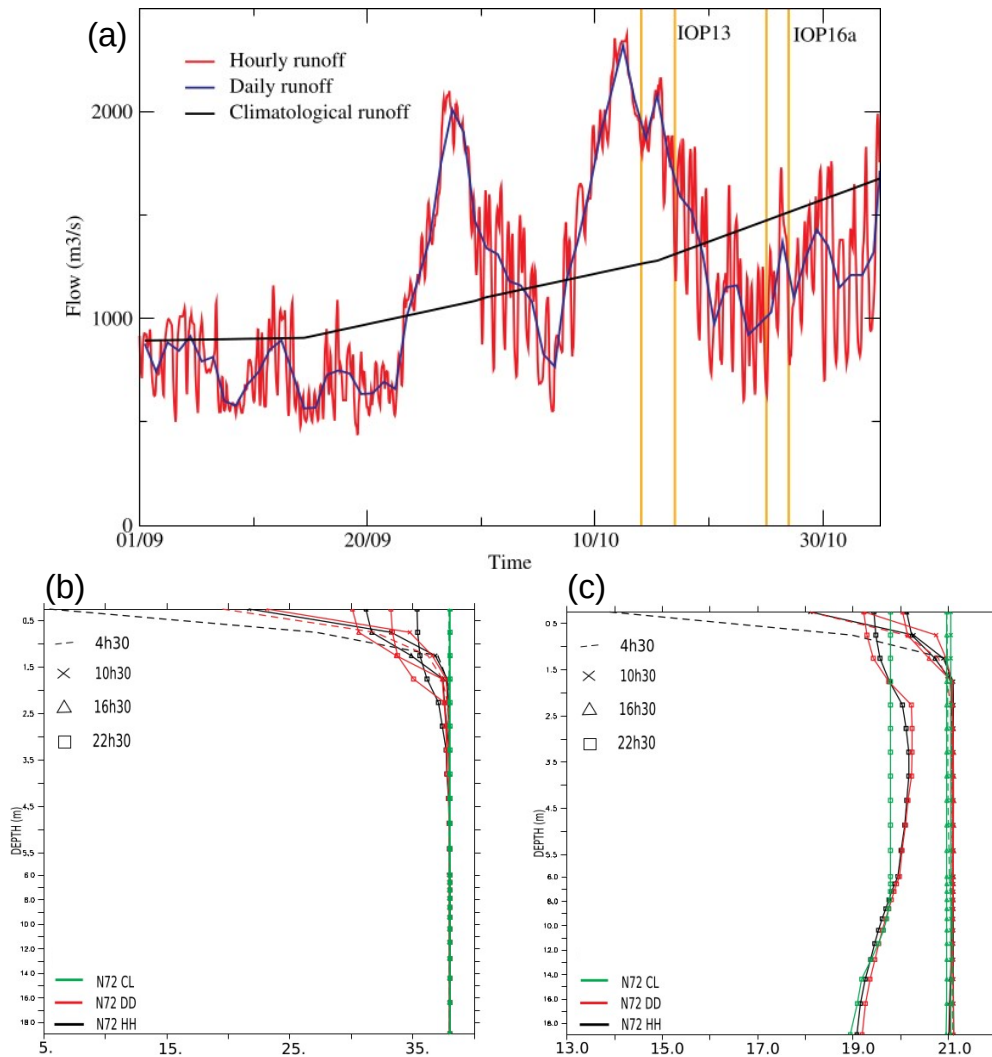


FIGURE 3.15 : (a) Débits ( $m^3/s$ ) sur la SOP1 d'HyMeX pour le Rhône dans la climatologie mensuelle (en noir; Beuvier et al., 2012b, lissage temporel appliqué par NEMO), observés (source : <http://www.hydro.eaufrance.fr>) à fréquence quotidienne (en bleu) et horaire (en rouge). Profils verticaux en (b) salinité (psu) et (c) température ( $^{\circ}C$ ) près de l'Argens (Var) pendant la journée du 27 octobre 2012 (IOP16a) avec le forçage climatologique (N72\_CL) en vert, les observations de débits à fréquence quotidienne (N72\_DD) en rouge et horaire (N72\_HH) en noir. La grille verticale est zoomée pour les 6 premiers mètres. Figures extraites de Sauvage et al. (2018).

réaliste les exports d'eau douce, notamment en période de crue, qui contribuent significativement au bilan hydrologique de la région. Un travail de collecte et de traitement des données observées de débits a été réalisé dans un premier temps, comme illustré dans la Figure 3.15a, et les fichiers de forçage pour les maquettes océaniques WMED36 et NWMED72 ont été obtenus, couvrant la SOP1 d'HyMeX. Une meilleure description du débit des rivières a également été évaluée dans NEMO-NWMED72 en imposant une distribution des débits sur la verticale. Les tests de sensibilité montrent que la stratification océanique est significativement modifiée localement. La salinité de surface est fortement réduite lorsque les observations de débits sont utilisées en lieu et place de la climatologie, tout comme la CMO qui devient plus



fine, limitée par une halocline marquée (Fig. 3.15b). La température de surface est également impactée par le changement du forçage des débits (Fig. 3.15c). De plus, les courants associés aux panaches des rivières sont intensifiés. Lorsque le débit est distribué verticalement, les profils verticaux de température et salinité, ainsi que la profondeur de la CMO sont modifiés. A l'échelle régionale ou sous-régionale, les différences obtenues sont apparues limitées mais le réalisme du forçage des débits a été grandement amélioré et des impacts locaux sur les basses couches atmosphériques peuvent être attendus en mode couplé (Sauvage et al., 2018).

Une dernière configuration de NEMO a été mise au point pour l'étude numérique du *medicane* Qendresa ayant affecté l'île de Malte en novembre 2014. Cette configuration nommée SICIL36 correspond à un sous-domaine de MED36, entre 9 et 19.5°E et entre 30 et 42°N, et utilise les mêmes paramétrisations physiques que MED36 et WMED36. Cette configuration a été utilisée uniquement en mode couplé avec le modèle atmosphérique MESO-NH (Bouin et Lebeaupin Brossier, 2020b,a). L'étude de Bouin et Lebeaupin Brossier (2020a) montre notamment par des bilans de couche de mélange que le refroidissement de l'océan induit par le *medicane* est assez semblable à celui d'un cyclone tropical de faible intensité, avec une prédominance des flux de chaleur sur le mélange turbulent, et une modulation importante due au pré-conditionnement (présence d'un tourbillon froid). Néanmoins, une différence importante par rapport aux cyclones tropicaux faibles concerne le rôle des précipitations intenses se produisant au début de l'événement, qui renforcent de façon significative le refroidissement de surface via un effet de barrière de sel.

### 3.2.3.2 L'interface de couplage sans couture SURFEX-OASIS

Techniquement, une large partie du travail de développement de système couplé à fine échelle consistait à relier le modèle atmosphérique (AROME ou MESO-NH) et son schéma de surface SURFEX au coupleur OASIS. Au même moment, en 2014, débutait la préparation de la nouvelle version du système couplé du climat global CNRM-CERFACS (CNRM-CM) pour la 6<sup>ème</sup> phase du projet d'inter-comparaison des modèles de climat (CMIP6) qui incluait de larges modifications de l'interface de couplage dont l'objectif était de passer le couplage CTRIP (version CNRM du modèle de routage *Total Runoff Integrating Pathways*, Decharme et al., 2010) - SURFEX/ISBA (*Interactions between Soil, Biosphere, and Atmosphere*, Noilhan et Planton, 1989) par OASIS (et non plus de manière directe) et de déplacer un maximum de routines d'appel à OASIS dans SURFEX (i.e. là où les échanges surface-atmosphère sont calculés) plutôt que dans ARPEGE-Climat (Déqué et al., 1994). Afin de mutualiser les développements autour des outils communs de couplage SURFEX et OASIS, un groupe de travail a été mis en place transversalement entre différents groupes au CNRM, le LOPS, le LA, le LACy, le service de prévision marine de Météo-France (DirOp/MAR) et Mercator

Océan International. D'abord effective pour CNRM-CM6 pour les couplages entre CTRIP–SURFEX–ARPEGE–Climat–NEMO–GELATO grâce au travail de Bertrand Decharme et de Aurore Voltaire, l'interface de couplage SURFEX-OASIS a été élargie pour permettre le couplage de modèles régionaux (par moi-même et Florence Sevault pour CNRM-RCSM) et pour ajouter le couplage avec un modèle de vague (par le travail de Joris Pianezze).

L'interface SURFEX-OASIS et ses utilisations dans différents systèmes couplés sont détaillées dans Voltaire et al. (2017) et seuls quelques principes généraux sont rapidement mentionnés ici. L'interface 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. 3.16). La construction d'une interface générique a été réalisée via des routines communes incluses dans une version officielle de SURFEX (à partir de la v8.0 pour le couplage avec l'hydrologie, l'océan et la glace de mer, dans la v9 pour le couplage vagues). La modularité et la compatibilité sont assurées de deux façons : 1) les appels à OASIS sont faits au travers des routines communes par SURFEX (dit OFFLINE) ou par le modèle atmosphérique pour l'initialisation, la définition du domaine et de la partition multi-processeurs et la finalisation, tandis que les envois et réceptions des champs sont uniquement gérés par SURFEX et 2) le(s) couplage(s) est(sont) possible(s) avec différents modèles (océaniques ou autres) déjà interfacés avec OASIS. Le choix des champs échangés est laissé à l'utilisateur grâce à la *namelist* et l'ajout de nouveaux champs de couplage (par exemple la salinité de surface pouvant jouer sur les flux ou l'émission d'aérosols marins) est facilité pour les développeurs par le nombre limité de routines à modifier.

En résumé, l'interface SURFEX-OASIS permet 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.

### 3.2.3.3 Modélisation couplée avec AROME

AROME est depuis 2008 le modèle opérationnel de prévision numérique du temps à échelle fine à Météo-France. Il a été conçu pour améliorer la prévision des phénomènes convectifs dangereux (orages, rafales, précipitations intenses), des événements locaux et de la météorologie de basses couches (vent, température, état du sol, îlot de chaleur urbain, turbulence, brouillard et faible visibilité). Les paramétrisations physiques du modèle sont héritées du modèle de recherche MESO-NH alors que la partie dynamique est une adaptation pour la fine échelle du noyau dynamique du modèle spectral ALADIN. Actuellement, le modèle AROME a une résolution de 1.3km sur l'horizontale et 90 niveaux verticaux dont le premier niveau est à 5m au-dessus du sol. AROME produit cinq prévisions déterministes par jour sur la France métropolitaine pour des échéances de prévisions allant jusqu'à 42h. L'initialisation

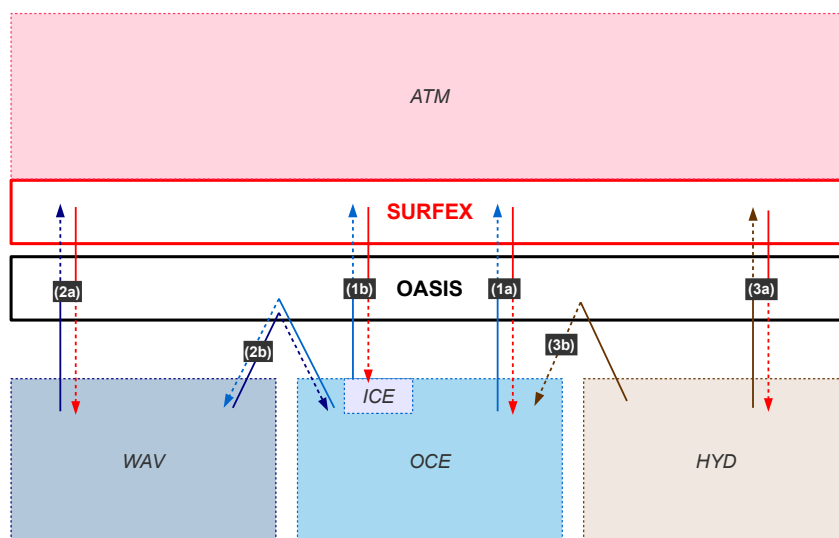


FIGURE 3.16 : Schéma de l'architecture des systèmes couplés centrés autour de l'interface de couplage SURFEX-OASIS. Voir Voltaire et al. (2017) pour la description complète.

du modèle est réalisée par un système d'assimilation de données variationnelle 3D-Var intégrant des données de méso-échelle (stations de surface, réflectivités et vent radial Doppler issus d'observations radar, notamment).

Malgré sa résolution, son schéma d'assimilation propre adapté à ces échelles et une physique de surface détaillée grâce à l'utilisation de SURFEX, les analyses de SST AROME utilisées pour la prévision ne permettent généralement pas de représenter les structures océaniques fines et les anomalies de surface formées rapidement. Ceci est dû à une résolution spatiale effective trop lâche dans l'ébauche et à un terme de rappel vers l'analyse OSTIA (voir Rainaud et al., 2016, pour la description du rappel), mais aussi à un manque d'observations assimilées, notamment près des côtes et en situation nuageuse. Un système de prévision couplé permet d'avoir une évolution océanique explicite à échelle fine et en cohérence avec les successions d'évènements météorologiques.

Le couplage entre AROME et NEMO a été développé en 2015 et a tout d'abord été appliqué à la Méditerranée occidentale (WMED, Fig. 3.17) en combinant AROME-WMED (cy38t1 à 2.5km de résolution Fourrié et al., 2015) et WMED36 (Lebeaupin Brossier et al., 2014), configurations dédiées à l'étude des périodes d'observations spéciales (SOPs, pour *Special Observation Periods*) d'HyMeX à l'automne 2012 et l'hiver 2013.

Le système AROME-NEMO WMED a permis d'évaluer l'impact du couplage pour deux situations fortement précipitantes de la SOP1 : les POIs 13 et 16a/b (Rainaud, 2015; Rainaud et al., 2017). Pour chaque cas, l'expérience couplée a été comparée à deux simulations AROME (atmosphère seule, sans évolution de SST) : l'une forcée par l'analyse de SST, l'autre utilisant la SST de l'expérience couplée. Ceci permet de distinguer l'effet du champ

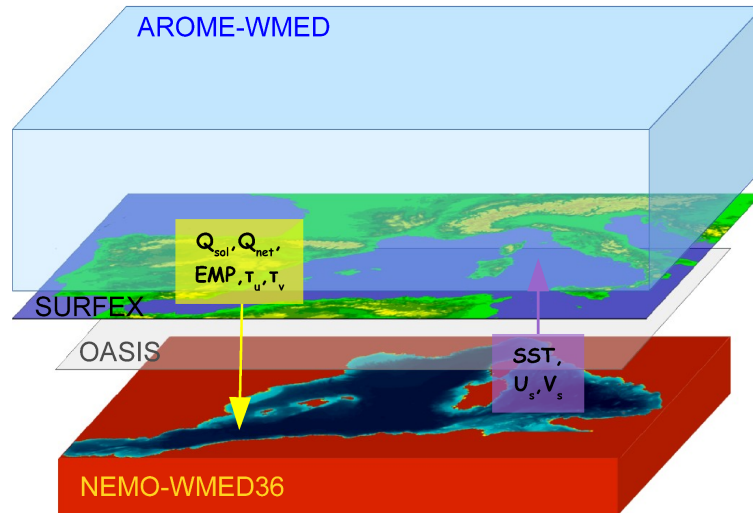


FIGURE 3.17 : Le système couplé AROME-NEMO sur la zone WMED. Figure extraite de Rainaud et al. (2017).

initial de SST de l'effet d'un océan 3D interactif. Les résultats confirment que la SST initiale modifie la prévision du système précipitant en terme d'intensité et de localisation. L'océan 3D interactif contribue quant à lui significativement à la diminution de l'évaporation (de -10% à -20%, Fig. 3.18), donc à l'apport d'humidité pour le système précipitant. En cas de mistral (POI 16b), 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.

Utilisé pour simuler deux mois incluant la SOP2 pour estimer l'effet du couplage sur la

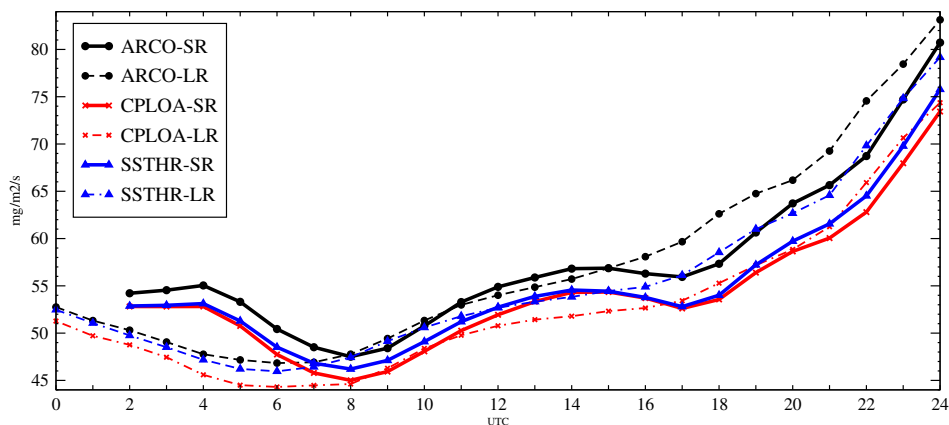


FIGURE 3.18 : Evaporation moyenne ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$ ) sur le bassin pour le 14 octobre 2012 (IOP13) dans l'expérience AROME-WEMED forcé par l'analyse de SST AROME (ARCO), la prévision couplée AROME-NEMO WMED (CPLOA) et la prévision AROME-WMED avec la SST initiale de CPLOA (SSTHR, voir Rainaud et al., 2017, pour le protocole expérimental). "SR" désigne les prévisions courtes échéances (débutant le 14 oct à 00 UTC) et "LR" les prévisions "longues échéances" (débutant le 13 oct 00 UTC).

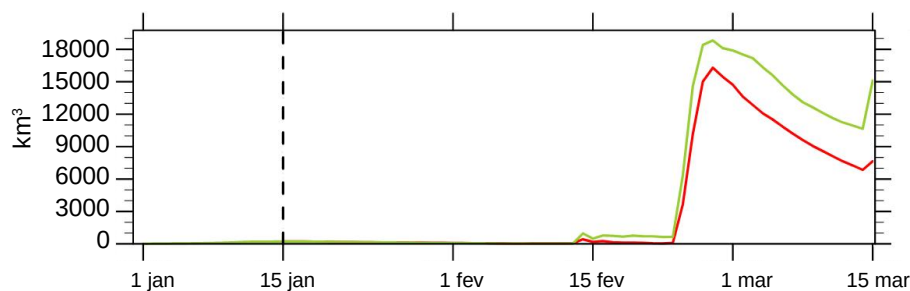


FIGURE 3.19 : Evolution du volume d'eau (en  $\text{km}^3$ ) plus dense que  $29.12 \text{ kg/m}^3$  dans la simulation WMED36 forcée (IMAP) en vert et dans la simulation couplée AROME-NEMO WMED (CPL) en rouge (Lebeaupin Brossier et al., 2017).

formation d'eau dense, AROME-NEMO WMED montre que, si les différences obtenues sur les flux turbulents sont faibles, les taux de formation sont modifiés significativement par le couplage (-27% pour les eaux plus denses que  $29.12 \text{ kg/m}^3$  comparés à la simulation océanique forcée, Fig. 3.19). Les processus océaniques fins comme le *cascading* et les tourbillons à la périphérie de la zone de convection sont beaucoup plus sensibles au couplage. Ces processus interagissent directement avec le vent en basses couches et la convection océanique et sont donc des vecteurs de propagation des effets du couplage dans la couche mélangée et dans les couches océaniques profondes (Lebeaupin Brossier et al., 2017).

Pendant la thèse de César Sauvage, nous avons construit les couplages pour le modèle atmosphérique kilométrique opérationnel de Météo-France, AROME-France, avec le modèle de vagues WaveWatchIII (WW3 ci-après Tolman, 1992) puis NEMO-NWMED72 (Fig. 3.20) et évaluer l'impact des couplages sur le cas d'épisode méditerranéen survenu entre le 12 et le 14 octobre 2016 dans le Sud-Est de la France. Ce cas constitue un cas particulièrement intéressant pour analyser l'impact de l'état de mer, car il était caractérisé par un fort vent d'Est ( $>20 \text{ m/s}$ ) 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 interaction avec le vent de basses couches.

Dans un premier temps, nous avons donc inséré et utilisé le couplage interactif entre AROME-France et WW3 à résolution kilométrique et la paramétrisation *Wave-Age-dependent Stress Parametrization* (WASP, voir la section 3.3) développée par Marie-Noëlle Bouin qui permet de reproduire le comportement physique du coefficient Charnock en fonction du régime de vent ainsi que sa dépendance aux vagues (Sauvage et al., 2020). Les résultats des tests de sensibilité ont montré que la prise en compte de l'état de mer 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 (Fig. 3.21 et 3.22) ce qui conduit à un déplacement de la zone de convergence à l'origine du système en mer et donc sa localisation (Fig. 3.23). Les flux de chaleur ont été finalement peu modifiés par la prise en compte des

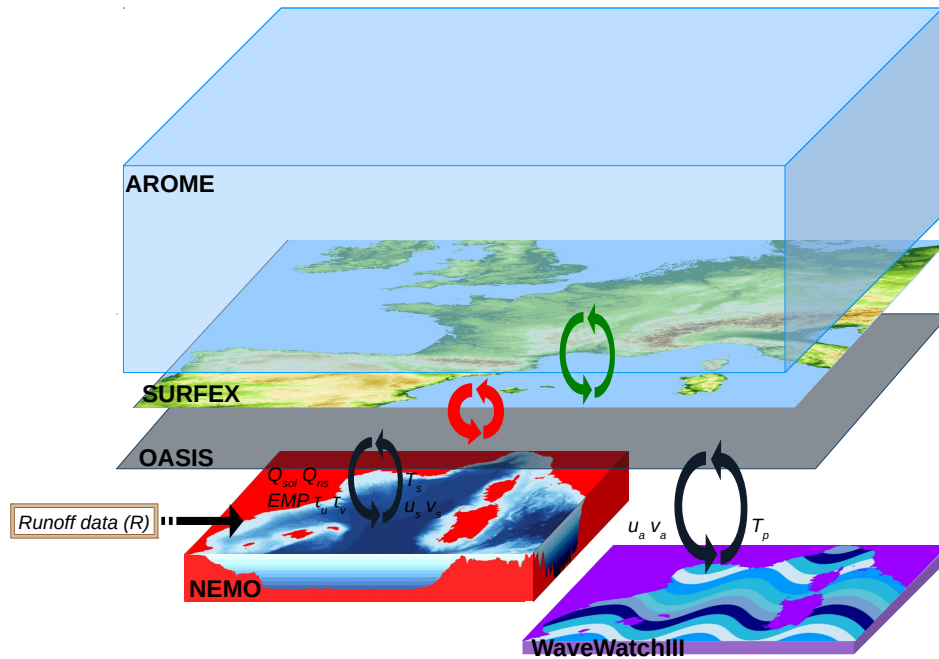


FIGURE 3.20 : Architecture du système couplé AROME-NEMO-WW3 : Le domaine d'AROME-France est indiqué par le relief (boîte SURFEX) et le domaine NWMED72 par la bathymétrie (boîte NEMO). Figure extraite de Sauvage et al. (2021).

vagues (-3% sur le flux de chaleur latente dans la zone Azur sur les premières 24 heures) 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 impacter de manière significative les échanges de chaleur à l'interface air-mer durant un épisode méditerranéen. Toutefois, sa prise en compte apparaît comme étant 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 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 :

- Le couplage interactif avec l'océan a introduit une modification du champ de SST initial (voir Figure 3.1e) et conduit à des modifications dans l'alimentation en chaleur et humidité des systèmes fortement précipitants (+6% pour le flux de chaleur latente dans la zone Azur pendant les phases 1 et 2, Fig. 3.21 et 3.22), confirmant ainsi les résultats obtenus par Rainaud et al. (2017). L'évolution interactive de l'océan, *i.e.* le refroidissement de surface, permet de rapidement modérer les flux de chaleur simulés (Fig. 3.22).
- Le couplage avec un modèle de vagues conduit principalement à modifier la dyna-

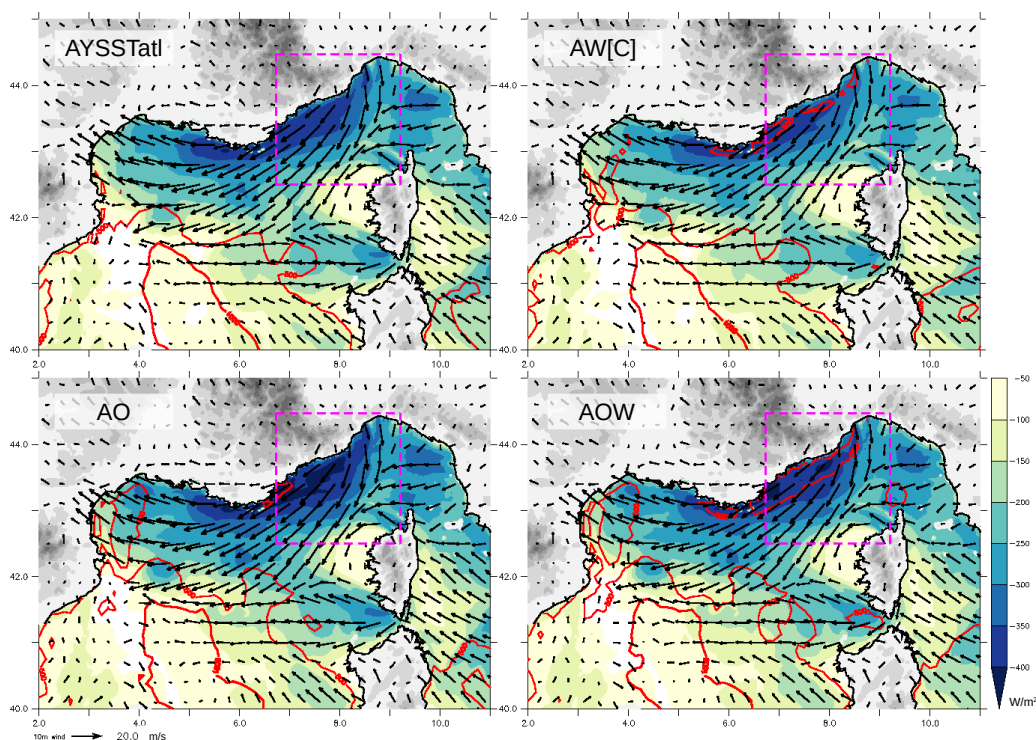


FIGURE 3.21 : Enthalpie ( $H + LE$  en  $W/m^2$ , négative pour une perte de chaleur de l’océan) et CAPE (isolignes rouges pour 500 et 1000  $J/kg$ ) moyennes entre 03 et 18 UTC le 13 octobre 2016 (phase 1 de l’évènement), et vent à 10 mètres ( $m/s$ , flèches) à 18 UTC le 13 octobre 2016 dans les simulations forcée en SST (AYSSatI), couplées atmosphère-vagues (AW), océan-atmosphère (AO), océan-atmosphère-vagues (AOW) de Sauvage et al. (2020, 2021). La zone d’échanges air-mer intenses, dite "Azur", est indiquée par le rectangle pointillé.

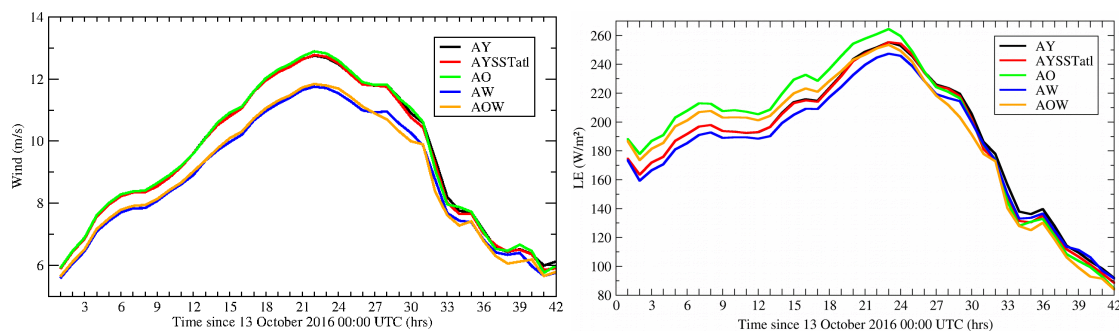


FIGURE 3.22 : Evolutions temporelles du vent à 10 mètres ( $m/s$ ) et du flux de chaleur latente ( $LE$ ,  $W/m^2$ ) en moyenne pour la zone Azur (voir Figure 3.21) pour les différentes prévisions forcées et couplées démarrant le 13 octobre 2016 à 00 UTC (voir Sauvage et al., 2021).

mique 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 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 (Fig. 3.23), rappelant les résultats

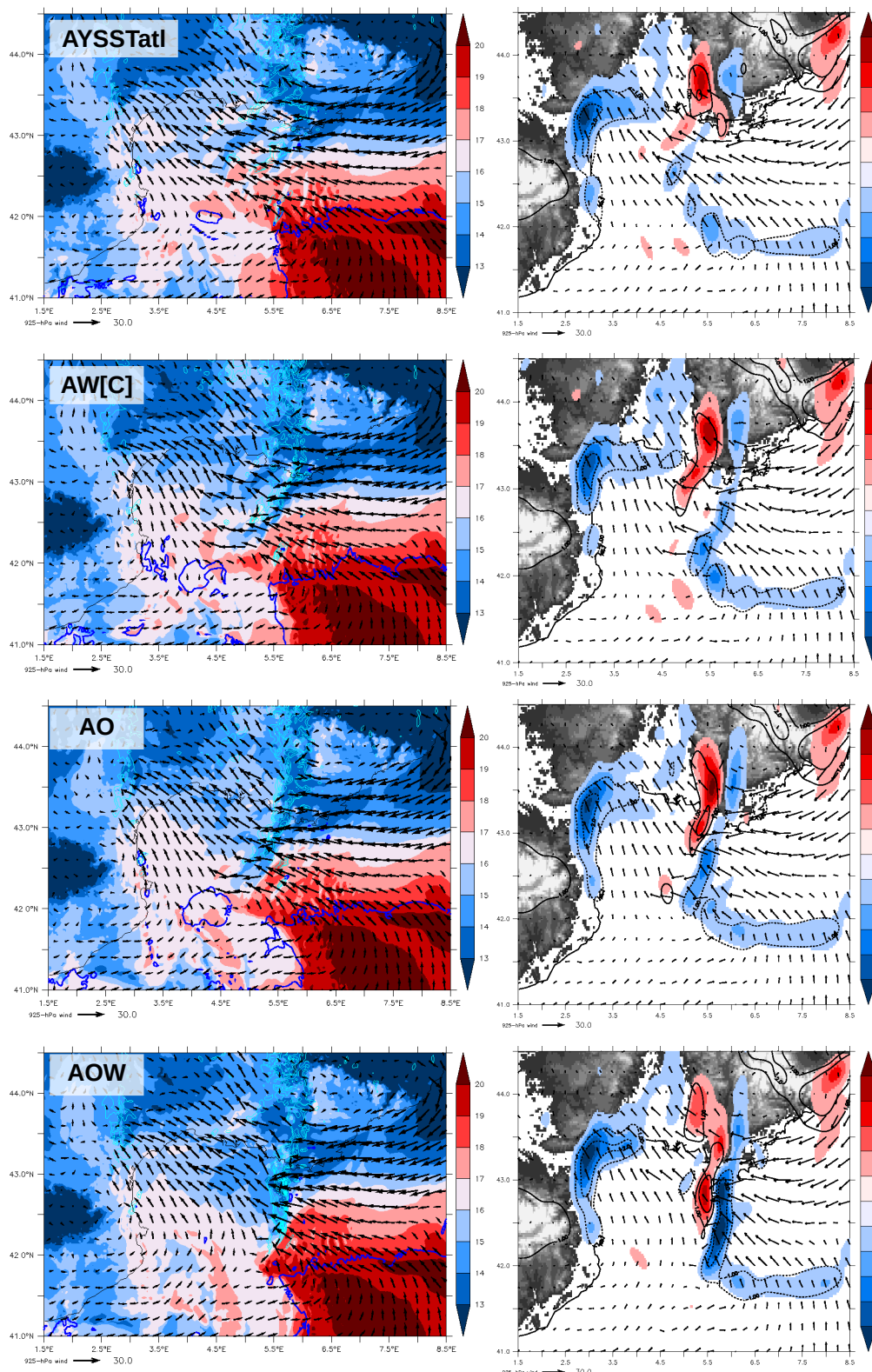


FIGURE 3.23 : A gauche :  $\theta'_w$  (°C) et vent (m/s, flèches) à 925 hPa, CAPE (>750 J/kg, ligne bleu foncé) et réflectivités à 2000 m (dBz, ligne bleu clair). A droite : Divergence des vents ( $10^{-3} s^{-1}$ ) et vitesse verticale ( $Pa.s^{-1}$ , contours noirs) à 950 hPa, et vent à 925 hPa (m/s, flèches); le 14 octobre à 00 UTC pour AYSSTatl, AW[C], AO et AOW (prévisions démarrant le 13 octobre 2016 à 00 UTC).



de tests de sensibilité à la SST sur d'autres cas fortement précipitants (Lebeauupin 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 tel que vu par Thévenot et al. (2016) et Bouin et al. (2017). Le deuxième système fortement précipitant localisé sur l'Hérault est lui apparu peu sensible aux différentes expériences de couplage. Grâce à l'analyse de mécanismes nous avons su montrer que cette faible sensibilité venait du fait que le déclenchement de ce système est contrôlé par le phénomène de soulèvement orographique avec une localisation bien définie.

Aujourd'hui je continue largement de développer et utiliser le système couplé AROME-NEMO qui a pu bénéficier d'avancées réalisées ces trois dernières années dans le cadre d'une collaboration avec Mercator Ocean International, tout d'abord au travers du travail de Joris Pianezze en 2020 (postdoc CMEMS à MOI) pour la mise au point d'un démonstrateur de système couplé régional (zone eIBI, pour *extended-IBI*) pour la prévision océanographique opérationnelle (2-3 km de résolution, échéances jusqu'à 7 jours). Ce travail, valorisé par la publication d'un article (Pianezze et al., 2022), a permis le déploiement du couplage sur le nouveau HPC de Météo-France (*belenos*), le passage à une nouvelle version de NEMO (v4.2) et l'insertion de nouveaux champs de couplage dans la physique des deux modèles : la prise en compte des courants de surface dans la paramétrisation de la turbulence 1D d'AROME (Lemarié, 2015; Renault et al., 2019) et la prise en compte de la pression atmosphérique de surface pour l'effet du baromètre inverse (e.g. Oddo et al., 2014).

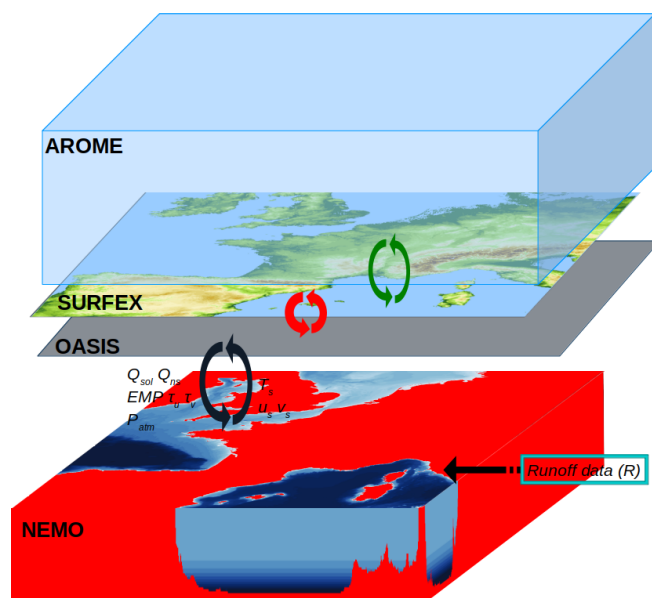


FIGURE 3.24 : Schéma du système couplé AROME-NEMO sur la France métropolitaine : Le domaine d'AROME-France est indiqué par le relief (boîte SURFEX) et le domaine FRA36 par la bathymétrie (boîte NEMO).

D'autre part, un couplage avec AROME-France d'une configuration NEMO (à  $1/36^\circ$ , Fig. 3.24) directement déclinée du système eIBI en terme de domaine et bathymétrie, de conditions initiales et latérales et de physique étendu (par rapport à NWMED) pour concerner la zone Atlantique, Manche et mer du Nord a été réalisé entre 2021-2022 notamment dans le cadre de deux stages en co-encadrements avec Jonathan Beuvier (MOI) : le stage de Master 1 de Jeanne Millot-Weil évaluant différentes conditions initiales océaniques et forçages atmosphériques, et, le stage de Master 2 de Quentin Misi sur le rôle de la stratification océanique sur les processus couplés.

La possibilité de couplage avec un modèle de vagues reste totalement maintenue à travers SURFEX (dans sa dernière version v9) et a été intégrée à la dernière version de NEMO (v4.2) en suivant les travaux de Couvelard et al. (2020). Pour progresser sur le sujet, la thèse de Fleur Nicolay va permettre la définition du système de modélisation des vagues (MFWAM) régional et kilométrique et ses couplages avec l'atmosphère et l'océan, en collaboration avec l'équipe R&D du service de prévision marine (voir chapitre 4).

Au cours de mes différentes analyses d'expériences numériques couplées ou forcées, la question de l'importance et de la validité des flux de surface est toujours apparue centrale. Lorsque la sensibilité au couplage a été mise en parallèle avec les tests de sensibilité à la paramétrisation des flux turbulents de surface, il en est toujours ressorti que le choix de la paramétrisation des flux turbulents a un impact de même ampleur voire plus important pour la prévision d'un épisode méditerranéen que le couplage avec un océan interactif. L'effet dynamique qui est notamment produit en considérant le forçage ou couplage des vagues dans le calcul du stress, est apparu particulièrement important pour la prévision d'un épisode méditerranéen et il apparaît nécessaire de l'évaluer pour d'autres systèmes météorologiques à enjeu.

La section suivante synthétise les différentes analyses numériques des flux turbulents de surface que j'ai réalisées et présente quelques éléments de discussion.

### 3.3 Flux turbulents air-mer

Au cours de mes travaux j'ai examiné la sensibilité de simulations atmosphériques et couplées à haute-résolution à la paramétrisation des flux sur mer dans le cadre d'évènements fortement précipitants méditerranéens. Il s'agit en effet d'une question centrale pour l'étude des interactions air-mer et pour la modélisation couplée, alors même que les mesures directes sont particulièrement rares et toujours associées à d'importantes incertitudes, avec des processus en jeu multiples et à divers échelles (de la bulle jusqu'aux phénomènes synoptiques).

Dans la suite je présente les éléments principaux des paramétrisations des flux turbulents air-mer que j'ai utilisées ces dernières années, les conséquences pour la compréhension des échanges liés aux systèmes fortement précipitants méditerranéens et les implications pour la prévision couplée.

### 3.3.1 Paramétrisations

Les paramétrisations des flux turbulents air-mer que j'ai considérées sont des paramétrisations *bulk* itératives : la paramétrisation interne Météo-France ECUME (*Exchange Coefficients from Unified Multi-campaigns Estimates*, Belamari, 2005; Belamari et Pirani, 2007; Roehrig et al., 2020) basée sur une calibration multi-campagnes des coefficients d'échanges, la paramétrisation COARE (version 3.0, Fairall et al., 2003) largement utilisée par la communauté de modélisation et d'observations (satellites notamment), et plus récemment la paramétrisation WASP (Sauvage et al., 2020, 2021; Bouin et al., 2023) permettant la prise en compte des effets de la mer du vent et la variabilité associée. Les détails de ces paramétrisations peuvent être trouvés dans les publications de référence, et dans Lebeau-pin Brossier (2007) ou dans la documentation scientifique de SURFEX (Le Moigne, 2018) pour ECUME et COARE. Les trois paramétrisations citées fonctionnent sur algorithme itératif proche mais diffèrent par leurs relations de fermeture. Seules les principales caractéristiques sont reprises ici.

Les flux turbulents ( $\vec{\tau}$  pour le flux de quantité de mouvement également appelé stress du vent,  $H$  pour le flux de chaleur sensible et  $LE$  pour le flux de chaleur latente) dépendent des gradients de vitesse, de température, et d'humidité à l'interface air-mer et des coefficients de transfert  $C_D$ ,  $C_H$  et  $C_E$ , respectivement.

Ainsi, le stress du vent s'exprime comme :

$$\vec{\tau} = (\tau_u, \tau_v) = \rho_a C_D \|\vec{U}_s - \vec{U}_a\| (\vec{U}_s - \vec{U}_a) \quad (3.2)$$

où  $\rho_a$  est la densité de l'air,  $\vec{U}_a = (u_a, v_a)$  est le vent horizontal du premier niveau atmosphérique (le plus proche de la surface) et  $\vec{U}_s = (u_s, v_s)$  est le courant océanique de surface (nul en l'absence de couplage).

Les flux de chaleur sont calculés par les formules *bulk* suivantes :

$$H = \rho_a c_{pa} C_H \|\vec{U}_s - \vec{U}_a\| \Delta\theta \quad (3.3)$$

$$LE = \rho_a L_v C_E \|\vec{U}_s - \vec{U}_a\| \Delta q \quad (3.4)$$

où  $c_{pa}$  est la capacité calorifique de l'air,  $L_v$  la constante de chaleur latente de vaporisation de l'eau.  $\Delta\theta$  et  $\Delta q$  représentent les gradients de température potentielle et d'humidité spécifique,

respectivement. L'humidité spécifique de l'océan est estimée par une fonction de la SST.

Les coefficients de transfert sont obtenus par l'équation :

$$C_X = c_x^{\frac{1}{2}} c_d^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

où  $X/x$  désignent  $D/d$  pour le coefficient pour stress du vent (également désigné par le terme de *drag coefficient*),  $H/h$  le coefficient pour la chaleur sensible et  $E/e$  celui pour la chaleur latente. Les coefficients  $c_x^{\frac{1}{2}}$  sont fonctions de  $\psi_x(\zeta)$  qui décrit la stabilité,  $\zeta$  est le rapport  $z/L$  où  $L$  est la longueur de Monin-Obukhov et  $z$  est la hauteur de référence (i.e. l'altitude du premier niveau du modèle atmosphérique) :

$$c_x^{1/2}(\zeta) = \frac{c_{xn}^{1/2}}{1 - \frac{c_{xn}^{1/2}}{\kappa} \psi_x(\zeta)} \quad (3.6)$$

Dans la paramétrisation ECUME, les coefficients de transfert neutres  $c_{xn}$  (correspondant à un état  $\zeta = 0$ ) sont directement obtenus par des polynômes du vent neutre à 10m :

$$c_{xn} = \mathcal{P}_x(\|U_a^{10n}\|) \quad (3.7)$$

construits à partir d'une calibration multi-campagne.

Les paramétrisations COARE et WASP font elles intervenir dans le calcul des coefficients d'échange neutres, la (ou les) longueur(s) de rugosité  $z_0$  ( $z_{0x}$  pour les échanges de chaleur) :

$$c_{xn}^{1/2} = \frac{\kappa}{\ln(z/z_{0x})} \quad (3.8)$$

où  $\kappa$  est la constante de Von Karman.

La longueur de rugosité  $z_0$  est classiquement calculée par la formulation de Smith (1988) qui est composée de deux termes correspondants à la relation de Charnock (Charnock, 1955) et à une contribution visqueuse :

$$z_0 = \alpha_{ch} \frac{u_*^2}{g} + 0.11 \frac{\nu}{u_*} \quad (3.9)$$

où  $\nu$  est la viscosité de l'air sec,  $u_*$  est un paramètre d'échelle correspondant à la vitesse de friction et  $\alpha_{ch}$  est le coefficient de Charnock.

Dans COARE, la relation de Smith (1988) utilisée par défaut fait intervenir une dépendance au vent du coefficient de Charnock ( $\alpha_{ch} = f(Ua)$ ), mais deux autres formulations pour calculer  $z_0$  sont également possibles afin de prendre en compte les vagues : soit la formulation

de Oost et al. (2002) (Eq. 3.10), soit celle de Taylor et Yelland (2001) (Eq. 3.11).

$$z_0 = \frac{50}{2\pi} L_{wv} \left( \frac{u_*}{C_{wv}} \right)^{4.5} + 0.11 \frac{\nu}{u_*} \quad (3.10)$$

$$z_0 = 1200 H_{wv} \left( \frac{H_{wv}}{L_{wv}} \right)^{4.5} + 0.11 \frac{\nu}{u_*} \quad (3.11)$$

où  $L_{wv}$  représente la longueur d'onde,  $C_{wv}$  la vitesse de phase, et  $H_{wv}$  la hauteur des vagues fournies explicitement ou paramétrées en fonction du vent au premier niveau.

Dans WASP,  $z_0$  est calculée par l'Equation 3.9 de Smith (1988) avec une dépendance à l'âge des vagues ( $\chi$ ) directement traduite au travers du coefficient de Charnock ( $\alpha_{ch}$ ) qui est défini comme une fonction puissance de  $\chi$  :

$$\alpha_{ch} = A\chi^{-B} \quad (3.12)$$

où  $\chi$  est défini comme :

$$\chi = \frac{gT_p}{2\pi\|\vec{U}_a\|} \quad (3.13)$$

avec  $g$  l'accélération de la gravité.  $T_p$  est la période pic des vagues correspondant à la mer du vent, c'est-à-dire les vagues générées localement par le vent, en croissance (si  $\chi < 0.8$ ) ou à l'équilibre (si  $0.8 \leq \chi < 1.2$ ), et alignées avec le vent local, fournies explicitement par un forçage ou couplage, ou calculée en fonction du vent au premier niveau ( $T_p = 0.5U_a$ ).

### 3.3.2 Échanges turbulents et précipitations intenses

Dans les situations fortement précipitantes que j'ai étudiées, les flux de chaleur sont toujours apparus plutôt modérés comparés à d'autres situations météorologiques intenses, notamment les cyclones tropicaux pour lesquels les interactions air-mer servent de référence aux études couplées. Ceci s'explique d'une part par la gamme de valeur de vent rencontrée pour ces phénomènes (entre 15 et 25 m/s), un gradient de température moins important qu'en région tropicale et d'autre part par la proche saturation de l'air en basses couches en amont de l'évènement et parfois en amont de la région méditerranéenne, limitant les échanges.

Néanmoins, les différences obtenues en changeant de paramétrisation sont apparues importantes en comparaison aux précédentes modifications obtenues par des changements de SST (Lebeaupin Brossier et al., 2008) ou par le couplage (Lebeaupin Brossier et al., 2009). Des prévisions AROME forcées réalisées à la fin de la thèse de César Sauvage (2019) sur le cas d'octobre 2016 variant uniquement par la paramétrisation des flux turbulents illustrent bien la forte sensibilité des flux de chaleur. La Figure 3.25 compare notamment le flux de chaleur latente sur la zone Azur marquée par de un fort vent et de forts échanges. Les différences obtenues (+10% pour ECUME et +12% pour COARE comparés à WASP sur les 42h

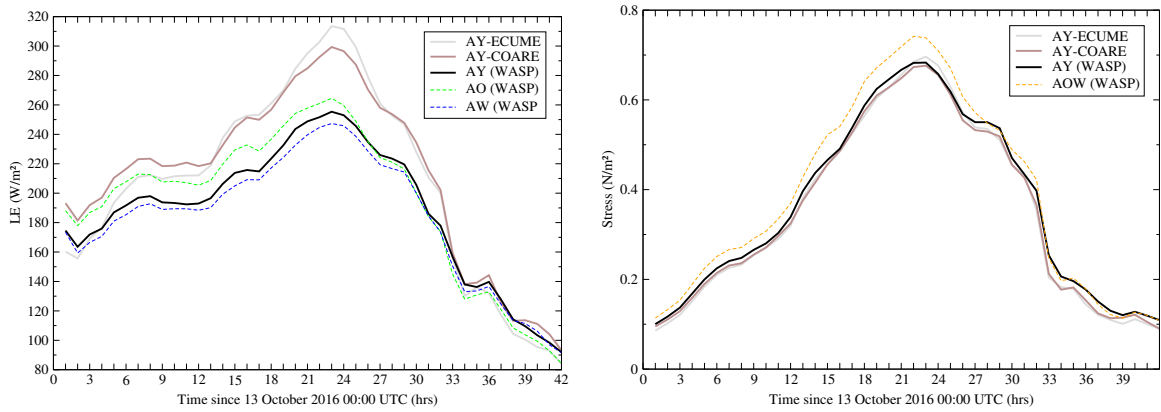


FIGURE 3.25 : Evolutions temporelles du flux de chaleur latente ( $LE$ ,  $W/m^2$ ) et du stress du vent ( $N/m^2$ ) en moyenne pour la zone Azur (voir Figure 3.21) pour les différentes prévisions AROME forcées utilisant les paramétrisations ECUME, COARE et WASP (AY) démarrant le 13 octobre 2016 à 00 UTC. Les évolutions dans les simulations couplées AW, AO et AOW sont données à titre indicatif pour la comparaison (voir aussi Fig. 3.22).

de prévision) sont d'un ordre de grandeur supérieur aux différences dues aux couplages et affecte la prévision sur une plus longue période, du fait qu'en mode forcé, les différences ne sont pas compensées par les évolutions interactives de la surface et couche superficielle océanique. Des différences importantes sur le flux de chaleur sensible sont également obtenues. Les flux de chaleur plus importants dans ECUME et COARE conduisent à une augmentation significative de l'alimentation en chaleur et humidité en basses couches ainsi que des quantités de précipitation prévues (+1% en mer et +18% sur l'Hérault avec ECUME, +4% et +9% pour COARE) s'apparentant finalement à des modifications dues à des différences de SST de l'ordre de  $\pm 1^\circ\text{C}$  (Sauvage, 2019) à  $\pm 1.5^\circ\text{C}$  (Lebeaupin Brossier et al., 2008).

Entre les trois paramétrisations discutées ici, le stress du vent est très peu modifié en l'absence d'informations sur l'état de mer que peuvent apporter soit le forçage ou le couplage, comme montré par la Figure 3.25. Dans le cas de modifications significatives apporté sur le stress, conduisant à des variations de vitesse du flux de basses couches, une sensibilité de la localisation a été obtenue et est illustré par la Figure 3.26. Dans le cas de la POI 8, le ralentissement du vent en basses couches conduit à une progression plus importante d'une poche froide formée à la côte Bouin et al. (2017). Dans le cas d'octobre 2016, le ralentissement du jet d'Est induit une position plus à l'Est de la convergence de basses couches (Sauvage et al., 2020, 2021). Ainsi, le raffinement lié à l'apport de la prise en compte des vagues dans la paramétrisation des flux conduit à plus de variabilité sur la thermodynamique localement mais a surtout pour effet principal la modification de la dynamique de basses couches.

De manière générale, les expériences numériques que j'ai réalisées montrent que les diffé-

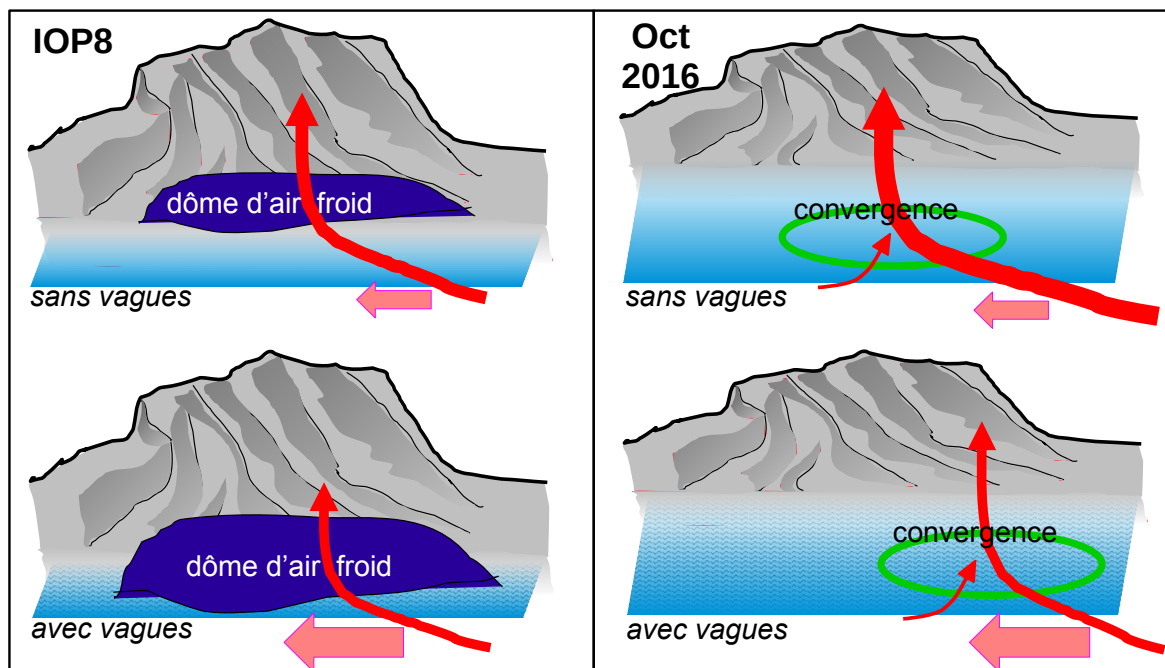


FIGURE 3.26 : Schémas décrivant l'impact de la prise en compte des vagues pour le cas de la POI8 (Bouin et al., 2017) à gauche et à droite pour le système convectif en mer pendant l'évènement du 12-14 octobre 2016 (Sauvage et al., 2020). Dans chaque schéma, la flèche rose symbolise la valeur du stress du vent.

rences en terme de flux de chaleur et d'évaporation jouent principalement sur l'environnement de basses couches et sur la stabilité. De manière directe, l'intensité de la convection et des précipitations est amplifiée dans le cas d'un apport en chaleur et humidité plus important en surface. Ces effets directs sont finalement bien compris, mais des effets indirects importants ont également été mis en évidence. Des différences en terme de stationnarité ont notamment été obtenues mais proviennent des modifications des flux de surface, de l'écoulement en basse couche et de la dynamique interne de la convection. Elles se sont par ailleurs avérées inhomogènes en fonction du type de situation fortement précipitante. La stationnarité a ainsi été inchangée pour un cas piloté par le flux à grande échelle (Aude 1999) ou par effet de soulèvement orographique (précipitations sur l'Hérault en 2016) alors qu'un mouvement plus rapide des systèmes convectifs est apparu dans le cas de déclenchement par des phénomènes de fine échelle [poche froide en plaine dans le cas du Gard en 2002 ou s'étalant en mer pour la POI 8, dépression secondaire pour la POI 16a ou encore convergence en mer (cas 2016)]. Également, elle est apparue renforcée pour le cas d'une situation frontale en décembre 2003. Les effets de changements de SST par le forçage ou le couplage de l'océan, ou de paramétrisation des flux de surface sont ainsi très significatifs pour les processus de déclenchement principalement en mer et pour l'alimentation des systèmes fortement précipitants. Tous ces éléments constituent une importante source d'incertitude pour la prévision et devront maintenant être vérifiés en mode couplé pour lequel des effets de compensation pourront intervenir.

Jusqu'à présent, mes travaux ont largement été motivés par l'objectif de construction de systèmes couplés et de leur évaluation. Or, à présent, en parallèle de ce travail d'intégration et d'amélioration des couplages, je souhaite en quelque sorte inverser la méthodologie en utilisant le système couplé, désormais techniquement mature, comme un outil pour la compréhension des processus et des interactions couplés, tout en hiérarchisant les éléments de couplage permettant l'amélioration des prévisions et en veillant à bien équilibrer entre plus de réalisme à l'interface air-mer et un gain et efficacité nécessaires pour un système opérationnel. Les perspectives plus détaillées de mon travail sont ainsi présentées dans le chapitre 4.





# Chapitre 4

## Perspectives et projet de recherche

L'assemblage d'un système intégré à résolution kilométrique est clairement identifié comme projet transverse du CNRM pour la période 2021-2025. Mon projet de recherche s'inscrit largement dans ce projet transverse, nommé AROBASE (*AROME-BASEd coupled SystEm*, Application de la Recherche à l'Opérationnel pour l'assemblage d'AROME avec des Systèmes Environnementaux) dont je suis la pilote et que je souhaite également intégrer dans un paysage de collaborations allant au-delà du CNRM pour inclure des échanges et développements communs avec les autres laboratoires et structures opérationnelles s'intéressant aux phénomènes hydro-météo-océaniques à fine-échelle.

La construction d'un outil assemblant à la résolution kilométrique les différents compartiments clés pour la météorologie, l'environnement et le climat permettra en effet de bénéficier d'un laboratoire numérique particulièrement pertinent pour évaluer les processus d'échanges, les phénomènes de compensation ou d'amplification pouvant intervenir en particulier dans le cas d'évènements intenses. Il doit aussi servir de référence ou d'attracteur pour un futur système opérationnel, tout en considérant les contraintes numériques spécifiques et les exigences de performances qui sont prégnantes.

L'outil de recherche multi-couplé qui sera issu d'AROBASE constitue ainsi une formidable opportunité pour progresser vers une prévision environnementale aux échelles de temps courtes, ainsi que pour mieux comprendre les processus d'échanges, les phénomènes de rétroactions ou en cascade, et l'évolution du climat régional afin d'anticiper ses conséquences aux enjeux locaux, complexes et multiples.

Les évènements de précipitations intenses en zone méditerranéenne restent à ce titre un objet d'étude important au vu des besoins croissants d'anticipation de ces phénomènes et de leurs conséquences et dans le contexte de leur évolution future associé au changement climatique. La compréhension et la prévisibilité de ces systèmes et de leurs impacts pourront encore progresser par l'utilisation de tels systèmes de modélisation de fine échelle et multi-couplés.

## 4.1 Modélisation intégrée pour l'étude de processus

### 4.1.1 Compréhension et représentation des systèmes fortement précipitants méditerranéens

Comme mentionné par la synthèse de Khodayar et al. (2021), l'augmentation des capacités de calcul, le développement de modèles à haute résolution permettant la résolution explicite de la convection profonde et la disponibilité d'observations de pointe se sont révélés d'une importance cruciale pour parvenir à une meilleure compréhension et modélisation des épisodes méditerranéens au cours du programme HyMeX.

De nouvelles lignes de recherche en modélisation ont pu émerger dans le cadre du programme HyMeX et ont déjà démontré leur utilité pour faire progresser la prévision ou la connaissance des systèmes fortement précipitants, dont le développement de systèmes entièrement couplés sol-végétation-atmosphère-océan-vagues auquel j'ai largement participé en bénéficiant des échanges scientifiques et techniques avec d'autres équipes de modélisation (modélisation et prévision océanique, modélisation du climat régional Med-CORDEX, producteurs de prévisions, analyses et réanalyses avec AROME-WMED notamment) impliquées dans le programme et ses campagnes. Ces échanges ont également été fructueux pour parvenir à une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans le cycle de vie des événements fortement précipitants et sur leurs conséquences sur l'environnement.

Concernant les principaux messages sur le rôle de la mer et du couplage sur les épisodes méditerranéens : En premier lieu, la SST est le paramètre clé pour les échanges d'eau et de chaleur, et son influence sur les épisodes fortement précipitants en termes de déclenchement, d'intensité et de localisation de la convection a été étudiée de manière approfondie par plusieurs études numériques forcées et couplées. De manière générale, ces études mettent en évidence le fait que les valeurs de SST modifient fortement et directement la stabilité des basses couches atmosphériques, ce qui impacte d'abord l'intensité de la convection et des précipitations dans le sens d'une amplification dans le cas d'une surface de la mer plus chaude. La localisation et la stationnarité des systèmes de fortes précipitations sont également modifiées, avec une accélération de la vitesse du vent en basses couches sur une mer plus chaude, mais aussi par les gradients horizontaux SST à échelle fine avec des tourbillons et des fronts marqués présents en Méditerranée qui peuvent modifier considérablement la dynamique des écoulements en interaction avec l'orographie ou déplacer la convergence de l'humidité en mer.

Bien que peu d'observations soient disponibles pour l'attester définitivement, les résultats de modélisation suggèrent que les flux de surface sont modérés (entre 200 et 500 W/m<sup>2</sup> pour le flux de chaleur latente) en amont des épisodes précipitants, en raison d'un vent de basses couches modéré à fort (typiquement autour de 20 m/s) mais surtout de la présence

d'une masse d'air déjà chaude et humide en basses couches. Ainsi, une mer Méditerranée chaude n'est jamais la seule cause d'un épisode fortement précipitant, mais un facteur d'amplification qui vient facilement compléter jusqu'à saturation l'air transporté au-dessus de la Méditerranée jusqu'à son soulèvement.

Lors d'événements météorologiques intenses en Méditerranée, des modifications intenses et locales de la couche de mélange océanique se produisent sur des échelles de temps courtes, de quelques heures seulement, ce qui impacte significativement en retour les échanges à l'interface. La stratification verticale de l'océan, qui dépend du profil en densité, est une caractéristique importante à prendre en compte, car le refroidissement de la surface de la mer est très largement contrôlé par le mélange vertical et l'entraînement d'eau plus profonde et plus froide dans la couche de mélange océanique.

L'utilisation de systèmes couplés océan-atmosphère permet de considérer la structure 3D de l'océan, i.e. gradients horizontaux et stratification verticale, et son évolution interactive et cohérente. Dans la plupart des cas, le couplage avec l'océan reproduit explicitement la perte de chaleur de la couche de mélange à la fois vers l'atmosphère par les flux de surface et vers les couches intermédiaires ou profondes par mélange vertical. La surface océanique devient progressivement plus froide dans le modèle couplé ce qui induit des flux de chaleur plus faibles, des différences locales dans l'environnement en basses couches qui se traduisent par une augmentation de la stabilité, mais de faibles impacts sur la convergence, l'organisation et l'intensité de la convection.

Les vagues ont également un impact sur les basses couches atmosphériques : En augmentant la rugosité de la surface et le flux de quantité de mouvement, elles agissent comme un frein pour l'écoulement amont. Ce ralentissement peut se traduire par une modification de la localisation des systèmes fortement précipitants en mer en raison de déplacement de ligne de convergence ou de phénomènes de poche froide, lorsqu'elles sont la source du phénomène de soulèvement et déclenchement de la convection.

Le rôle des vagues sur les échanges de chaleur et sur la captation de quantité de mouvement au dépend de la couche de mélange océanique doit encore être examiné plus en détail pour ces situations. De même, la représentation des flux de surface, champs au coeur des échanges air-mer doit encore être améliorée. Plus largement, les processus de déclenchement de systèmes convectifs fortement précipitants en particulier en mer et les mécanismes contribuant à sa stationnarité ou au contraire à sa mobilité restent à identifier et à caractériser tout en les séparant de l'incertitude intrinsèque à la modélisation.

Malgré des développements instrumentaux et l'émergence de nouveaux produits satellitaires à haute-résolution, la faible disponibilité de données d'observation caractérisant l'environnement de basses couches en zone marine et/ou à petite échelle reste encore aujourd'hui un facteur limitant pour la compréhension des processus et l'évaluation des modèles.

Enfin, pour une recherche plus avancée sur les impacts (crue soudaine, inondation ur-

baine, inondation/submersion côtière, érosion, transport de sédiments, de polluants, contraintes sur les infrastructures, sur les transports,...), de nouveaux partenariats de recherche interdisciplinaires seront nécessaires. A ce titre, la production et la fourniture de nouveaux jeux de données issus de modélisation intégrant les divers compartiments de l'environnement, et ce à haute résolution, apparaissent comme une nouvelle voie de collaboration à saisir.

### 4.1.2 Couplage océan-atmosphère-vagues

Je poursuivrai ces prochaines années le maintien à l'état de l'art et l'amélioration du système couplé océan-atmosphère-vagues (O-A-V) basé sur AROME et SURFEX, en conservant la modularité du système et en enrichissant les possibilités de couplages de l'atmosphère à l'océan et les vagues grâce à des modifications validées et recommandées par la communauté scientifique sur les différents schémas physiques.

Par rapport au couplage issu de la thèse de César Sauvage, le choix a été fait de rapprocher le modèle de vagues MFWAM, outil de prévision de l'état de mer de Météo-France, de l'interface OASIS-SURFEX en partenariat avec DirOp/MAR. Le couplage océan-vagues doit également être ajouté, ce qui est facilité par l'introduction des développements de Couvelard et al. (2020) dans la dernière version de NEMO (v4.2). Une collaboration avec MOI et DirOp/MAR est inscrite dans le projet AROBASE sur ce sujet.

La construction de système couplé O-A-V permet ainsi de disposer d'un outil de modélisation pour l'analyse des processus air-mer à l'échelle kilométrique. En particulier, il constitue un laboratoire numérique intéressant pour l'estimation des échanges et la validation de paramétrisations de flux de surface qui, comme présenté en 3.3, doivent désormais être considérées en mode couplé. La comparaison des résultats de modélisation utilisant différentes paramétrisations de flux turbulents à des données observées dans les trois compartiments O, A, V ouvre également plus de possibilité de validation, au travers d'analyse d'impacts, les données directes de flux étant rares, voire très rares pour certaines gammes de vent.

La disponibilité de systèmes de modélisation tri-couplés à fine échelle permet en outre d'enrichir des paramétrisations de flux turbulents qui peuvent notamment inclure une représentation explicite de l'effet sur la rugosité des vagues au travers de la mer du vent, i.e. les vagues en croissance et en interaction avec le vent, et les impacts sur les transferts de quantité de mouvement, de chaleur et d'eau.

La génération d'embruns marins a été intégrée au modèle de surface SURFEX par (Brumer et al., 2022) dans le cadre du projet CASSIOWPE (ANR CoReD 2020). L'utilisation du modèle couplé MESO-NH/CROCO/WW3 a ainsi permis de tester plusieurs dépendances à l'état de mer dans les fonctions de génération des embruns et les rétroactions sur la couche limite atmosphérique marine. L'analyse du rôle des embruns et des aérosols marins doit se

poursuivre pour différents types de situations. En particulier, l'étude de leurs effets radiatifs et des interactions avec la microphysique peut aujourd'hui être envisagée grâce à la disponibilité d'un schéma à deux moments et à l'introduction de ces schémas sophistiqués d'émissions dans SURFEX prenant en compte les conditions océaniques et de l'état de mer de manière interactive grâce au(x) couplage(s).

D'autres étapes permettront aussi de progresser dans la prise en compte de l'état de mer et en particulier de la houle (i.e. les vagues non locales) jouant à la fois sur les échanges à l'interface et sur la turbulence dans les deux milieux atmosphérique et océanique. Des travaux seront réalisés en ce sens dans le cadre du projet AWARE (actuellement soumis à l'ANR). Les développements qui seront issus de la proposition ANR AWARE qui s'intéressera également à l'amélioration de la cohérence du couplage air-mer en assurant la distribution des flux de quantité de mouvement au sein de chaque composante, seront également suivis.

L'ensemble de ces travaux autour de l'amélioration de la physique du couplage O-A-V dans AROBASE seront réalisés dans le cadre de la thèse de Fleur Nicolay.

Pour l'ensemble de ces prochaines évolutions de schémas physiques, le CNRM dispose d'un atout fort avec une déclinaison de modèles couplés d'une grande proximité en termes d'assemblage autour de SURFEX-OASIS, qui sera particulièrement pertinente pour des études multi-échelle de processus et au bénéfice de la mise au point de paramétrisations physiques adaptées au mode couplé : CNRM-CM (et CNRM-ESM) en mode planétaire, CNRM-RCSM pour l'étude du climat régional en particulier en Méditerranée, le(s) couplage(s) d'AROME pour l'échelle kilométrique dans AROBASE, et de MESO-NH pour des applications du kilométrique à l'hectométrique, en allant jusqu'à l'émergence aujourd'hui de LES couplées océan-atmosphère dont l'étude de Brilouet et al. (2021) est une première étape avec le modèle communautaire MESO-NH, ce qui pourra aussi largement contribuer à améliorer nos connaissances des phénomènes couplés de très petites échelles et de leurs conséquences pour les échelles plus larges en vue de leur paramétrisation.

### 4.1.3 Assemblage de nouveaux compartiments

L'interface SURFEX-OASIS constitue une base très solide et modulaire pour l'insertion de nouveaux compartiments dans un système de modélisation kilométrique permettant ainsi de mieux représenter les processus d'échanges et de mieux comprendre les réponses rapides et/ou amplificatrices des différentes composantes du système pendant les événements météorologiques intenses et à enjeu fort de prévision.

L'ajout de la modélisation de l'hydrologie continentale permettra la fermeture du cycle de l'eau, en particulier pour la prise en compte des transferts latéraux. L'utilisation de l'interface

de couplage SURFEX-OASIS permet d'envisager une intégration rapide de CTRIP au sein du système AROBASE, pour une zone couvrant la France métropolitaine et avec une résolution horizontale de  $1/12^\circ$  (Munier, 2019). Des travaux sont également menés à GMME pour permettre à CTRIP d'atteindre la résolution kilométrique (cf. thèse E. Perronet, encadrement : S. Munier et B. Decharme).

L'insertion de l'hydrologie et la suite du couplage O-A-V pourra amener à considérer une introduction progressive d'une représentation des surcotes et de submersions marines. Dans le cadre actuel, des modélisations sont réalisées en aval de prévisions météorologiques, d'état de mer et océanographiques faites séparément. Seule une utilisation toujours en mode aval mais réalisée à partir de champs de forçage cohérents issus d'une unique prévision couplée O-A-V[-débits] à l'échelle kilométrique sera examinée dans un premier temps dans la thèse de Fleur Nicolay. Les bénéfices obtenus devront être pleinement évalués avant d'examiner de potentielles options de raffinements à la côte en particulier de la modélisation vagues, puis éventuellement la prise en compte explicite des zones inondées et bancs découvrants.

Le couplage des aérosols et de la chimie atmosphérique gazeuse au(x) modèle(s) atmosphérique(s) physique(s) tel que engagé dans la prospective scientifique du CNRM dans le cadre du projet transverse ACCALMIE, mais aussi, dans un objectif plus lointain, de la biogéochimie et des sédiments constitue aussi des éléments forts de progression dans la compréhension des interactions et boucles de rétroactions et vers une prévision environnementale aux échelles de temps courtes, mais aussi pour mieux appréhender les conséquences régionales de l'évolution du climat. Dans cette même optique, la prise en compte de l'anthropisation des surfaces continentales (urbanisation, barrages et irrigation) sera également incluse dans le système AROBASE pour les études du climat régional tel que défini dans le projet LOCALISING (i.e. Projet Ciblé 10) du PEPR TRACCS.

## **4.2 Système de prévision météorologique et environnementale à échelle kilométrique**

Le couplage océan-atmosphère pour la prévision numérique du temps (PNT) constitue un point d'étape important dans la construction d'un système de prévision multi-couplé à échelle kilométrique. Il permet notamment de représenter les structures de fine échelle et l'évolution interactive de l'océan superficiel au cours de la prévision et permet une meilleure représentation des interactions à l'interface air-mer. La prise en compte des tourbillons, du contenu thermique combinant la température de la couche et son épaisseur, ainsi que sa stratification et les évolutions océaniques intra-diurnes apparaît aujourd'hui en effet essentielle pour la PNT. Le couplage atmosphère-vagues, quant à lui, constitue un apport important pour la représentation de la couche limite atmosphérique et de surface et une possibilité significative

de combiner en synergie deux outils majeurs de prévision opérés à Météo-France pour ces missions de surveillance et d'anticipation des phénomènes à enjeux.

Si l'apport en réalisme amené par le(s) couplage(s) est acquis, et sera encore amplifié par les améliorations de la physique de couplage, la modélisation dans le cadre opérationnel répond à des contraintes dont il convient de prendre soigneusement compte en amont. Ces contraintes, discutées pour partie ci-après, sont celles de la fiabilité et de l'efficacité numérique, tout en visant continûment l'amélioration de la prévisibilité des phénomènes.

### 4.2.1 Partage de code et maintenance

Parmi les systèmes couplés océan-atmosphère à résolution kilométrique développés ces dernières années, seul un nombre limité vise des objectifs d'océanographie opérationnelle ou des applications pour la PNT, et encore moins sont effectivement opérationnels, et ce malgré des motivations importantes et des intérêts communs (cf. Brassington et al., 2015; Pullen et al., 2017b). Les principaux obstacles sont, en particulier, le coût numérique d'un modèle atmosphérique pour l'océanographie opérationnelle, et de manière plus générale, une expertise moins importante sur l'un ou l'autre des compartiments et l'absence de réels outils communs d'initialisation et de validation.

La maintenance du couplage O-A-V réalisé pendant la thèse de César Sauvage (Sauvage, 2019; Sauvage et al., 2021) et repris dans le cadre des travaux de thèse de Laëticia Corale au LACy (Corale, 2022), passe donc désormais par le portage des sources nécessaires au couplage dans les versions successives des différents modèles. Pour cela, la force de l'interface de couplage SURFEX-OASIS est qu'elle constitue un outil modulaire qui permet 1/ d'assembler singulièrement et par étape les versions les plus récentes des modèles composantes en fonction de leurs disponibilités et 2/ de faire les mises à jour nécessaires de manière collaborative et les pérenniser au bénéfice de tout utilisateur du continuum de modélisation couplée évoqué plus haut.

Dans le détail, pour NEMO, la maintenance de l'interface avec OASIS est réalisée par les équipes de développement dédiées. Le couplage avec la version 4.2 de NEMO (pour la configuration FRA36) avec AROME a été finalisé au premier semestre 2022 en collaboration avec MOI pendant le stage M2 de Quentin Misi. Pour AROME, j'ai introduit au cours du second semestre 2022 les sources permettant le couplage O-A-V dans le cycle 46t1 (utilisant SURFEX en ligne dans une version 8), cycle actuellement opérationnel. Désormais, grâce à un travail conjoint LAERO-LACY-CNRM, les sources de ces couplages sont intégrées dans les versions officielles [cy48t1 d'AROME et version 9 de SURFEX (ainsi que dans la version 5.6.1 de Meso-NH)] ce qui permet de garantir un transfert plus pérenne vers d'autres systèmes



pour la prévision du temps, dans le cadre du consortium ACCORD<sup>1</sup> principalement. Le travail de couplage du modèle MFWAM est en cours de finalisation. Les étapes de récupération de sources déjà existantes dans le code WAM pour l'interface OASIS (Staneva et al., 2021), d'identification des champs échangés (suivant notamment Voltaire et al., 2017; Couvelard et al., 2020; Grayek et al., 2023) et d'exécution couplée avec des modèles jouets sont faites. Reste une application en mode réaliste et régionales, d'abord avec NEMO et SURFEX, avant d'élargir l'assemblage à AROME.

Dans les prochaines années, le coupleur OASIS subira des évolutions qui seront essentielles pour sa pérennisation, avec en particulier un rapprochement avec l'outil XIOS. La place centrale d'OASIS dans différents systèmes de modélisation couplée, en particulier en Europe, rend bien sûr nécessaire le maintien des fonctionnalités actuelles (communication MPI et interpolations, principalement) mais va également permettre son enrichissement progressif (accélérateurs en particulier) dont les modèles couplés pourront largement tirer parti.

Au delà des codes et de leurs évolutions, un travail important autour des systèmes d'environnement, de *scriptage* et d'exécution doit être réalisé. Pour la mise au point de configurations standards du système multi-couplé AROBASE, une utilisation des capacités de l'outil OLIVE-VORTEX sera faite de manière à garantir la proximité avec les outils/systèmes de *scriptage* et d'exécution opérationnels. D'autres systèmes d'environnement et d'exécutions seront également utilisés pour des activités de modélisation de recherche et d'étude du système climatique.

Le travail décrit ci-dessus s'appuie donc sur une forte expertise technique et sur une large capacité d'anticipation des évolutions des éléments constituant un système couplé. Dans un paysage en mutation concernant le calcul intensif, le codage et avec l'émergence de nouveaux outils d'intelligence artificielle, les deux piliers que sont expertise et anticipation apparaissent comme cruciales pour la durabilité des modèles servant à la compréhension des phénomènes et à leur prévision.

## 4.2.2 Initialisation et incertitudes

L'initialisation des systèmes couplés de prévisions est une question majeure puisque, d'un côté, une initialisation commune nécessite le développement d'algorithmes d'assimilation de données couplée dont la complexité des enjeux a été détaillée en section 2.2.3.3 tandis que d'autre part une initialisation faite séparément peut être réalisée aisément mais conduire à des déséquilibres avec un effet de spin-up associé affectant les premières échéances de prévision.

Les résultats des simulations océaniques seules réalisées avec le modèle NEMO-FRA36

---

1. <http://www.umr-cnrm.fr/accord/>

dans le cadre du stage de Jeanne Millot-Weil (2021) ont permis de montrer que, hormis la hauteur de la surface de la mer qui est entièrement pilotée par les effets de la marée, les prévisions océaniques gardent en mémoire leurs états initiaux sur les 7 jours de prévision [cas d'étude identique à Pianezze et al. (2022) qui constitue une séquence de situations météorologiques intenses] même dans la couche superficielle. Les simulations initialisées à partir de différents produits de prévision semblent donc d'après ces expériences permettre de construire un ensemble de prévisions océaniques, mais qui reste peu dispersif. L'utilisation d'un forçage à résolution kilométrique (AROME à 2.5km de résolution dans ce cas) conduit à plus de variabilité spatiales et temporelles et à de meilleurs scores de prévision par comparaison aux observations de SST, par comparaison à l'utilisation d'un forçage grande échelle (forçage par des prévisions IFS). Ce stage a ainsi permis de débiter l'identification de potentielles sources d'incertitudes dues à l'initialisation océanique pour de futures prévisions d'ensemble couplées.

La mise en place d'un nouveau système couplé de prévision ouvre ainsi de nouvelles possibilités pour l'étude du comportement de l'interface air-mer et du couplage en mode ensemble. Bien qu'il permette un réalisme sans précédent des phénomènes sensibles au couplage océan-atmosphère, la qualité de ses simulations peut rester limitée que ce soit par des déséquilibres et/ou lacunes dans l'initialisation des différents modèles numériques voire dans les systèmes d'observation servant à la production de conditions initiales, dans la résolution des calculs, et/ou dans les approximations dans la représentation des processus physiques. Pour extraire une valeur prédictive aux simulations et la séparer du bruit lié aux erreurs de prévisions, la technique de prévision d'ensemble peut être utilisée. La prévision d'ensemble consiste ainsi à injecter des perturbations quasi-aléatoires dans les modèles permet de produire des simulations parallèles dont la dispersion est révélatrice de la croissance des erreurs au cours des simulations. Il s'agit d'une technique connue en modélisation de l'atmosphère, à ses débuts en modélisation océanique haute résolution, mais encore quasiment jamais appliquée au système couplé océan-atmosphère régional (Wei et al., 2014; Gentile et al., 2022).

Des travaux initiés dans le cadre de la thèse de Maëva Marquillie ont permis d'établir un protocole d'expérience servant à mieux identifier le rôle de perturbations de la surface océanique dans l'actuelle prévision d'ensemble AROME (PEARO) et à construire pas à pas une prévision d'ensemble couplée. Une première expérience de prévision d'ensemble couplée océan-atmosphère sur une période d'un mois et demi, utilisant le couplage AROME-NEMO sur la France métropolitaine a été réalisée. Elle s'appuie sur les perturbations du système PEARO mais ne contient aucune perturbation océanique, ce qui va permettre dans un premier temps d'évaluer la propagation à courte-échéance des perturbations atmosphériques dans l'océan (couplé). Dans le cadre d'un stage proposé pour 2024, ces effets doivent être qualifiés en fonction des régions, de la stratification océanique et/ou du type de situation météorologique. Par comparaison de la PE couplée à une PE atmosphérique avec SST constante

et commune à tous les membres, les effets du couplage seront ensuite évalués du point de vue de la PNT.

Parmi les perturbations océaniques et à l'interface possibles (conditions initiales, aux limites, schémas physiques dans le modèle d'océan, paramétrisation des échanges...), les perturbations de l'état initial océanique 3D semblent les plus à même d'impacter significativement la PNT aux premières échéances de prévision. Une construction de perturbations océaniques initiales doit donc être mise au point et appliquée pour de la prévision d'ensemble couplée O-A sans et avec perturbations atmosphériques et de surface continentale, d'abord pour quelques cas d'étude identifiés par l'analyse précédente, afin de déterminer quelle(s) dispersion(s) additionnelle(s) sont apportée(s) par ces perturbations initiales.

Ces premières étapes d'analyse de propagation de perturbations sont nécessaires avant d'examiner les possibilités d'appliquer d'autres perturbations aléatoires ou des perturbations ciblées notamment de la physique d'interface et de couplage.

Concernant l'assimilation de données couplée, l'assemblage pré-requis d'un système de prévision étant désormais réalisé, de premières pistes de progression peuvent être envisagées. Dans un premier temps, l'assimilation de données couplée A-V dite faible (voire définition en section 2.2.3.3) semble être applicable en exploitant les schémas d'assimilation séparés d'AROME et de MFWAM et en utilisant une ébauche commune cohérente. L'avantage de s'appuyer en premier sur des systèmes utilisés en opérationnel à Météo-France tient notamment au fait que les outils de récupération, le traitement des données et les algorithmes employés sont éprouvés. Concernant l'assimilation de données couplée atmosphère – surface continentales, des travaux sont en cours au CNRM dans le cadre du projet transverse MAS-COT dont l'objectif est d'obtenir graduellement un cycle d'assimilation complet avec analyse de surface et analyse d'altitude pour la PNT opérationnelle. Pour introduire l'assimilation de données dans le compartiment océanique, l'absence de développements en interne au CNRM ou Météo-France conduit à formuler une progression différente, i.e. en incluant notamment une collecte et qualification des observations à assimiler en regard des courtes échelles spatiales et temporelles d'intérêt. Néanmoins, la thèse de Argan Purcell démarrée en mai 2023 au GMAP va permettre d'examiner les possibilités offertes par le schéma 4DEnVAR à partir des systèmes de prévision AROME-OM couplés au modèle océanique 1D. L'extension de ce travail au système AROBASE sera ensuite évaluée.

### **4.2.3 Hiérarchisation des couplages pour la prévision**

En aval des travaux de construction d'un outil de recherche couplé, il s'agira d'identifier les gains de prévisibilité et de production permis par les couplages de différentes composantes du système environnemental. Ceci devra être réalisé afin de pouvoir évaluer la pertinence

d'une augmentation du degré de complexité liée au couplage en regard des gains obtenus, mais aussi des coûts numériques de production et des contraintes de maintenance et portage sur les futures architectures de calcul associés.

Ce travail consistera donc à évaluer de manière cohérente et dans un contexte de prévision numérique du temps l'outil intégré qui constitue à priori une référence en terme de réalisme, puis à décliner de manière modulaire des couplages plus simplifiés, voir des forçages afin de déterminer un système optimal.

Ainsi, pour évaluer l'apport du couplage océan-atmosphère-vagues, l'analyse sera réalisée en partant d'un modèle tri-couplé comparaison, puis en évaluant le ratio bénéfices-coûts par comparaison à des instances de prévision AROME utilisant notamment le modèle océanique 1D ou un champ initial de SST à haute-résolution pour le compartiment "océan". Pour le compartiment "vagues", l'utilisation d'un forçage de champ de vagues associé à une paramétrisation des flux turbulents adaptée ou issue de méthodes d'apprentissage, ou encore l'intégration de nouvelles observations devront être finement examinées. En parallèle, la comparaison aux prévisions opérationnelles de vagues de Météo-France devra aussi être réalisée.

En résumé et de manière très synthétique, différentes étapes de recherche et développement serviront à définir les possibilités de mise en oeuvre d'un futur système multi-couplé à résolution kilométrique à la fois pour des applications de prévision et pour des études de processus et du climat régional.

Pour cela, je travaillerai au trois étapes essentielles suivantes :

1. Construction, enrichissement physique et validation des couplages ;
2. Compréhension et représentation des interactions clés ;
3. Optimisation, partage de code et transfert.

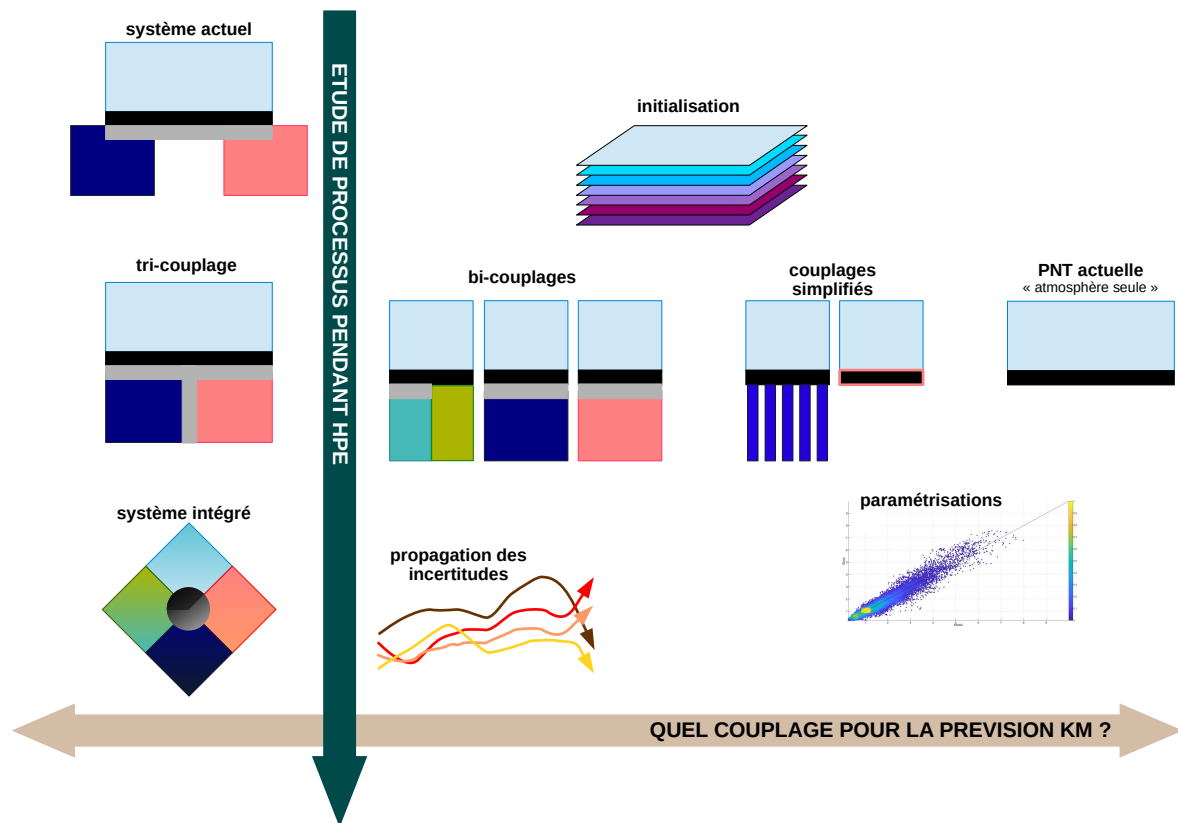


FIGURE 4.1 : Schéma résumant mes principaux axes de travail sur la période 2022-2026.

# Références

- Adakudlu, M., and S. Sobolowski, 2014 : Role of atmosphere-ocean coupling in the simulation of a polar low : a case study with the COAWST modeling system. *3rd international Lund Regional-Scale climate modelling workshop*, Baltic Earth.
- Adloff, F., G. Jordà, S. Somot, F. Sevault, T. Arsouze, B. Meyssignac, L. Li, and S. Planton, 2018 : Improving sea level simulation in Mediterranean regional climate models. *Clim. Dyn.*, **51** (3), 1167–1178, doi.org/10.1007/s00382-017-3842-3.
- Akhtar, N., A. Krug, J. Brauch, T. Arsouze, C. Dieterich, and B. Ahrens, 2019 : European marginal seas in a regional atmosphere–ocean coupled model and their impact on Vb-cyclones and associated precipitation. *Clim. Dyn.*, **53** (9), 5967–5984, doi.org/10.1007/s00382-019-04906-x.
- Aldrian, E., D. Sein, D. Jacob, L. D. Gates, and R. Podzun, 2005 : Modelling Indonesian rainfall with a coupled regional model. *Clim. Dyn.*, **25**, 1–17, doi.org/10.1007/s00382-004-0483-0.
- Alpert, P., B. U. Neeman, and Y. Shay-El, 1990 : Climatological analysis of Mediterranean cyclones using ECMWF data. *Tellus A*, **42** (1), 65–77, doi.org/10.1034/j.1600-0870.1990.00007.x.
- André, G., P. Garreau, V. Garnier, and P. Fraunié, 2005 : Modelled variability of the sea surface circulation in the North-western Mediterranean Sea and in the Gulf of Lions. *Ocean Dyn.*, **55** (3), 294–308, doi.org/10.1007/s10236-005-0013-6.
- Ardhuin, F., S. T. Gille, D. Menemenlis, C. B. Rocha, N. Rasche, B. Chapron, J. Gula, , and J. Molemaker, 2017 : Small-scale open ocean currents have large effects on wind wave heights. *J. Geophys. Res. Oceans*, **122**, 4500–4517, doi.org/10.1002/2016JC012413.
- Argence, S., D. Lambert, E. Richard, J.-P. Chaboureau, and N. Söhne, 2008 : Impact of initial condition uncertainties on the predictability of heavy rainfall in the Mediterranean : a case study. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134** (636), 1775–1788, doi.org/10.1002/qj.314.
- Arsouze, T., J. Beuvier, K. Béranger, S. Somot, C. Lebeaupin Brossier, R. Bourdallé-Badie, F. Sevault, and Y. Drillet, 2013 : Sensibility analysis of the Western Mediterranean Transition inferred by four companion simulations. *40<sup>th</sup> CIESM congress*, Marseille, France, CIESM, [http://ciesm.org/online/archives/abstracts/pdf/40/PG\\_0182.pdf](http://ciesm.org/online/archives/abstracts/pdf/40/PG_0182.pdf).
- Artale, V., M. Astraldi, G. Buffoni, and G. P. Gasparini, 1994 : Seasonal variability of gyre-scale circulation in the northern Tyrrhenian Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, **99** (C7), 14 127–14 137, doi.org/10.1029/94JC00284.
- Artale, V., D. Iudicone, R. Santoleri, V. Rupolo, S. Marullo, and F. D’Ortenzio, 2002 : Role of surface fluxes in ocean general circulation models using satellite sea surface temperature : Validation of and sensitivity to the forcing frequency of the Mediterranean thermohaline circulation. *J. Geophys. Res. Oceans*, **107** (C8), 29–1–29–24, doi.org/10.1029/2000JC000452.
- Artale, V., S. Calmanti, A. Carillo, A. Dell-Aquila, M. Herrmann, G. Pisacane, P. M. Ruti, G. Sannino, F. Giorgi, X. Bi, J. S. Pal, S. Rauscher, and T. PROTHEUS Group, 2010 : An atmosphere–ocean regional climate model for the Mediterranean area : assessment of a present climate simulation. *Clim. Dyn.*, **35**, 721–740, doi.org/10.1007/s00382-009-0691-8.
- Astraldi, M., and G. P. Gasparini, 2013 : The Seasonal Characteristics of the Circulation in the Tyrrhenian Sea. *Seasonal and Interannual Variability of the Western Mediterranean Sea*, Amer. Geophys. Union, chap. 7, 115–134, doi.org/10.1029/CE046p0115.
- Astraldi, M., S. Balopoulos, J. Candela, J. Font, M. Gacic, G. Gasparini, B. Manca, A. Theocharis, and J. Tintoré, 1999 : The role of straits and channels in understanding the characteristics of Mediterranean circulation. *Progr. Oceanogr.*, **44** (1), 65–108, doi.org/10.1016/S0079-6611(99)00021-X.
- Balmaseda, M., and D. Anderson, 2009 : Impact of initialization strategies and observations on seasonal forecast skill. *Geosci. Res. Lett.*, **36** (1), doi.org/10.1029/2008GL035561.
- Bao, J.-W., J. M. Wilczak, J.-K. Choi, and L. H. Kantha, 2000 : Numerical simulations of air-sea interaction under high wind conditions using a coupled model : a study of hurricane development. *Mon. Wea. Rev.*, **128** (2), 2190–2210.
- Belamari, S., 2005 : Report on uncertainty estimates of an optimal bulk formulation for surface turbulent fluxes. *MERSEA IP Deliverable*, **D.4.1.2**, 29.
- Belamari, S., and A. Pirani, 2007 : Validation of the optimal heat and momentum fluxes using the ORCA2-LIM global ocean-ice model. *MERSEA IP Deliverable*, **D.4.1.3**, 88.
- Bender, M. A., and I. Ginis, 2000 : Real-case simulations of hurricane-ocean interaction using a high-resolution coupled model : Effects on Hurricane intensity. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 917–946.
- Bender, M. A., I. Ginis, R. Tuleya, B. Thomas, and T. Marchok, 2007 : The operational GFDL coupled hurricane-ocean prediction system

- and a summary of its performance. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3965–3989, doi.org/10.1175/2007MWR2032.1.
- Béranger, K., L. Mortier, and M. Crépon, 2005 : Seasonal variability of water transport through the Straits of Gibraltar, Sicily and Corsica, derived from a high-resolution model of the Mediterranean circulation. *Progr. Oceanogr.*, **66** (2), 341 – 364, doi.org/10.1016/j.pocean.2004.07.013.
- Béranger, K., Y. Drillet, M.-N. Houssais, P. Testor, R. Bourdallé-Badie, B. Alhammoud, A. Bozec, L. Mortier, P. Bouruet-Aubertot, and M. Crépon, 2010 : Impact of the spatial distribution of the atmospheric forcing on water mass formation in the Mediterranean Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, **115** (C12), doi.org/10.1029/2009JC005648.
- Berthou, S., 2015 : Sensibilité des précipitations extrêmes au couplage sous-mensuel atmosphère-océan en méditerranée nord-occidentale : approche par la modélisation climatique régionale. Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 170 pp.
- Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, and C. Lebeaupin-Brossier, 2014 : Prior history of Mistral and Tramontane winds modulates heavy precipitation events in southern France. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography*, **66** (1), 24064, doi.org/10.3402/tellusa.v66.24064.
- Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, and C. Lebeaupin-Brossier, 2015 : Sensitivity of an intense rain event between atmosphere-only and atmosphere-ocean regional coupled models : 19 September 1996. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141** (686), 258–271, doi.org/10.1002/qj.2355.
- Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, and C. Lebeaupin Brossier, 2018 : Lagged effects of the Mistral wind on heavy precipitation through ocean-atmosphere coupling in the region of Valencia (Spain). *Clim. Dyn.*, **51** (3), 969–983, doi.org/10.1007/s00382-016-3153-0.
- Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, E. Flaounas, C. Lebeaupin Brossier, S. Somot, and M. Stéfanon, 2016 : Influence of submonthly air-sea coupling on heavy precipitation events in the Western Mediterranean basin. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142** (S1), 453–471, doi.org/10.1002/qj.2717.
- Béthoux, J., P. Morin, C. Chaumery, O. Connan, B. Gentili, and D. Ruiz-Pino, 1998 : Nutrients in the mediterranean sea, mass balance and statistical analysis of concentrations with respect to environmental change. *Marine Chemistry*, **63** (1), 155–169, doi.org/10.1016/S0304-4203(98)00059-0.
- Beuvier, J., C. Lebeaupin Brossier, K. Béranger, T. Arsouze, R. Bourdallé-Badie, C. Deltel, Y. Drillet, P. Drobinski, N. Ferry, F. Lyard, F. Sevault, and S. Somot, 2012a : MED12, oceanic component for the modeling of the regional Mediterranean Earth System. *Mercator Ocean Quarterly Newsletter*, **46**, 60–66.
- Beuvier, J., K. Béranger, C. Lebeaupin Brossier, S. Somot, F. Sevault, Y. Drillet, R. Bourdallé-Badie, N. Ferry, and F. Lyard, 2012b : Spreading of the western mediterranean deep water after winter 2005 : Time scales and deep cyclone transport. *J. Geophys. Res. Oceans*, **117** (C7), doi.org/10.1029/2011JC007679.
- Blanchet, J., G. Molinié, and J. Touati, 2018 : Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Clim. Dyn.*, **51**, 799–812, doi.org/10.1007/s00382-016-3122-7.
- Bony, S., and Coauthors, 2017 : EUREC<sup>4</sup>A : A Field Campaign to Elucidate the Couplings Between Clouds, Convection and Circulation. *Surveys in Geophysics*, **38**, 1529–1568, doi.org/10.1007/s10712-017-9428-0.
- Bosse, A., P. Testor, L. Houpert, P. Damien, L. Prieur, D. Hayes, V. Taillandier, X. Durrieu de Madron, F. d’Ortenzio, L. Coppola, J. Karstensen, and L. Mortier, 2016 : Scales and dynamics of submesoscale coherent vortices formed by deep convection in the northwestern mediterranean sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, **121** (10), 7716–7742, doi.org/10.1002/2016JC012144.
- Bouin, M.-N., and C. Lebeaupin Brossier, 2020a : Impact of a medicane on the oceanic surface layer from a coupled, kilometre-scale simulation. *Ocean Sci.*, **16** (5), 1125–1142, doi.org/10.5194/os-16-1125-2020.
- Bouin, M.-N., and C. Lebeaupin Brossier, 2020b : Surface processes in the 7 November 2014 medicane from air–sea coupled high-resolution numerical modelling. *Atmos. Chem. Phys.*, **20** (11), 6861–6881, doi.org/10.5194/acp-20-6861-2020.
- Bouin, M.-N., C. Lebeaupin Brossier, S. Malardel, A. Voltaire, and C. Sauvage, 2023 : The wave-age dependent stress parameterization (WASP) for momentum and heat turbulent fluxes at sea in SURFEX v8.1. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, **2023**, 1–46, doi.org/10.5194/gmd-2023-58.
- Bouin, M.-N., J.-L. Redelsperger, and C. Lebeaupin Brossier, 2017 : Processes leading to deep convection and sensitivity to sea-state representation during hymex iop8 heavy precipitation event. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2600–2615, doi.org/10.1002/qj.3111.
- Bousquet, O., D. Barbary, S. Bielli, S. Kebir, L. Raynaud, S. Malardel, and G. Faure, 2020 : An evaluation of tropical cyclone forecast in the Southwest Indian Ocean basin with AROME-Indian Ocean convection-permitting numerical weather predicting system. *Atm. Sci. Lett.*, **21** (3), e950, doi.org/10.1002/asl.950.
- Brassington, G. B., M. J. Martins, H. L. Tolman, S. Akella, M. Balmeseda, C. R. S. Chambers, E. Chassignet, J. A. Cummings, Y. Drillet, P. A. E. M. Jansen, P. Laloyaux, D. Lea, A. Mehra, I. Mirouze, H. Ritchie, G. Samson, P. Sandery, G. C. Smith, M. Suarez, and R. Todling, 2015 : Progress and challenges in short- to medium-range coupled prediction. *J. Operational Oceanogr.*, **8** (S2), s239–s258, doi.org/10.1080/1755876X.2015.1049875.
- Brayshaw, D. J., B. Hoskins, and M. Blackburn, 2011 : The Basic Ingredients of the North Atlantic Storm Track. Part II : Sea Surface Temperatures. *J. Atmos. Sci.*, **68** (8), 1784–1805, doi.org/10.1175/2011JAS3674.1.
- Breivik, O., K. Mogensén, J.-R. Bidlot, M. A. Balmeseda, and P. A. E. M. Janssen, 2015 : Surface wave effects in the NEMO ocean model :

- Forced and coupled experiments. *J. Geophys. Res. Oceans*, **120**, 2973–2992, doi.org/10.1002/2014JC010565.
- Bresson, E., V. Ducrocq, O. Nuissier, D. Ricard, and C. De Saint-Aubin, 2012 : Idealized numerical simulations of quasi-stationary convective systems over the Northwestern Mediterranean complex terrain. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **138**, 1751–1763, doi.org/10.1002/qj.1911.
- Brilouet, P.-E., J.-L. Redelsperger, M.-N. Bouin, F. Couvreur, and C. Lebeau-pin Brossier, 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, doi.org/10.1002/qj.4007.
- Broche, P., J.-L. Devenon, P. Forget, J.-C. de Maistre, J.-J. Naudin, and G. Cauwet, 1998 : Experimental study of the Rhone plume. Part I : physics and dynamics. *Oceanologica Acta*, **21 (6)**, 725–738, doi.org/10.1016/S0399-1784(99)80002-4.
- Brousseau, P., Y. Seity, D. Ricard, and J. Léger, 2016 : Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142 (699)**, 2231–2243, doi.org/10.1002/qj.2822.
- Browne, P., P. de Rosnay, H. Zuo, A. Bennett, and A. Dawson, 2019 : Weakly coupled ocean-atmosphere data assimilation in the ECMWF NWP system. *ECMWF Technical Memorandum*, (836), doi.org/10.21957/eqe8rx02, <https://www.ecmwf.int/node/18814>.
- Brumer, S., M.-N. Bouin, M. Cathelain, F. Leckler, H. Branger, J. Piazzola, F. Veron, N. Michelet, J.-F. Filipot, and J.-L. Redelsperger, 2022 : Impacts of sea spray in a coupled ocean-wave-atmosphere model : Mediterranean sea case studies. *EGU General Assembly 2022*, Vienna, Austria, EGU22-11717, doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11717.
- Bruneau, N., and R. Toumi, 2016 : A fully-coupled atmosphere-ocean-wave model of the Caspian Sea. *Ocean Modelling*, **107**, 97–111.
- Burnett, W., S. Harper, R. Preller, G. Jacobs, and K. LaCroix, 2014 : Overview of Operational Ocean Forecasting in the US Navy : Past, Present, and Future. *Oceanography*, **27**, doi.org/10.5670/oceanog.2014.65.
- Campins, J., A. Genovés, M. A. Picornell, and A. Jansà, 2011 : Climatology of Mediterranean cyclones using the ERA-40 dataset. *Int. J. Clim.*, **31 (11)**, 1596–1614, doi.org/10.1002/joc.2183.
- Canals, M., R. Danovaro, S. Heussner, V. Lykousis, P. Puig, F. Trincardi, A. Calafat, X. Durrieu de Madron, A. Palanques, and A. Sánchez-Vidal, 2009 : Cascades in Mediterranean Submarine Grand Canyons. *Oceanography*, **22**, doi.org/10.5670/oceanog.2009.03.
- Carniel, S., A. Benetazzo, D. Bonaldo, F. M. Falcieri, M. M. Miglietta, A. Ricchi, and M. Sclavo, 2016 : Scratching beneath the surface while coupling atmosphere, ocean and waves : Analysis of a dense water formation event. *Ocean Modelling*, **101**, 101 – 112, doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.03.007.
- Carret, A., F. Birol, C. Estournel, B. Zakardjian, and P. Testor, 2019 : Synergy between in situ and altimetry data to observe and study Northern Current variations (NW Mediterranean Sea). *Ocean Sci.*, **15 (2)**, 269–290, doi.org/10.5194/os-15-269-2019.
- Castellari, S., N. Pinardi, and K. Leaman, 2000 : Simulation of water mass formation processes in the Mediterranean Sea : Influence of the time frequency of the atmospheric forcing. *J. Geophys. Res. Oceans*, **105 (C10)**, 24 157–24 181, doi.org/10.1029/2000JC900055.
- Cavicchia, L., H. von Storch, and S. Gualdi, 2014 : A long-term climatology of medicanes. *Clim. Dyn.*, **43 (5)**, 1183–1195, doi.org/10.1007/s00382-013-1893-7.
- Charnock, H., 1955 : Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **81 (350)**, 639–640, doi.org/10.1002/qj.49708135027.
- Chen, S., T. J. Campbell, H. Jin, S. Gabersek, R. M. Hodur, and P. Martin, 2010 : Effect of two-way air sea coupling in high and low wind speed regimes. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3579–3602, doi.org/10.1175/2009MWR3119.1.
- Chen, S. S., and M. Curcic, 2016 : Ocean surface waves in Hurricane Ike (2008) and Superstorm Sandy (2012) : Coupled model predictions and observations. *Ocean Modelling*, **103**, 161–176.
- Chen, S. S., J. F. Price, W. Zhao, M. A. Donelan, and E. J. Walsh, 2007 : The CBLAST-hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere-wave-ocean models for hurricane research and prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88 (3)**, 311–317, doi.org/10.1175/BAMS-88-3-311.
- Chronis, T., V. Papadopoulos, and E. I. Nikolopoulos, 2011 : QuickSCAT observations of extreme wind events over the Mediterranean and Black Seas during 2000-2008. *Int. J. Clim.*, **31 (14)**, 2068–2077, doi.org/10.1002/joc.2213.
- 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, Univ. de La Réunion, 169 pp., [www.theses.fr/2022LARE0032](http://www.theses.fr/2022LARE0032).
- Cotton, W. R., G. Bryan, and S. C. van den Heever, 2011 : Chapter 9 - Mesoscale Convective Systems. *Storm and Cloud Dynamics*, W. Cotton, G. Bryan, and S. van den Heever, Eds., International Geophysics, Vol. 99, Academic Press, 455–526, doi.org/10.1016/S0074-6142(10)09915-8.
- Courtier, P., C. Freydier, J.-F. Geleyn, F. Rabier, and M. Rochas, 1991 : The ARPEGE project at Météo-France. *ECMWF workshop on numerical methods in atmospheric modeling*, 2, Reading, UK, ECMWF, 193-231.
- Couvelard, X., F. Lemarié, G. Samson, J.-L. Redelsperger, F. Ardhuin, R. Benshila, and G. Madec, 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, doi.org/10.5194/gmd-13-3067-2020.
- Craig, A., S. Valcke, and L. Coquart, 2017 : Development and performance of a new version of the OASIS coupler, OASIS3-MCT\_3.0. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 3297–3308, doi.org/10.5194/gmd-10-3297-2017.
- Crépon, M., L. Wald, and J. M. Monget, 1982 : Low-frequency waves in the Ligurian Sea during December 1977. *J. Geophys. Res. Oceans*, **87 (C1)**, 595–600, doi.org/10.1029/JC087iC01p00595.
- Cummings, J., 2005 : Operational multivariate ocean data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 583–604, doi.org/10.1256/qj.05.



- Daley, R., and E. Barker, 2000 : NAVDAS : Formulation and diagnostics. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 869–883.
- Darmaraki, S., S. Somot, F. Sevault, P. Nabat, W. D. Cabos Narvaez, L. Cavicchia, V. Djurdjevic, L. Li, G. Sannino, and D. V. Sein, 2019 : Future evolution of Marine Heatwaves in the Mediterranean Sea. *Clim. Dyn.*, doi.org/10.1007/s00382-019-04661-z.
- de la Vara, A., P. G. del Sastre, T. Arsouze, C. Gallardo, and M. Ángel Gaertner, 2019 : Role of atmospheric resolution in the long-term seasonal variability of the tyrrhenian sea circulation from a set of ocean hindcast simulations (1997-2008). *Ocean Modelling*, **134**, 51–67, doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.01.004.
- Decharme, B., R. Alkama, H. Douville, M. Becker, and A. Cazenave, 2010 : Global Evaluation of the ISBA-TRIP Continental Hydrological System. Part II : Uncertainties in River Routing Simulation Related to Flow Velocity and Groundwater Storage. *J. Hydrometeor.*, **11** (3), 601–617, doi.org/10.1175/2010JHM1212.1.
- Dell’Aquila, A., S. Calmanti, M. V. Ruti, P. Struglia, G. Pisacane, A. Carillo, and G. Sannino, 2012 : Effects of seasonal cycle fluctuations in an A1B scenario over the Euro-Mediterranean region. *Clim. Res.*, **52**, 135–157, doi.org/10.3354/cr01037.
- Delrieu, G., V. Ducrocq, E. Gaume, J. Nicol, O. Payrastré, E. Yates, P.-E. Kirstetter, H. Andrieu, P.-A. Ayrat, C. Bouvier, J.-D. Creutin, M. Livet, S. Anquetin, M. Lang, L. Neppel, C. Obled, J. Parent du Château, G.-M. Saulnier, A. Walpersdorf, and W. Wobrock, 2005 : The catastrophic flash-flood event of 8–9 September 2002 in the Gard region, France : A first case study for the Cévennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory. *J. Hydrometeor.*, **6**, 34–52.
- Déqué, M., C. Dreveton, A. Braun, and D. Cariolle, 1994 : The ARPEGE/IFS atmosphere model : a contribution to the French community climate modelling. *Clim. Dyn.*, **10** (4), 249–266, doi.org/10.1007/BF00208992.
- Di Luca, A., E. Flaounas, P. Drobinski, and C. Lebeaupin Brossier, 2014 : The atmospheric component of the Mediterranean Sea water budget in a WRF multi-physics ensemble and observations. *Clim. Dyn.*, **43** (9), 2349–2375, doi.org/10.1007/s00382-014-2058-z.
- Donlon, C. J., M. Martin, J. Stark, J. Roberts-Jones, E. Fiedler, and W. Wimmer, 2012 : The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sens. Environ.*, **116**, 140–158.
- Doyle, J. D., 2002 : Coupled Atmosphere-Ocean Wave Simulations under High Wind Conditions. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 3087–3099.
- Doyle, J. D., R. M. Hodur, S. Chen, Y. Jin, J. R. Moskaitis, S. Wang, E. A. Hendricks, H. Jin, and T. A. Smith, 2014 : Tropical cyclone prediction using COAMPS-TC. *Oceanography*, **27** (3), 104–115, doi.org/10.5670/oceanog.2014.72.
- Drobinski, P., and Coauthors, 2012 : Model of the Regional Coupled Earth system (MORCE) : Application to process and climate studies in vulnerable regions. *Environmental Model. Soft.*, **35**, 1 – 18, doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.01.017.
- Drobinski, P., and Coauthors, 2014 : HyMeX, a 10-year multidisciplinary program on the Mediterranean water cycle. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95** (7), 1063–1082, doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00242.1.
- Drusch, M., 2006 : Sea Ice Concentration Analyses for the Baltic Sea and Their Impact on Numerical Weather Prediction. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **45** (7), 982–994, doi.org/10.1175/JAM2376.1.
- Du, J., X. G. Larsén, and R. Bolanos, 2015 : A coupled atmospheric and wave modeling system for storm simulations. *European Wind Energy Association offshore 2015 conference*.
- Duchez, A., J. Verron, J.-M. Brankart, Y. Ourmières, and P. Fraunié, 2012 : Monitoring the northern current in the gulf of lions with an observing system simulation experiment. *Scientia Marina*, **76** (3), doi.org/10.3989/scimar.03427.02D.
- Ducrocq, V., S. Davolio, R. Ferretti, C. Flamant, V. Homar Santaner, N. Kalthoff, E. Richard, and H. Wernli, 2016 : Advances in understanding and forecasting of heavy precipitation in Mediterranean through the HyMeX SOP1 field campaign. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142** (S1), 1–6, doi.org/10.1002/qj.2856.
- Ducrocq, V., O. Nuissier, D. Ricard, C. Lebeaupin, and T. Thouvenin, 2008 : A numerical study of three catastrophic precipitating events over Western Mediterranean region (Southern France). part II : Mesoscale triggering and stationarity factors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134** (630), 131–145, doi.org/10.1002/qj.199.
- Ducrocq, V., and Coauthors, 2014 : HyMeX-SOP1, the field campaign dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the Northwestern Mediterranean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95** (7), 1083–1100, doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00244.1.
- Duffourg, F., O. Nuissier, V. Ducrocq, C. Flamant, P. Chazette, J. Delanoë, A. Doerenbecher, N. Fourrié, P. Di Girolamo, C. Lac, D. Legain, M. Martinet, F. Saïd, and O. Bock, 2016 : Offshore deep convection initiation and maintenance during HyMeX IOP16a. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142** (S1), 259–274, doi.org/10.1002/qj.2725.
- Döscher, R., U. Willén, C. Jones, A. Rutgersson, H. E. M. Meier, J. Hansson, and L. P. Graham, 2002 : The development of the coupled regional ocean–atmosphere model RCAO. *Boreal Environ. Res.*, **7**, 183–192.
- Echevin, V., M. Crepon, and L. Mortier, 2003 : Interaction of a Coastal Current with a Gulf : Application to the Shelf Circulation of the Gulf of Lions in the Mediterranean Sea. *J. Phys. Oceanograph.*, **33** (1), 188–206, doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0188:IOACCW>2.0.CO;2.
- Edson, J., and Coauthors, 2007 : The Coupled Boundary Layers and Air-Sea Transfer experiment in low winds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88** (3), 341–356, doi.org/10.1175/BAMS-88-3-341.
- Ernst, J. A., and M. Matson, 1983 : A Mediterranean tropical storm? *Weather*, **38** (11), 332–337, doi.org/10.1002/j.1477-8696.1983.tb04818.x.
- Estournel, C., P. Broche, P. Marsaleix, J.-L. Devenon, F. Auclair, and R. Vehil, 2001 : The Rhone River Plume in Unsteady Conditions :

- Numerical and Experimental Results. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **53** (1), 25–38, doi.org/10.1006/ecss.2000.0685.
- Estournel, C., X. Durrieu de Madron, P. Marsaleix, F. Auclair, C. Julliard, and R. Vehil, 2003 : Observation and modeling of the winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lion under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment). *J. Geophys. Res. Oceans*, **108** (C3), doi.org/10.1029/2001JC000825.
- Estournel, C., and Coauthors, 2016 : HyMeX-SOP2 : The Field Campaign Dedicated to Dense Water Formation in the Northwestern Mediterranean. *Oceanography*, **29** (4), 196–206, doi.org/10.5670/oceanog.2016.94.
- Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev, and J. B. Edson, 2003 : Bulk parameterization of air-sea fluxes : Updates and verification for the COARE algorithm. *J. Climate*, **16**, 571–591.
- Fallmann, J., H. Lewis, J. C. Sanchez, and A. Lock, 2019 : Impact of high-resolution ocean–atmosphere coupling on fog formation over the North Sea. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145** (720), 1180–1201, doi.org/10.1002/qj.3488.
- Faure, G., P. Chambon, and P. Brousseau, 2020 : Operational Implementation of the AROME Model in the Tropics : Multiscale Validation of Rainfall Forecasts. *Wea. Forecasting*, **35** (2), 691–710, doi.org/10.1175/WAF-D-19-0204.1.
- Ferretti, R., and Coauthors, 2014 : Overview of the first HyMeX Special Observation Period over Italy : observations and model results. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **18** (5), 1953–1977, doi.org/10.5194/hess-18-1953-2014.
- Ferry, N., L. Parent, G. Garric, B. Barnier, N. C. Jourdain, and the Mercator Ocean team, 2010 : Mercator global Eddy permitting ocean reanalysis GLORYS1V1 : Description and results. *Mercator Ocean Quarterly Newsletter*, **36**, 15–27.
- Feser, F., B. Rockel, H. von Storch, J. Winterfeldt, and M. Zahn, 2011 : Regional Climate Models Add Value to Global Model Data : A Review and Selected Examples. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92** (9), 1181–1192, doi.org/10.1175/2011BAMS3061.1.
- Flaounas, E., A. Di Luca, P. Drobinski, S. Mailler, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, and C. Lebeaupin Brossier, 2016 : Cyclone contribution to the Mediterranean Sea water budget. *Clim. Dyn.*, **46** (3), 913–927, doi.org/10.1007/s00382-015-2622-1.
- Flaounas, E., P. Drobinski, M. Vrac, S. Bastin, C. Lebeaupin-Brossier, M. Stéfanon, M. Borga, and J.-C. Calvet, 2013 : Precipitation and temperature space–time variability and extremes in the Mediterranean region : evaluation of dynamical and statistical downscaling methods. *Clim. Dyn.*, **40** (11), 2687–2705, doi.org/10.1007/s00382-012-1558-y.
- Flaounas, E., S. Raveh-Rubin, H. Wernli, P. Drobinski, and S. Bastin, 2015 : The dynamical structure of intense Mediterranean cyclones. *Clim. Dyn.*, **44** (9), 2411–2427, doi.org/10.1007/s00382-014-2330-2.
- Font, J., J. Salat, and J. Tintore, 1988 : Permanent features of the circulation in the Catalan Sea. *Oceanologica Acta, Special issue 'Pelagic Mediterranean Oceanography'*, **9**, 51–57, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00267/37808/>.
- Font J, G. E., Garcialadona E, 1995 : The seasonality of mesoscale motion in the northern current of the western mediterranean - several years of evidence. *Oceanologica Acta*, **18** (2), 207–219, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00096/20772/>.
- Fourrié, N., E. Bresson, M. Nuret, C. Jany, P. Brousseau, A. Doerenbecher, M. Kreitz, O. Nuissier, E. Sevault, H. Bénichou, M. Amodei, and F. Pouponneau, 2015 : AROME-WMED, a real-time mesoscale model designed for HyMeX Special Observation Periods. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 1919–1941, doi.org/10.5194/gmd-8-1919-2015.
- Foussard, A., G. Lapeyre, and R. Plougonven, 2019 : Storm Track Response to Oceanic Eddies in Idealized Atmospheric Simulations. *J. Climate*, **32** (2), 445–463, doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0415.1.
- Fraysse, M., I. Pairaud, O. N. Ross, V. M. Faure, and C. Pinazo, 2014 : Intrusion of Rhone River diluted water into the Bay of Marseille : Generation processes and impacts on ecosystem functioning. *J. Geophys. Res. Oceans*, **119** (10), 6535–6556, doi.org/10.1002/2014JC010022.
- Fuda, J.-L., G. Etiope, C. Millot, P. Favali, M. Calcara, G. Smriglio, and E. Boschi, 2002 : Warming, salting and origin of the Tyrrhenian Deep Water. *Geosci. Res. Lett.*, **29** (19), 1898, doi.org/10.1029/2001GL014072.
- Gangloff, A., R. Verney, D. Doxaran, A. Ody, and C. Estournel, 2017 : Investigating Rhône River plume (Gulf of Lions, France) dynamics using metrics analysis from the MERIS 300m Ocean Color archive (2002-2012). *Continental Shelf Research*, **144**, 98–111, doi.org/10.1016/j.csr.2017.06.024.
- Garcia-Lafuente, J., N. Cano, M. Vargas, J. P. Rubin, and A. Hernández-Guerra, 1998 : Evolution of the Alboran Sea hydrographic structures during July 1993. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, **45** (1), 39–65, doi.org/10.1016/S0967-0637(97)00216-1.
- García, M. J. L., C. Millot, J. Font, and E. García-Ladona, 1994 : Surface circulation variability in the Balearic Basin. *J. Geophys. Res. Oceans*, **99** (C2), 3285–3296, doi.org/10.1029/93JC02114.
- Garreau, P., V. Garnier, and A. Schaeffer, 2011 : Eddy resolving modelling of the Gulf of Lions and Catalan Sea. *Ocean Dyn.*, **61** (7), 991–1003, doi.org/10.1007/s10236-011-0399-2.
- Gaspar, P., Y. Grégoris, and J.-M. Lefevre, 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), 16 179–16 193.
- Gentile, E. S., S. L. Gray, J. F. Barlow, H. W. Lewis, and J. M. Edwards, 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, doi.org/10.1007/s10546-021-00614-4.
- Gentile, E. S., S. L. Gray, and H. W. Lewis, 2022 : The sensitivity of probabilistic convective-scale forecasts of an extratropical cyclone to atmosphere–ocean–wave coupling. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **148** (743), 685–710, doi.org/10.1002/qj.4225.
- Gilbert, J., and M. C. Llasat, 2018 : Circulation weather types associated with extreme flood events in Northwestern Mediterranean.

- International Journal of Climatology*, **38** (4), 1864–1876, doi.org/10.1002/joc.5301.
- Giordani, H., C. Lebeaupin-Brossier, F. Léger, and G. Caniaux, 2017 : A PV-approach for dense water formation along fronts : Application to the Northwestern Mediterranean. *J. Geophys. Res. Oceans*, **122** (2), 995–1015, doi.org/10.1002/2016JC012019.
- Giorgi, F., 2006 : Climate change hot-spots. *Geosci. Res. Lett.*, **33** (8), doi.org/10.1029/2006GL025734.
- Giorgi, F., C. Jones, and G. R. Asrar, 2009 : Addressing climate information needs at the regional level : the CORDEX framework. *WMO Bull.*, **58** (3), 175–183.
- Grayek, S., A. Wiese, H. T. M. Ho-Hagemann, and J. Staneva, 2023 : Added value of including waves into a coupled atmosphere–ocean model system within the North Sea area. *Frontiers in Marine Science*, **10**, doi.org/10.3389/fmars.2023.1104027.
- Gualdi, S., and Coauthors, 2013 : The CIRCE Simulations : Regional Climate Change Projections with Realistic Representation of the Mediterranean Sea. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94** (1), 65–81, doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00136.1.
- Gustafsson, N., L. Nyberg, and A. Omstedt, 1998 : Coupling of a High-Resolution Atmospheric Model and an Ocean Model for the Baltic Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **126** (11), 2822–2846, doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2822:COAHRA>2.0.CO;2.
- Guyenon, A., M. Baklouti, F. Diaz, J. Palmieri, J. Beuvier, C. Lebeaupin-Brossier, T. Arsouze, K. Béranger, J.-C. Dutay, and T. Moutin, 2015 : New insights into the organic carbon export in the Mediterranean Sea from 3-D modeling. *Biogeosciences*, **12** (23), 7025–7046, doi.org/10.5194/bg-12-7025-2015.
- Hamon, M., J. Beuvier, S. Somot, J.-M. Lellouche, E. Greiner, G. Jordà, M.-N. Bouin, T. Arsouze, K. Béranger, F. Sevault, C. Dubois, M. Drevillon, and Y. Drillet, 2016 : Design and validation of MEDRYS, a Mediterranean Sea reanalysis over the period 1992–2013. *Ocean Sci.*, **12** (2), 577–599, doi.org/10.5194/os-12-577-2016.
- Harris, C., 2018 : Coupled Atmosphere-Ocean Modelling. *New Frontiers in Operational Oceanography*, E. Chassignet, A. Pascual, J. Tintoré, and J. Verron, Eds., GODAE Ocean View, GODAE, 445–464, doi.org/10.17125/gov2018.ch16.
- Harzallah, A., G. Jordà, C. Dubois, G. Sannino, A. Carillo, L. Li, T. Arsouze, L. Cavicchia, J. Beuvier, and N. Akhtar, 2018 : Long term evolution of heat budget in the Mediterranean Sea from Med-CORDEX forced and coupled simulations. *Clim. Dyn.*, **51** (3), 1145–1165, doi.org/10.1007/s00382-016-3363-5.
- Herrmann, M. J., and S. Somot, 2008 : Relevance of ERA40 dynamical downscaling for modeling deep convection in the Mediterranean Sea. *Geosci. Res. Lett.*, **35** (4), doi.org/10.1029/2007GL032442.
- Hodur, R. M., 1997 : The Naval Research Laboratory’s Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS). *Mon. Wea. Rev.*, **125** (7), 1414–1430, doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<1414:TNRLSC>2.0.CO;2.
- Hoerling, M., J. Eischeid, J. Perlwitz, X. Quan, T. Zhang, and P. Pegion, 2012 : On the Increased Frequency of Mediterranean Drought. *J. Climate*, **25** (6), 2146–2161, doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00296.1.
- Homar, V., R. Romero, C. Ramis, and S. Alonso, 2002 : Numerical study of the October 2000 torrential precipitation event over Eastern Spain : analysis of the synoptic-scale stationarity. *Ann. Geophysic.*, **20**, 2047–2066.
- Hu, Z. Y., A. A. Petrenko, A. M. Doglioli, and I. Dekeyser, 2011 : Numerical study of eddy generation in the western part of the Gulf of Lion. *J. Geophys. Res. Oceans*, **116** (C12), doi.org/10.1029/2011JC007074.
- HyMeX White Book, 2008 : *Towards a major field experiment in 2010-2020*. CNRS/INSU & Météo-France, 124 pp.
- Jacob, D., and Coauthors, 2014 : Euro-cordex : new high-resolution climate change projections for european impact research. *Regional Environmental Change*, **14** (2), 563–578, doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2.
- Jansa, A., 1986 : Genoa cyclones and other Western Mediterranean cyclones. Tech. Rep. TD No. 128, WMO, 59-70 pp.
- Jansa, A., A. Genoves, M. A. Picornell, J. Campins, R. Riosalido, and O. Carretero, 2001 : Western Mediterranean cyclones and heavy rain. Part 2 : Statistical approach. *Meteorological Applications*, **8** (1), 43–56, doi.org/10.1017/S1350482701001049.
- Janssen, P. A. E. M., 1991 : Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanograph.*, **21** (11), 1631–1642.
- Janssen, P. A. E. M., J. D. Doyle, J. Bidlot, B. Hansen, L. Isaksen, and P. Viterbo, 2001 : Impact and feedback of ocean waves on the atmosphere. Tech. Rep. 341, ECMWF Technical Memoranda Series, 32 pp.
- Jin, E. K., J. L. Kinter, B. Wang, C.-K. Park, I.-S. Kang, B. P. Kirtman, J.-S. Kug, A. Kumar, J.-J. Luo, J. Schemm, J. Shukla, and T. Yamagata, 2008 : Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean–atmosphere models. *Clim. Dyn.*, **31**, 647–664, doi.org/10.1007/s00382-008-0397-3.
- Jones, P., 1999 : Conservative remapping : First- and second-order conservative remapping. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2204–2210.
- Josey, S. A., 2003 : Changes in the heat and freshwater forcing of the eastern Mediterranean and their influence on deep water formation. *J. Geophys. Res. Oceans*, **108** (C7), doi.org/10.1029/2003JC001778.
- Kersalé, M., A. A. Petrenko, A. M. Doglioli, I. Dekeyser, and F. Nencioli, 2013 : Physical characteristics and dynamics of the coastal Latex09 Eddy derived from in situ data and numerical modeling. *J. Geophys. Res. Oceans*, **118** (1), 399–409, doi.org/10.1029/2012JC008229.
- Khodayar, S., S. Davolio, P. Di Girolamo, C. Lebeaupin Brossier, E. Flaounas, N. Fourrie, K.-O. Lee, D. Ricard, B. Vie, F. Bouttier, A. Caldas-Alvarez, and V. Ducrocq, 2021 : Overview towards improved understanding of the mechanisms leading to heavy precipitation in the western Mediterranean : lessons learned from HyMeX. *Atmos. Chem. Phys.*, **21** (22), 17 051–17 078, doi.org/10.5194/acp-21-17051-2021.
- La Violette, P. E., 1984 : The Advection of Submesoscale Thermal Features in the Alboran Sea Gyre. *J. Phys. Oceanograph.*, **14** (3),

- 550–565, doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<0550:TAOSTF>2.0.CO;2.
- Lac, C., and Coauthors, 2018 : Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geosci. Model Dev.*, **11** (5), 1929–1969, doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018.
- Lafore, J.-P., J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, J. Duron, C. Fischer, P. Hérelil, P. Mascart, V. Masson, J.-P. Pinty, J.-L. Redelsperger, E. Richard, and J. Vilà-Guerau de Arellano, 1998 : The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I : Adiabatic formulation and control simulations. Scientific objectives and experimental design. *Ann. Geophysic.*, **16** (1), 90–109.
- Laloyaux, P., M. Balmaseda, D. Dee, K. Mogensen, and P. A. E. M. Janssen, 2016a : A coupled data assimilation system for climate reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 65–78, doi.org/10.1002/qj.2629.
- Laloyaux, P., M. Balmaseda, D. Dee, K. Mogensen, and P. A. E. M. Janssen, 2016b : Erratum to 'A coupled data assimilation system for climate reanalysis'. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 1564, doi.org/10.1002/qj.2800.
- Laloyaux, P., S. Frolov, B. Ménérier, and M. Bonavita, 2018 : Implicit and explicit cross-correlations in coupled data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **144** (715), 1851–1863, doi.org/10.1002/qj.3373.
- Langlais, C., B. Barnier, J. Molines, P. Fraunié, D. Jacob, and S. Kotlarski, 2009 : Evaluation of a dynamically downscaled atmospheric reanalyse in the prospect of forcing long term simulations of the ocean circulation in the Gulf of Lions. *Ocean Modelling*, **30** (4), 270 – 286, doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.07.004.
- Larson, J., R. Jacob, and E. Ong, 2005 : A New Fortran90 Toolkit for Building Multiphysics Parallel Coupled Models. *Int. J. High Perf. Comp. App.*, **19**, 277–292, doi.org/10.1177/1094342005056116.
- Laurantin, O., 2008 : ANTILOPE : Hourly rainfall analysis merging radar and rain gauge data. Proceedings, *Weather Radar and Hydrology Conference*.
- Le Moigne, P., 2018 : SURFEX scientific documentation. Tech. rep., Centre National de Recherches Météorologiques, 304pp pp. [https://www.umr-cnrm.fr/surfex/IMG/pdf/surfex\\_scidoc\\_v8.1.pdf](https://www.umr-cnrm.fr/surfex/IMG/pdf/surfex_scidoc_v8.1.pdf).
- Lea, D. J., I. Mirouze, M. J. Martin, R. R. King, A. Hines, D. Walters, and M. Thurlow, 2015 : Assessing a New Coupled Data Assimilation System Based on the Met Office Coupled Atmosphere–Land–Ocean–Sea Ice Model. *Mon. Wea. Rev.*, **143** (11), 4678–4694, doi.org/10.1175/MWR-D-15-0174.1.
- Lebeaupin, C., V. Ducrocq, and H. Giordani, 2006 : Sensitivity of mediterranean torrential rain events to the sea surface temperature based on high-resolution numerical forecasts. *J. Geophys. Res.*, **111**, D12 110, doi.org/10.1029/2005JD006541.
- Lebeaupin Brossier, C., 2007 : Étude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluie intense en région méditerranéenne. Ph.D. thesis, University Toulouse III, Paul Sabatier, 228 pp.
- Lebeaupin Brossier, C., S. Bastin, K. Béranger, and P. Drobinski, 2015 : Regional mesoscale air-sea coupling impacts and extreme meteorological events role on the Mediterranean Sea water budget. *Clim. Dyn.*, **44** (3), 1029–1051, doi.org/10.1007/s00382-014-2252-z.
- Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger, C. Delteil, and P. Drobinski, 2011 : The Mediterranean response to different space-time resolution atmospheric forcings using perpetual mode sensitivity simulations. *Ocean Modelling*, **36** (1), 1 – 25, doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.10.008.
- Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger, and P. Drobinski, 2012a : Ocean response to strong precipitation events in the Gulf of Lions (north-western Mediterranean Sea) : a sensitivity study. *Ocean Dyn.*, **62** (2), 213– 226, doi.org/10.1007/s10236-011-0502-8.
- Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger, and P. Drobinski, 2012b : Sensitivity of the northwestern Mediterranean Sea coastal and thermohaline circulations simulated by the 1/12°-resolution ocean model NEMO-MED12 to the spatial and temporal resolution of atmospheric forcing. *Ocean Modelling*, **43-44**, 94 – 107, doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.12.007.
- Lebeaupin Brossier, C., and P. Drobinski, 2009 : Numerical high-resolution air-sea coupling over the Gulf of Lions during two tramontane/mistral events. *J. Geophys. Res.*, **114**, D10 110, doi.org/10.1029/2008JD011601.
- Lebeaupin Brossier, C., P. Drobinski, K. Béranger, S. Bastin, and F. Orain, 2013 : Ocean memory effect on the dynamics of coastal heavy precipitation preceded by a mistral event in the northwestern Mediterranean. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139** (675), 1583–1597, doi.org/10.1002/qj.2049.
- Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq, and H. Giordani, 2008 : Sensitivity of Mediterranean heavy rain events to the sea surface fluxes parameterization in high-resolution numerical modelling. *J. Geophys. Res.*, **113**, D21 109, doi.org/10.1029/2007JD009613.
- Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq, and H. Giordani, 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, doi.org/10.1002/qj.338.
- Lebeaupin Brossier, C., F. Léger, H. Giordani, J. Beuvier, M.-N. Bouin, V. Ducrocq, and N. Fourrié, 2017 : Dense water formation in the north-western Mediterranean area during HyMeX-SOP2 in 1/36° ocean simulations : Ocean-atmosphere coupling impact. *J. Geophys. Res. Oceans*, **122**, 5749–5773, doi.org/10.1002/2016JC012526.
- Lebeaupin Brossier, C., T. Arsouze, K. Béranger, M.-N. Bouin, E. Bresson, V. Ducrocq, H. Giordani, M. Nuret, R. Rainaud, and I. Taupier-Letage, 2014 : Ocean Mixed Layer responses to intense meteorological events during HyMeX-SOP1 from a high-resolution ocean simulation. *Ocean Modelling*, **84**, 84–103, doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.09.009.
- Lehmann, A., P. Lorenz, and D. Jacob, 2004 : Modelling the exceptional Baltic Sea inflow events in 2002–2003. *Geosci. Res. Lett.*, **31** (21), doi.org/10.1029/2004GL020830.
- Lellouche, J.-M., O. Le Galloudec, M. Drévilion, C. Régnier, E. Greiner, G. Garric, N. Ferry, C. Desportes, C.-E. Testut, C. Bricaud,

- R. Bourdallé-Badie, B. Tranchant, M. Benkiran, Y. Drillet, A. Daudin, and C. De Nicola, 2013 : Evaluation of global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan. *Ocean Sci.*, **9**, 57–81, doi.org/10.5194/os-9-57-2013.
- Lellouche, J.-M., E. Greiner, O. Le Galloudec, G. Garric, C. Regnier, M. Drevillon, M. Benkiran, C.-E. Testut, R. Bourdalle-Badie, F. Gasparin, O. Hernandez, B. Levier, Y. Drillet, E. Remy, and P.-Y. Le Traon, 2018 : Recent updates to the Copernicus Marine Service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12° high-resolution system. *Ocean Sci.*, **14** (5), 1093–1126, doi.org/10.5194/os-14-1093-2018.
- Lemarié, F., 2015 : Numerical modification of atmospheric models to include the feedback of oceanic currents on air-sea fluxes in ocean-atmosphere coupled models. Technical Report RT-0464, INRIA Grenoble - Rhône-Alpes; Laboratoire Jean Kuntzmann; Université de Grenoble I - Joseph Fourier; INRIA. <https://inria.hal.science/hal-01184711>.
- Lewis, H. W., J. Siddorn, J. M. Castillo Sanchez, J. Petch, J. M. Edwards, and T. Smyth, 2019a : Evaluating the impact of atmospheric forcing and air–sea coupling on near-coastal regional ocean prediction. *Ocean Sci.*, **15** (3), 761–778, doi.org/10.5194/os-15-761-2019.
- Lewis, H. W., and Coauthors, 2018 : The UKC2 regional coupled environmental prediction system. *Geosci. Model Dev.*, **11** (1), 1–42, doi.org/10.5194/gmd-11-1-2018.
- Lewis, H. W., J. M. Castillo Sanchez, J. Siddorn, R. R. King, M. Tonani, A. Saulter, P. Sykes, A.-C. Pequignet, G. P. Weedon, T. Palmer, J. Staneva, and L. Bricheno, 2019b : Can wave coupling improve operational regional ocean forecasts for the north-west European Shelf? *Ocean Sci.*, **15** (3), 669–690, doi.org/10.5194/os-15-669-2019.
- Lewis, H. W., J. M. Castillo Sanchez, A. Arnold, J. Fallmann, A. Saulter, J. Graham, M. Bush, J. Siddorn, T. Palmer, A. Lock, J. Edwards, L. Bricheno, A. Martínez-de la Torre, and J. Clark, 2019c : The UKC3 regional coupled environmental prediction system. *Geosci. Model Dev.*, **12** (6), 2357–2400, doi.org/10.5194/gmd-12-2357-2019.
- Lionello, P., P. Malanotte-Rizzoli, and R. Boscolo, 2006a : *Mediterranean Climate Variability*. Ed. Elsevier.
- Lionello, P., P. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo, P. Alpert, V. Artale, L. Li, J. Luterbacher, W. May, R. Trigo, M. Tsimplis, U. Ulbrich, and E. Xoplaki, 2006b : The Mediterranean climate : An overview of the main characteristics and issues. *Mediterranean Climate Variability*, P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, and R. Boscolo, Eds., Developments in Earth and Environmental Sciences, Vol. 4, Elsevier, 1–26, doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80003-0.
- Liu, B., C. L. Guan, L. A. Xie, and D. L. Zhao, 2012 : An investigation of the effects of wave state and sea spray on an idealized typhoon using an air-sea coupled modeling system. *Adv. Atmos. Sci.*, **29** (2), 391–406, doi.org/10.1007/s00376-011-1059-7.
- Loggisci, N., M. W. Qian, N. Rachev, C. Cassardo, A. Longhetto, R. Purini, P. Trivero, S. Ferrarese, and C. Giraud, 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), doi.org/10.1029/2003JD003956.
- Long, Z., and W. Perrie, 2012 : Air-sea interactions during an Arctic storm. *J. Geophys. Res.*, **117**, D15 103, doi.org/10.1029/2011JD016985.
- Ludwig, W., E. Dumont, M. Meybeck, and S. Heussner, 2009 : River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea : Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? *Progr. Oceanogr.*, **80** (3), 199 – 217, doi.org/10.1016/j.pocean.2009.02.001.
- Luo, J.-J., S. Masson, S. Behera, S. Shingu, and T. Yamagata, 2005 : Seasonal Climate Predictability in a Coupled OAGCM Using a Different Approach for Ensemble Forecasts. *J. Climate*, **18** (21), 4474–4497, doi.org/10.1175/JCLI3526.1.
- Léger, F., C. Lebeauin Brossier, H. Giordani, T. Arsouze, J. Beuvier, M.-N. Bouin, É. Bresson, V. Ducrocq, N. Fourrié, and M. Nuret, 2016 : Dense water formation in the north-western Mediterranean area during HyMeX-SOP2 in 1/36° ocean simulations : Sensitivity to initial conditions. *J. Geophys. Res. Oceans*, **121** (8), 5549–5569, doi.org/10.1002/2015JC011542.
- Madec, G., and the NEMO system team, 2008 : NEMO ocean engine. Tech. Rep. 27, Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France.
- Madec, G., and Coauthors, 2017 : NEMO ocean engine. Zenodo, revision 8625 from SVN repository (missing links), doi.org/10.5281/zenodo.1472492.
- Manabe, S., and K. Bryan, 1969 : Climate Calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model. *J. Atmos. Sci.*, **26** (4), 786–789, doi.org/10.1175/1520-0469(1969)026<0786:CCWACO>2.0.CO;2.
- Mancho, A. M., E. Hernández-García, D. Small, S. Wiggins, and V. Fernández, 2008 : Lagrangian Transport through an Ocean Front in the Northwestern Mediterranean Sea. *J. Phys. Oceanograph.*, **38** (6), 1222–1237, doi.org/10.1175/2007JPO3677.1.
- Marshall, J., and F. Schott, 1999 : Open-ocean convection : Observations, theory, and models. *Rev. Geophys.*, **37** (1), 1–64, doi.org/10.1029/98RG02739.
- Martínez, C., J. Campins, A. Jansà, and A. Genovés, 2008 : Heavy rain events in the Western Mediterranean : an atmospheric pattern classification. *Adv. Sci. Res.*, **2** (1), 61–64, doi.org/10.5194/asr-2-61-2008.
- Masse, A., 2020 : Mise au point et évaluation de la pertinence d’indicateurs océaniques pour la prévision des épisodes méditerranéens. Projet de Fin d’Etude IENM, Ecole Nationale de la Météorologie, 30 pp.
- Masson, V., and Coauthors, 2013 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 929–960, doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013.
- Meroni, A. N., A. Parodi, and C. Pasquero, 2018a : Role of SST patterns on surface wind modulation of a heavy midlatitude precipitation event. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **123**, 9081–9096, doi.org/10.1029/2018JD028276.

- Meroni, A. N., L. Renault, A. Parodi, and C. Pasquero, 2018b : Role of the Oceanic Vertical Thermal Structure in the Modulation of Heavy Precipitations Over the Ligurian Sea. *Pure App. Geophys.*, **175** (11), 4111–4130, doi.org/10.1007/s00024-018-2002-y.
- Mertens, C., and F. Schott, 1998 : Interannual Variability of Deep-Water Formation in the Northwestern Mediterranean. *J. Phys. Oceanograph.*, **28** (7), 1410–1424, doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<1410:IVODWF>2.0.CO;2.
- Miglietta, M. M., and R. Rotunno, 2019 : Development mechanisms for mediterranean tropical-like cyclones (medicanes). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145** (721), 1444–1460, doi.org/10.1002/qj.3503.
- Millot, C., 1982 : Analysis of upwelling in the Gulf of Lions. *Proceeding of the 13th International Liège Colloquium on Ocean Hydrodynamics*, Elsevier Oceanography Series, Amsterdam, The Netherland, Vol. 34, 143–153.
- Millot, C., 1991 : Mesoscale and seasonal variabilities of the circulation in the western Mediterranean. *Dyn. Atmos. Oc.*, **15** (3), 179–214, doi.org/10.1016/0377-0265(91)90020-G.
- Millot, C., 1999 : Circulation in the Western Mediterranean Sea. *J. Mar. Syst.*, **20** (1-4), 423–442.
- Millot, C., and I. Taupier-Letage, 2005 : Circulation in the Mediterranean Sea. *The Mediterranean Sea*, A. Salio, Ed., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 29–66, doi.org/10.1007/b107143.
- Millot, C., I. Taupier-Letage, and M. Benzohra, 1990 : The Algerian eddies. *Earth-Science Reviews*, **27** (3), 203–219, doi.org/10.1016/0012-8252(90)90003-E.
- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S.-P. Xie, and R. J. Small, 2008 : Influence of the Gulf Stream on the troposphere. *Nature*, **452**, 206–209, doi.org/10.1038/nature06690.
- Mogensen, K., L. Magnusson, and J.-R. Bidlot, 2017 : Tropical Cyclone Sensitivity to Ocean Coupling. *ECMWF Technical Memorandum*, (794), doi.org/10.21957/dha6h4g4f, <https://www.ecmwf.int/node/16980>.
- Molini, L., A. Parodi, N. Rebora, and G. C. Craig, 2011 : Classifying severe rainfall events over Italy by hydrometeorological and dynamical criteria. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137** (654), 148–154, doi.org/10.1002/qj.741.
- Morel, C., and S. Senesi, 2002 : A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery. II : Characteristics of European mesoscale convective systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128** (584), 1973–1995, doi.org/10.1256/003590002320603494.
- Munier, S., 2019 : Increasing the spatial resolution of the CTRIP routing model : hydrological impacts over France. *CNRM internal Seminar*, Toulouse, France, CNRM, 1-31, [https://www.umr-cnrm.fr/surfex/IMG/pdf/20190319\\_munier\\_suw\\_ctrrip12d.pdf](https://www.umr-cnrm.fr/surfex/IMG/pdf/20190319_munier_suw_ctrrip12d.pdf).
- Nabat, P., S. Somot, and M. Mallet, 2016 : Les aérosols, composants essentiels du système climatique régional : illustrations pour le climat méditerranéen. *La Météorologie*, **94**, 19–26, doi.org/10.4267/2042/60701.
- Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto, and A. Shimpo, 2013 : Observed Associations Among Storm Tracks, Jet Streams and Midlatitude Oceanic Fronts. *Earth's Climate*, Amer. Geophys. Union, 329–345, doi.org/10.1029/147GM18.
- Naudin, J.-J., G. Cauwet, C. Fajon, L. Oriol, S. Terzi, J.-L. Devenon, and P. Broche, 2001 : Effect of mixing on microbial communities in the Rhone River plume. *J. Mar. Syst.*, **28** (3), 203–227, doi.org/10.1016/S0924-7963(01)00004-5.
- Nicholls, S. D., and S. G. Decker, 2015 : Impact of Coupling an Ocean Model to WRF Nor'easter Simulations. *Mon. Wea. Rev.*, **143** (12), 4997–5016, doi.org/10.1175/MWR-D-15-0017.1.
- Nihoul, J. C. J., 1985 : *Coupled Ocean-Atmosphere Models*, Elsevier Oceanography Series, Vol. 40. Ed. Elsevier, doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70693-7.
- Noilhan, J., and S. Planton, 1989 : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117** (3), 536–549.
- Nuissier, O., V. Ducrocq, D. Ricard, C. Lebeaupin, and S. Anquetin, 2008 : A numerical study of three catastrophic precipitating events over Western Mediterranean region (Southern France). part I : Numerical framework and synoptic ingredients. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134** (630), 111–130, doi.org/10.1002/qj.200.
- Nuissier, O., B. Joly, A. Joly, V. Ducrocq, and P. Arbogast, 2011 : A statistical downscaling to identify the large-scale circulation patterns associated with heavy precipitation events over southern France. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1812–1827, doi.org/10.1002/qj.866.
- Oddo, P., A. Bonaduce, N. Pinardi, and A. Guarneri, 2014 : Sensitivity of the Mediterranean sea level to atmospheric pressure and free surface elevation numerical formulation in NEMO. *Geosci. Model Dev.*, **7** (6), 3001–3015, doi.org/10.5194/gmd-7-3001-2014.
- Olabarrieta, M., J. C. Warner, B. Armstrong, J. B. Zambon, and R. He, 2012 : Ocean-atmosphere dynamics during Hurricane Ida and Nor'Ida : An application of the coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling*, **43-44**, 112–137.
- Olita, A., R. Sorgente, S. Natale, S. Gaberšek, A. Ribotti, A. Bonanno, and B. Patti, 2007 : Effects of the 2003 European heatwave on the Central Mediterranean Sea : surface fluxes and the dynamical response. *Ocean Sci.*, **3** (2), 273–289, doi.org/10.5194/os-3-273-2007.
- Omrani, H., T. Arsouze, K. Béranger, M. Boukthir, P. Drobinski, C. Lebeaupin-Brossier, and H. Mairech, 2016 : Sensitivity of the sea circulation to the atmospheric forcing in the sicily channel. *Progr. Oceanogr.*, **140**, 54 – 68, doi.org/10.1016/j.pocean.2015.10.007.
- Omrani, H., P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, C. Lebeaupin-Brossier, and S. Mailler, 2017 : Spatial and temporal variability of wind energy resource and production over the north western mediterranean sea : Sensitivity to air-sea interactions. *Renewable Energy*, **101**, 680 – 689, doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.028.

- Oost, W., G. Komen, C. Jacobs, and C. Van Oort, 2002 : New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **103** (3), 409 – 438, doi.org/10.1023/A:1014913624535.
- Pages, R., M. Baklouti, N. Barrier, C. Richon, J. C. Dutay, and T. Moutin, 2020 : Changes in rivers inputs during the last decades significantly impacted the biogeochemistry of the eastern Mediterranean basin : a modelling study. *Progr. Oceanogr.*, **181**, p. art. 102242 [13p.], doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102242.
- Palmiéri, J., 2014 : Biogeochemical modelling of the Mediterranean Sea, with the NEMO-MED12/PISCES coupled regional model. Ph.D. thesis, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 214pp pp., <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01221529>.
- Parrilla, G., and T. H. Kinder, 1987 : The Physical Oceanography of the Alboran Sea. Tech. rep., Naval Ocean Research and Development Activity (NORDA), Mississippi, 26 pp.
- Peliz, A., D. Boutov, and A. Teles-Machado, 2013 : The alboran sea mesoscale in a long term high resolution simulation : Statistical analysis. *Ocean Modelling*, **72**, 32–52, doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.07.002.
- Pellerin, P., H. Ritchie, F. J. Saucier, F. Roy, S. Desjardins, M. Valin, and V. Lee, 2004 : Impact of a Two-Way Coupling between an Atmospheric and an Ocean-Ice Model over the Gulf of St. Lawrence. *Mon. Wea. Rev.*, **132** (6), 1379–1398, doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1379:IOATCB>2.0.CO;2.
- Penny, S. G., and Coauthors, 2017 : Coupled data assimilation for integrated Earth system analysis and prediction : Goals, challenges and recommendations. Tech. rep., WWRP WMO, 59 pp.
- Pereira, M. G., R. M. Trigo, C. C. da Camara, J. M. Pereira, and S. M. Leite, 2005 : Synoptic patterns associated with large summer forest fires in portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, **129** (1), 11–25, doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.007.
- Perlin, N., E. D. Skillingstad, R. M. Samelson, and P. L. Barbour, 2007 : Numerical simulation of air-sea coupling during coastal upwelling. *J. Phys. Oceanograph.*, **37**, 2081–2093, doi.org/10.1175/JPO3104.1.
- Petrenko, A., C. Dufau, and C. Estournel, 2008 : Barotropic eastward currents in the western Gulf of Lion, north-western Mediterranean Sea, during stratified conditions. *J. Mar. Syst.*, **74** (1), 406–428, doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.03.004.
- Petrenko, A. A., A. M. Doglioli, F. Nencioli, M. Kersalé, Z. Hu, and F. d’Ovidio, 2017 : A review of the LATEX project : mesoscale to submesoscale processes in a coastal environment. *Ocean Dyn.*, **67** (3), 513–533, doi.org/10.1007/s10236-017-1040-9.
- Pianezze, J., J. Beuvier, C. Lebeau-pin Brossier, G. Samson, G. Faure, and G. Garric, 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, doi.org/10.5194/nhess-22-1301-2022.
- Pianezze, J., C. Barthe, S. Bielli, P. Tulet, S. Jullien, G. Cambon, O. Bousquet, M. Claeys, and E. Cordier, 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. Model. Earth Syst.*, **10**, 801–825, doi.org/10.1002/2017MS001177.
- Pineau-Guillou, L., F. Ardhuin, M.-N. Bouin, J.-L. Redelsperger, B. Chapron, J.-R. Bidlot, and Y. Quilfen, 2018 : Strong winds in a coupled wave–atmosphere model during a North Atlantic storm event : evaluation against observations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **144** (711), 317–332, doi.org/10.1002/qj.3205.
- Pollard, R. T., P. B. Rhines, and R. O. R. Y. Thompson, 1973 : The deepening of the wind-Mixed layer. *Geophysical Fluid Dynamics*, **4** (4), 381–404, doi.org/10.1080/03091927208236105.
- Powers, J. G., and M. T. Stoelinga, 2000 : A Coupled Air-Sea Mesoscale Model : Experiments in Atmospheric Sensitivity to Marine Roughness. *Mon. Wea. Rev.*, **128** (1), 208–228, doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<0208:ACASMM>2.0.CO;2.
- Price, J. F., 1981 : Upper Ocean Response to a Hurricane. *J. Phys. Oceanograph.*, **11** (2), 153–175, doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0153:UORTAH>2.0.CO;2.
- Puillat, I., I. Taupier-Letage, and C. Millot, 2002 : Algerian Eddies lifetime can near 3 years. *J. Mar. Syst.*, **31** (4), 245–259, doi.org/10.1016/S0924-7963(01)00056-2.
- Pullen, J., R. Caldeira, J. D. Doyle, P. May, and R. Tomé, 2017a : Modeling the air-sea feedback system of Madeira Island. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **9** (3), 1641–1664, doi.org/10.1002/2016MS000861.
- Pullen, J., J. D. Doyle, T. Haack, C. Dorman, R. P. Signell, and C. M. Lee, 2007 : Bora event variability and the role of air-sea feedback. *J. Geophys. Res.*, **112** (C3), 1–17, doi.org/10.1029/2006JC003726.
- Pullen, J., J. D. Doyle, and R. P. Signell, 2006 : Two-way air-sea coupling : A study of the Adriatic. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 1465–1483, doi.org/10.1175/MWR3137.1.
- Pullen, J., R. Allard, H. Seo, A. J. Miller, S. Chen, L. P. Pezzi, T. Smith, P. Chu, J. Alves, and R. Caldeira, 2017b : Coupled ocean-atmosphere forecasting at short and medium time scales. *J. Mar. Res.*, **75** (6), 877–921, doi.org/10.1357/002224017823523991.
- Rainaud, R., 2015 : Modélisation couplée océan-atmosphère pour l’étude des évènements météorologiques intenses en Méditerranée occidentale. Ph.D. thesis, University Toulouse III, Paul Sabatier, 218 pp.
- Rainaud, R., C. Lebeau-pin Brossier, V. Ducrocq, and H. Giordani, 2017 : High-resolution air-sea coupling impact on two heavy precipitation events in the Western Mediterranean. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2448–2462, doi.org/10.1002/qj.3098.
- Rainaud, R., C. Lebeau-pin Brossier, V. Ducrocq, H. Giordani, M. Nuret, N. Fourrié, M.-N. Bouin, I. Taupier-Letage, and D. Legain, 2016 : Characterization of air–sea exchanges over the Western Mediterranean Sea during HyMeX SOP1 using the AROME–WMED model.

- Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142** (S1), 173–187, doi.org/10.1002/qj.2480.
- Ramis, C., M. C. Llasat, A. Genovés, and A. Jansà, 1994 : The October-1987 floods in Catalonia : Synoptic and mesoscale mechanisms. *Meteorological Applications*, **1** (4), 337–350, doi.org/10.1002/met.5060010404.
- Ramos, A. M., N. Cortesi, and R. M. Trigo, 2014 : Circulation weather types and spatial variability of daily precipitation in the Iberian Peninsula. *Frontiers in Earth Science*, **2**, 25, doi.org/10.3389/feart.2014.00025.
- Rasmussen, E. A., and J. Turner, 2003 : *Polar Lows : Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*. Cambridge University Press, Cambridge, doi.org/10.1017/CBO9780511524974.
- Ratnam, J., F. Giorgi, A. Kaginalkar, and S. Cozzini, 2009 : Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3-ROMS regional coupled model. *Clim. Dyn.*, **33**, 1–139, doi.org/10.1007/s00382-008-0433-3.
- Renault, L., J. Chiggiato, J. C. Warner, M. Gomez, G. Vizoso, and J. Tintore, 2012a : Coupled atmosphere-ocean-wave simulations of a storm event over the Gulf of Lion and Balearic Sea. *J. Geophys. Res.*, **117**, C09 019, doi.org/10.1029/2012JC007924.
- Renault, L., F. Lemarié, and T. Arsouze, 2019 : On the implementation and consequences of the oceanic currents feedback in ocean-atmosphere coupled models. *Ocean Modelling*, **141**, 101 423, doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.101423.
- Renault, L., T. Oguz, A. Pascual, G. Vizoso, and J. Tintore, 2012b : Surface circulation in the Alboràn Sea (western Mediterranean) inferred from remotely sensed data. *J. Geophys. Res. Oceans*, **117** (C8), doi.org/10.1029/2011JC007659.
- Ribes, A., J. Boé, S. Qasmi, B. Dubuisson, H. Douville, and L. Terray, 2022 : An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth Sys. Dyn.*, **13** (4), 1397–1415, doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022.
- Ribes, A., S. Thao, R. Vautard, B. Dubuisson, S. Somot, J. Colin, S. Planton, and J.-M. Soubeyroux, 2019 : Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Clim. Dyn.*, **52** (1), 1095–1114, doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2.
- Ricard, D., V. Ducrocq, and L. Auger, 2012 : A climatology of the mesoscale environment associated with heavily precipitating events over the Northwestern Mediterranean area. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **51**, 468–488.
- Ricard, D., A.-L. Beaulant, J. Boé, M. Déqué, V. Ducrocq, A. Joly, B. Joly, E. Martin, O. Nuissier, P. Quintana-Segui, A. Ribes, F. Sevault, and S. Somot, 2009 : Projet Cyprim, partie II : Impact du changement climatique sur les événements de pluie intense du bassin méditerranéen. *La Météorologie*, **67**, 19–30, doi.org/10.4267/2042/30036.
- Ricchi, A., M. M. Miglietta, P. P. Falco, A. Benetazzo, D. Bonaldo, A. Bergamasco, M. Sclavo, and S. Carniel, 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, doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.12.023.
- Rizza, U., E. Canepa, A. Ricchi, D. Bonaldo, S. Carniel, M. Morichetti, G. Passerini, L. Santiloni, F. Scremin Puhales, and M. M. Miglietta, 2018 : Influence of Wave State and Sea Spray on the Roughness Length : Feedback on Medicanes. *Atmosphere*, **9** (8), 301, doi.org/10.3390/atmos9080301.
- Roehrig, R., and Coauthors, 2020 : The CNRM Global Atmosphere Model ARPEGE-Climat 6.3 : Description and Evaluation. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **12** (7), e2020MS002 075, doi.org/https://doi.org/10.1029/2020MS002075.
- Romero, R., 2001 : Sensitivity of a heavy-rain-producing western Mediterranean cyclone to embedded potential-vorticity anomalies. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127** (578), 2559–2597, doi.org/10.1002/qj.49712757805.
- Romero, R., A. Martín, V. Homar, S. Alonso, and C. Ramis, 2006 : Predictability of prototype flash flood events in the Western Mediterranean under uncertainties of the precursor upper-level disturbance. *Adv. Geosci.*, **7**, 55–63, doi.org/10.5194/adgeo-7-55-2006.
- Rubio, A., B. Barnier, G. Jordà, M. Espino, and P. Marsaleix, 2009 : Origin and dynamics of mesoscale eddies in the Catalan Sea (NW Mediterranean) : Insight from a numerical model study. *J. Geophys. Res. Oceans*, **114** (C6), doi.org/10.1029/2007JC004245.
- Rudari, R., D. Entekhabi, and G. Roth, 2004 : Terrain and Multiple-Scale Interactions as Factors in Generating Extreme Precipitation Events. *Journal of Hydrometeorology*, **5** (3), 390–404, doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0390:TAMIAF>2.0.CO;2.
- Ruiz, S., J. Font, M. Emelianov, J. Isern-Fontanet, C. Millot, J. Salas, and I. Taupier-Letage, 2002 : Deep structure of an open sea eddy in the Algerian Basin. *J. Mar. Syst.*, **33-34**, 179–195, doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00058-1.
- Ruti, P. M., and Coauthors, 2016 : Med-CORDEX Initiative for Mediterranean Climate Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97** (7), 1187–1208, doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176.1.
- Salas Mélia, D., 2002 : A global coupled sea ice–ocean model. *Ocean Modelling*, **4** (2), 137–172, doi.org/10.1016/S1463-5003(01)00015-4.
- Sammari, C., C. Millot, and L. Prieur, 1995 : Aspects of the seasonal and mesoscale variabilities of the Northern Current in the western Mediterranean Sea inferred from the PROLIG-2 and PROS-6 experiments. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, **42** (6), 893–917, doi.org/10.1016/0967-0637(95)00031-Z.
- San-Miguel-Ayanz, J., J. M. Moreno, and A. Camia, 2013 : Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes : Lessons learned and perspectives. *Forest Ecology and Management*, **294**, 11–22, doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050.
- Sauvage, C., 2019 : Prévission couplée océan-atmosphère des épisodes méditerranéens : Impact d'une meilleure prise en compte des débits des fleuves et de l'état de mer. Ph.D. thesis, University Toulouse III, Paul Sabatier, 194 pp.
- Sauvage, C., C. Lebeaupin Brossier, and M.-N. Bouin, 2021 : Towards kilometer-scale ocean-atmosphere-wave coupled forecast : a case study on a Mediterranean heavy precipitation event. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 11 857–11 887, doi.org/10.5194/acp-21-11857-2021.
- Sauvage, C., C. Lebeaupin Brossier, M.-N. Bouin, and V. Ducrocq, 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, doi.org/10.5194/



acp-20-1675-2020.

- Sauvage, C., C. Lebeauin Brossier, V. Ducrocq, M.-N. Bouin, B. Vincendon, M. Verdecchia, I. Taupier-Letage, and F. Orain, 2018 : Impact of the representation of the freshwater river input in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, **131**, 115 – 131, doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.09.005.
- Scheffknecht, P., E. Richard, and D. Lambert, 2016 : A highly localized high-precipitation event over Corsica. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142** (S1), 206–221, doi.org/10.1002/qj.2795.
- Schepen, A., Y. Everingham, and Q. J. Wang, 2020 : Coupling forecast calibration and data-driven downscaling for generating reliable, high-resolution, multivariate seasonal climate forecast ensembles at multiple sites. *International Journal of Climatology*, **40** (4), 2479–2496, doi.org/10.1002/joc.6346.
- Schott, F., M. Visbeck, U. Send, J. Fischer, L. Stramma, and Y. Desaubies, 1996 : Observations of Deep Convection in the Gulf of Lions, Northern Mediterranean, during the Winter of 1991/92. *J. Phys. Oceanograph.*, **26** (4), 505–524, doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0505:OODCIT>2.0.CO;2.
- Scofield, R. A., 1985 : Satellite convective categories associated with heavy precipitation. Preprints, *6<sup>th</sup> Conf. on Hydrometeorology*, Indianapolis, 42–51.
- Seity, Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, and V. Masson, 2011 : The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 976–991.
- Semtner, A. J., 1984 : Development of efficient, dynamical ocean-atmosphere models for climatic studies. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **23** (3), 353–374.
- Sénési, S., 2014 : Surfex, sea-ice, sea-ice schemes and Gelato. Tech. rep., Centre National de Recherches Météorologiques, 9pp pp. [http://www.umr-cnrm.fr/surfex/IMG/pdf/glt\\_sfx\\_report\\_6.pdf](http://www.umr-cnrm.fr/surfex/IMG/pdf/glt_sfx_report_6.pdf).
- Sénési, S., P. Bougeault, J.-L. Chèze, P. Cosentino, and R.-M. Thepenier, 1996 : The Vaison-La-Romaine Flash Flood : Mesoscale Analysis and Predictability Issues. *Wea. Forecasting*, **11** (4), 417–442, doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0417:TVLRFF>2.0.CO;2.
- Seo, H., A. J. Miller, and J. O. Roads, 2007 : The Scripps Coupled Ocean–Atmosphere Regional (SCOAR) Model, with Applications in the Eastern Pacific Sector. *J. Climate*, **20** (3), 381–402, doi.org/10.1175/JCLI4016.1.
- Sevault, F., S. Somot, A. Alias, C. Dubois, C. Lebeauin-Brossier, P. Nabat, F. Adloff, M. Déqué, and B. Decharme, 2014 : A fully coupled Mediterranean regional climate system model : design and evaluation of the ocean component for the 1980–2012 period. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography*, **66** (1), 23 967, doi.org/10.3402/tellusa.v66.23967.
- Seyfried, L., C. Estournel, P. Marsaleix, and E. Richard, 2019 : Dynamics of the North Balearic Front during an autumn tramontane and mistral storm : air–sea coupling processes and stratification budget diagnostic. *Ocean Sci.*, **15** (1), 179–198, doi.org/10.5194/os-15-179-2019.
- Seyfried, L., P. Marsaleix, E. Richard, and C. Estournel, 2017 : Modelling deep-water formation in the north-west Mediterranean Sea with a new air–sea coupled model : sensitivity to turbulent flux parameterizations. *Ocean Sci.*, **13** (6), 1093–1112, doi.org/10.5194/os-13-1093-2017.
- Siccardi, F., 1996 : Rainstorm hazards and related disasters in the North-West Mediterranean region. *Remote Sensing Reviews*, **14** (1-3), 5–21, doi.org/10.1080/02757259609532311.
- Silvestro, F., S. Gabellani, F. Giannoni, A. Parodi, N. Rebori, R. Rudari, and F. Siccardi, 2012 : A hydrological analysis of the 4 november 2011 event in Genoa. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **12** (9), 2743–2752.
- Simmons, A., S. Uppala, D. Dee, and S. Kobayashi, 2007 : Era-interim : New ecmwf reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF newsletter*, 25–35, doi.org/10.21957/pocnex23c6.
- Skachko, S., M. Buehner, S. Laroche, E. Lapalme, G. Smith, F. Roy, D. Surcel-Colan, J.-M. Bélanger, and L. Garand, 2019 : Weakly coupled atmosphere–ocean data assimilation in the Canadian global prediction system (v1). *Geosci. Model Dev.*, **12** (12), 5097–5112, doi.org/10.5194/gmd-12-5097-2019.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. yu Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008 : A description of the advanced research wrf version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*.
- Skliris, N., 2014 : Past, present and future patterns of the thermohaline circulation and characteristic water masses of the mediterranean sea. *The Mediterranean Sea : Its history and present challenges*, S. Goffredo, and Z. Dubinsky, Eds., Springer Netherlands, Dordrecht, 29–48, doi.org/10.1007/978-94-007-6704-1\_3.
- Small, R., T. Campbell, J. Teixeira, S. Carniel, T. Smith, J. Dykes, S. Chen, and R. Allard, 2011 : Air-sea interaction in the Ligurian Sea : Assessment of a Coupled Ocean-Atmosphere Model using in situ data from LASIE07. *Mon. Wea. Rev.*, **139** (6), 1785–1808, doi.org/10.1175/2010MWR3431.1.
- Small, R., S. Carniel, T. Campbell, J. Teixeira, and R. Allard, 2012 : The response of the Ligurian and Tyrrhenian Seas to a summer Mistral event : A coupled atmosphere-ocean approach. *Ocean Modelling*, **48**, 30–44, doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.02.003.
- Small, R., S. deSzoeke, S. Xie, L. O'Neill, H. Seo, Q. Song, P. Cornillon, M. Spall, and S. Minobe, 2008 : Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dyn. Atmos. Oc.*, **45** (3), 274 – 319, doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001.
- Smith, G. C., F. Roy, and B. Brasnett, 2013 : Evaluation of an operational ice-ocean analysis and forecasting system for the Gulf of St Lawrence. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139** (671), 419–433, doi.org/10.1002/qj.1982.

- Smith, G. C., J.-M. Bélanger, F. Roy, P. Pellerin, H. Ritchie, K. Onu, M. Roch, A. Zadra, D. S. Colan, B. Winter, J.-S. Fontecilla, and D. Deacu, 2018 : Impact of Coupling with an Ice–Ocean Model on Global Medium-Range NWP Forecast Skill. *Mon. Wea. Rev.*, **146** (4), 1157–1180, doi.org/10.1175/MWR-D-17-0157.1.
- Smith, P. J., A. M. Fowler, and A. S. Lawless, 2015 : Exploring strategies for coupled 4D-Var data assimilation using an idealised atmosphere–ocean model. *Tellus*, **67**, 27 025, doi.org/10.3402/tellusa.v67.27025.
- Smith, S., 1988 : Coefficients for sea surface wind stress, heatfluxes and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *J. Geophys. Res.*, **93**, 15 467–15 472.
- Somot, S., P. Ruti, B. Ahrens, E. Coppola, G. Jordà, G. Sannino, and F. Solmon, 2018a : Editorial for the Med-CORDEX special issue. *Clim. Dyn.*, **51** (3), 771–777, doi.org/10.1007/s00382-018-4325-x.
- Somot, S., F. Sevault, M. Déqué, and M. Crépon, 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, doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.10.003.
- Somot, S., L. Houpert, F. Sevault, P. Testor, A. Bosse, I. Taupier-Letage, M.-N. Bouin, R. Waldman, C. Cassou, E. Sanchez-Gomez, X. Durrieu de Madron, F. Adloff, P. Nabat, and M. Herrmann, 2018b : Characterizing, modelling and understanding the climate variability of the deep water formation in the North-Western Mediterranean Sea. *Clim. Dyn.*, **51** (3), 1179–1210, doi.org/10.1007/s00382-016-3295-0.
- Sorgente, R., A. Olita, P. Oddo, L. Fazioli, and A. Ribotti, 2011 : Numerical simulation and decomposition of kinetic energy in the Central Mediterranean : insight on mesoscale circulation and energy conversion. *Ocean Sci.*, **7** (4), 503–519, doi.org/10.5194/os-7-503-2011.
- Staneva, J., S. Grayek, A. Behrens, and H. Günther, 2021 : GCOAST : Skill assessments of coupling wave and circulation models (NEMO-WAM). *Journal of Physics : Conference Series*, **1730** (1), 012 071, doi.org/10.1088/1742-6596/1730/1/012071.
- Stocchi, P., and S. Davolio, 2017 : Intense air–sea exchanges and heavy orographic precipitation over Italy : The role of Adriatic sea surface temperature uncertainty. *Atmos. Res.*, **196**, 62 – 82, doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.004.
- Stockdale, T. N., D. L. T. Anderson, J. O. S. Alves, and M. A. Balmaseda, 1998 : Global seasonal rainfall forecasts using a coupled ocean–atmosphere model. *Nature*, **392**, 370–373, doi.org/10.1038/32861.
- Stéfanon, M., F. D’Andrea, and P. Drobinski, 2012 : Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environ. Res. Lett.*, **7** (1), 014 023, doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014023.
- Stéfanon, M., P. Drobinski, F. D’Andrea, C. Lebeaupin-Brossier, and S. Bastin, 2014 : Soil moisture–temperature feedbacks at meso-scale during summer heat waves over Western Europe. *Clim. Dyn.*, **42** (5), 1309–1324, doi.org/10.1007/s00382-013-1794-9.
- Subramanian, A. C., and Coauthors, 2019 : Ocean Observations to Improve Our Understanding, Modeling, and Forecasting of Subseasonal-to-Seasonal Variability. *Frontiers in Marine Science*, **6**, 427, doi.org/10.3389/fmars.2019.00427.
- Taillefer, F., 2002 : CANARI (code for the analysis necessary for arpege, for its rejects and its initialization) : Technical documentation. Tech. rep., Groupe de Modélisation pour l’Assimilation et la Prévision, Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France, Toulouse, France. <http://www.crn.meteo.fr/gmapdoc/spip.php?article3>.
- Tartaglione, N., M. Maugeri, F. Dalan, M. Brunetti, T. Nanni, and A. Speranza, 2009 : Searching for resemblance between large-scale sea level pressure patterns leading to “intense” precipitation events over italy. *Theoretical and Applied Climatology*, **95** (1), 183–196, doi.org/10.1007/s00704-007-0374-5.
- Taupier-Letage, I., and C. Millot, 1986 : General hydrodynamical features in the Ligurian Sea inferred from the DYOME experiment. *Oceanologica Acta*, **9** (2), 119–131, [www.ifremer.fr/lobtln/OTHER/TL\\_Millot\\_OA1986\\_ligurian\\_DYOME.PDF](http://www.ifremer.fr/lobtln/OTHER/TL_Millot_OA1986_ligurian_DYOME.PDF).
- Taylor, P. K., and M. J. Yelland, 2001 : The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves. *J. Phys. Oceanograph.*, **31**, 572–590.
- Terray, L., O. Thual, S. Belamari, M. Déqué, P. Dandin, P. Delecluse, and C. Levy, 1995 : Climatology and interannual variability simulated by the ARPEGE-OPA coupled model. *Clim. Dyn.*, **11** (8), 487–505, doi.org/10.1007/BF00207197.
- Testor, P., and J.-C. Gascard, 2003 : Large-Scale Spreading of Deep Waters in the Western Mediterranean Sea by Submesoscale Coherent Eddies. *J. Phys. Oceanograph.*, **33** (1), 75–87, doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0075:LSSODW>2.0.CO;2.
- Testor, P., and Coauthors, 2018 : Multiscale Observations of Deep Convection in the Northwestern Mediterranean Sea During Winter 2012–2013 Using Multiple Platforms. *J. Geophys. Res. Oceans*, **123** (3), 1745–1776, doi.org/10.1002/2016JC012671.
- Theurich, G., and Coauthors, 2016 : The Earth System Prediction Suite : Toward a Coordinated U.S. Modeling Capability. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97** (7), 1229–1247, doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00164.1.
- Thévenot, O., M.-N. Bouin, V. Ducrocq, C. Lebeaupin Brossier, O. Nuissier, J. Pianezze, and F. Duffourg, 2016 : Influence of the sea state on Mediterranean heavy precipitation : a case study from HyMeX SOP1. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142** (S1), 377–389, doi.org/10.1002/qj.2660.
- Tolman, H. L., 1992 : Effects of Numerics on the Physics in a Third-Generation Wind-Wave Model. *J. Phys. Oceanograph.*, **22** (10), 1095–1111, doi.org/10.1175/1520-0485(1992)022<1095:EONOTP>2.0.CO;2.
- Trigo, I. F., G. R. Bigg, and T. D. Davies, 2002 : Climatology of Cyclogenesis Mechanisms in the Mediterranean. *Mon. Wea. Rev.*, **130** (3), 549–569, doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<0549:COCMIT>2.0.CO;2.
- Tripoli, G. J., C. M. Medaglia, S. Dietrich, A. Mugnai, G. Panegrossi, S. Pinori, and E. A. Smith, 2005 : The 9–10 November 2001 Algerian Flood : A Numerical Study. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86** (9), 1229–1236, doi.org/10.1175/BAMS-86-9-1229.
- Tudurí, E., and C. Ramis, 1997 : The Environments of Significant Convective Events in the Western Mediterranean. *Wea. Forecasting*,

- 12 (2)**, 294–306, doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0294:TEOSCE>2.0.CO;2.
- Valkonen, T., T. Vihma, and M. Doble, 2008 : Mesoscale Modeling of the Atmosphere over Antarctic Sea Ice : A Late-Autumn Case Study. *Mon. Wea. Rev.*, **136 (4)**, 1457–1474, doi.org/10.1175/2007MWR2242.1.
- Varlas, G., P. Katsafados, A. Papadopoulos, and G. Korres, 2018 : Implementation of a two-way coupled atmosphere-ocean wave modeling system for assessing air-sea interaction over the Mediterranean Sea. *Atmos. Res.*, **208**, 201 – 217, doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.019.
- Vautard, R., P. Yiou, F. D’Andrea, N. de Noblet, N. Viovy, C. Cassou, J. Polcher, P. Ciais, M. Kageyama, and Y. Fan, 2007 : Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit. *Geosci. Res. Lett.*, **34 (7)**, doi.org/10.1029/2006GL028001.
- Vialard, J., F. Vitart, M. A. Balmaseda, T. N. Stockdale, and D. L. T. Anderson, 2005 : An Ensemble Generation Method for Seasonal Forecasting with an Ocean–Atmosphere Coupled Model. *Mon. Wea. Rev.*, **133 (2)**, 441–453, doi.org/10.1175/MWR-2863.1.
- Viúdez, A., J.-M. Pinot, and R. L. Haney, 1998 : On the upper layer circulation in the Alboran Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, **103 (C10)**, 21 653–21 666, doi.org/10.1029/98JC01082.
- Voldoire, A., and Coauthors, 2017 : SURFEX V8.0 interface with OASIS3-MCT to coupled atmosphere with hydrology, ocean, waves and sea-ice models, from coastal to global scales. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 4207–4227, doi.org/10.5194/gmd-10-4207-2017.
- Voldoire, A., and Coauthors, 2019 : Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **11 (7)**, 2177–2213, doi.org/10.1029/2019MS001683.
- Waldman, R., N. Brüggemann, A. Bosse, M. Spall, S. Somot, and F. Sevault, 2018 : Overturning the Mediterranean Thermohaline Circulation. *Geosci. Res. Lett.*, **45 (16)**, 8407–8415, doi.org/10.1029/2018GL078502.
- Warner, J. C., B. Armstrong, R. He, and J. B. Zambon, 2010 : Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling*, **35 (3)**, 230–244.
- Wei, J., P. Malanotte-Rizzoli, E. A. B. Eltahir, P. Xue, and D. Xu, 2014 : Coupling of a regional atmospheric model (RegCM3) and a regional oceanic model (FVCOM) over the maritime continent. *Clim. Dyn.*, **43 (5)**, 1575–1594, doi.org/10.1007/s00382-013-1986-3.
- Wilson, C., B. Sinha, and R. G. Williams, 2009 : The Effect of Ocean Dynamics and Orography on Atmospheric Storm Tracks. *J. Climate*, **22 (13)**, 3689–3702, doi.org/10.1175/2009JCLI2651.1.
- Xoplaki, E., J. F. González-Rouco, J. Luterbacher, and H. Wanner, 2004 : Wet season Mediterranean precipitation variability : influence of large-scale dynamics and trends. *Clim. Dyn.*, **23 (1)**, 63–78, doi.org/10.1007/s00382-004-0422-0.
- Yablonski, R. M., and I. Ginis, 2009 : Limitation of one-dimensional ocean models for coupled hurricane-ocean model forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 4410–4419.
- Zambon, J. B., R. He, and J. C. Warner, 2014 : Investigation of hurricane Ivan using the coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) model. *Ocean Dyn.*, **64**, 1535–1554, doi.org/10.1007/s10236-014-0777-7.
- Zecchetto, S., and F. De Biasio, 2007 : Sea Surface Winds over the Mediterranean Basin from Satellite Data (2000-04) : Meso- and Local-Scale Features on Annual and Seasonal Time Scales. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **46 (6)**, 814–827, doi.org/10.1175/JAM2498.1.

# Annexe A

## Curriculum Vitae

---

**Cindy LEBEAUPIN BROSSIER**

née le 9 décembre 1981

**CRCN CNRS**

ORCID : 0000-0002-2104-1296

[http://www.researchgate.net/profile/Cindy\\_Lebeaupin\\_Brossier](http://www.researchgate.net/profile/Cindy_Lebeaupin_Brossier)

Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM UMR3589),

GMME/PRECIP

42 avenue G. Coriolis

31057 TOULOUSE cedex 1

[cindy.lebeaupin-brossier@meteo.fr](mailto:cindy.lebeaupin-brossier@meteo.fr)

Tel : (+33) 05 61 07 90 39

---

## Formation

2007	<b>Doctorat</b> en Sciences de l’atmosphère et de l’océan, Université Paul Sabatier, Toulouse (31)
2004	<b>DEA</b> Océan, Atmosphère et Environnement, Université Paul Sabatier, Toulouse (31)
2003	<b>Maîtrise</b> de Physique, Université François Rabelais, Tours (37)
2002	<b>Licence</b> de Physique, Université François Rabelais, Tours (37)
2001	<b>DEUG</b> Sciences de la Matière, Université François Rabelais, Tours (37)
1999	<b>Baccalauréat</b> Scientifique, Lycée Camille Claudel, Blois (41)

## Expériences professionnelles

2012-	<b>Chargée de recherche CNRS,</b> CNRM UMR3589 (Météo-France/CNRS), Toulouse (31) impliquée dans les projets <i>HyMeX</i> , <i>ASICS-Med</i> , <i>REMEMBER</i> , <i>Simed</i> , <i>COTA3COT</i> , <i>CASSIOWPE</i>
2011-2012 (11 mois)	<b>Chercheuse en Contrat Postdoctoral,</b> GAME/CNRM (Météo-France/CNRS), Toulouse (31) Projet Clim-RUN (FP7) - “ <i>Amélioration du modèle régional couplé sur la Méditerranée : paramétrisation des flux turbulents</i> ” - Analyse de l’apport d’ECUME et COARE 3.0 dans CNRM-RCSM - Comparaison aux séries longues des bouées ancrées
2008-2011 (42 mois)	<b>Chercheuse en Contrat Postdoctoral,</b> IPSL/LMD-ENSTA/UME, Palaiseau (91) Projet MORCE-MED (GIS "Climat, Environnement et Société") - “ <i>Couplage des modèles régionaux océanique et atmosphérique pour l’étude des impacts du changement climatique en Méditerranée</i> ” - Évaluation du couplage entre le modèle WRF et son schéma océanique intégral en cas de mistral - Développement du couplage WRF/NEMO (MORCE) et simulations régionales sur la Méditerranée - Analyse du bilan d’eau et d’évènements météorologiques intenses - Étude de sensibilité aux résolutions spatiale et temporelle du forçage atmosphérique
2008 (4 mois)	<b>Ingénieure de recherche,</b> GAME/CNRM (Météo-France/CNRS), Toulouse (31)

	“Valorisation du système couplé MESO-NH / modèle océanique 1D et livraison aux utilisateurs”
2004-2007 (39 mois)	<b>Doctorante</b> , Université Paul Sabatier - Toulouse III GAME/CNRM (Météo-France/CNRS), Toulouse (31) “Étude du couplage océan-atmosphère appliqué aux événements fortement précipitants en région méditerranéenne” - Étude de sensibilité des épisodes fortement précipitants à la SST en Méditerranée et au schéma de surface sur mer dans des simulations à haute-résolution à l’aide du modèle Meso-NH - Développement d’un système couplé océan-atmosphère pour la prévision à haute-résolution
2004 (4 mois)	<b>Stagiaire de DEA</b> , Université Paul Sabatier - Toulouse III GAME/CNRM (Météo-France/CNRS), Toulouse (31) “Étude numérique de la sensibilité des épisodes de pluies intenses aux forçage de surface : Influence de la température de surface de la mer Méditerranée”
2003 (3mois)	<b>Stagiaire de Maîtrise</b> , Université François Rabelais, Tours (37) “Instabilité en hydrodynamique et convection thermique”

## Encadrements

### *Postdoc et CDD Ingénieur*

2014-2016 :	<b>Léger Fabien</b> "Couplage OA à méso-échelle pour la formation d’eaux denses" (CDD IR, projet ANR ASICS-Med). <i>enc : C. Lebeaupin Brossier, H. Giordani, V. Ducrocq.</i>
2016 :	<b>Vargel Céline</b> "Apport de la température de surface de la mer prévue par Mercator Océan pour contraindre les modèles atmosphériques de Météo-France sur les régions outre-mer" (CDD IE, Mercator Océan & Météo-France). <i>enc : Y. Drillet, G. Faure, C. Lebeaupin Brossier, M. Drévilion.</i>
2020-2021 :	<b>Pianezze Joris</b> "Développement et valorisation d’une configuration couplée AROME-NEMO (1/36°) sur l’Atlantique Nord Est et la Méditerranée Ouest" (CDD IR, financement : Mercator Océan International). <i>enc : G. Garric, G. Samson, C. Lebeaupin Brossier.</i>

## Thèses

2012-2015 :	<b>Rainaud Romain</b> "Modélisation couplée océan-atmosphère pour l'étude des évènements météorologiques intenses en Méditerranée" (DGA/Météo-France). tel.archives-ouvertes.fr/tel-02110823 <i>dir : V. Ducrocq, H. Giordani, C. Lebeaupin Brossier.</i>
2016-2019 :	<b>Sauvage César</b> "Prévision couplée océan-atmosphère des épisodes méditerranéens : Impact d'une meilleure prise en compte des débits des fleuves et de l'état de mer" (Région Occitanie/Météo-France). tel.archives-ouvertes.fr/tel-02439736 <i>dir : M.-N. Bouin, C. Lebeaupin Brossier.</i>
2021- <sup>1</sup>	<b>Marquillie Maëva</b> "Propagation des incertitudes dans le système couplé océan-atmosphère à échelle kilométrique" (Région Occitanie/Météo-France). <i>dir : F. Bouttier, C. Lebeaupin Brossier</i>
2023-2026	<b>Nicolay Fleur</b> "Application de la modélisation couplée atmosphère-vagues-océan kilométrique pour la vigilance vagues-submersion" (FCPLR Météo-France). <i>dir : F. Bouttier, C. Lebeaupin Brossier ; co-enc : A. Dalphinnet</i>

## Master II (ou équivalent)

2020 :	<b>Massé Arthur</b> "Mise au point et évaluation de la pertinence d'indicateurs océaniques pour la prévision des épisodes méditerranéens" (Projet de Fin d'Etudes IENM3 - Ecole Nationale de la Météorologie). <i>dir : C. Lebeaupin Brossier, J. Beuvier.</i>
2022 :	<b>Misi Quentin</b> "Impact des processus couplés sur la stratification océanique superficielle" (stage M2 SOAC - Université de Toulouse). <i>dir : J. Beuvier, C. Lebeaupin Brossier.</i>

## Autres

2013 :	<b>Bertraud du Chazaud Jean-Baptiste, Kangah Yannick, Pinel Florian, Politis Laurent</b>
--------	--

1. Le contrat doctoral a pris fin prématurément en mai 2023

	<p>"Mise en place d'une plate-forme WRF à l'ENM : analyses des simulations sur les campagnes HAPEX et AMMA" (projet tuteuré IENM3 - Ecole Nationale de la Météorologie).</p> <p><i>dir : A. Verrelle, C. Lebeaupin Brossier.</i></p>
2013-2014 :	<p><b>Brovelli Marjorie</b></p> <p>"Echanges océan-atmosphère" (TIPE).</p> <p><i>dir : S. Belamari, C. Lebeaupin Brossier.</i></p>
2018-2019 :	<p><b>Antoine Salomé</b></p> <p>"Évaluation et qualification du couplage AROME-NEMO pour la représentation de l'océan superficiel en Méditerranée" (projet tuteuré IENM3 [<math>\sim 200h</math>] - Ecole Nationale de la Météorologie).</p> <p><i>dir : C. Lebeaupin Brossier.</i></p>
2019-2020 :	<p><b>Le Breton Morgane</b></p> <p>"Comprendre et documenter le traitement de l'interface air-mer dans un modèle de prévision du temps pour alimenter le site MedLab" (projet tuteuré IENM3 [<math>\sim 70h</math>] - Ecole Nationale de la Météorologie).</p> <p><i>dir : C. Lebeaupin Brossier.</i></p>
2021 :	<p><b>Millot-Weil Jeanne</b></p> <p>"Développement et tests d'initialisation du compartiment océanique pour le futur système couplé AROME-France/NEMO" (stage M1 MOCIS [3 mois] - Sorbonne Université).</p> <p><i>dir : C. Lebeaupin Brossier, J. Beuvier.</i></p>
2022-2023 :	<p><b>Gentric Agathe</b></p> <p>"Pré-identification d'ingrédients caractéristiques des épisodes méditerranéens à partir de la prévision d'ensemble AROME" (projet tuteuré IENM3 [<math>\sim 100h</math>] - Ecole Nationale de la Météorologie).</p> <p><i>dir : C. Lebeaupin Brossier.</i></p>

## Responsabilités Scientifiques

### *Niveau international*

2012-2015	<b>Leader de la Science Team HyMeX</b> "Air-Sea fluxes and boundary layers coupled processes"
-----------	---



	<i>Co-leaders : Marie-Noëlle Bouin (CNRM &amp; LOPS) et Andreas Wieser (KIT) / Animation scientifique et attribution de crédits MISTRALS-HyMeX (missions &amp; gratifications) / Une cinquantaine de membres français et étrangers, répartis sur une vingtaine d'instituts (ou laboratoires)</i>
2016-2020	<b>Membre du Steering Comitee</b> de la Science Team HyMeX "Heavy Precipitation" <i>Leader : Samiro Khodayar (KIT) / Animation scientifique et attribution de crédits MISTRALS-HyMeX (missions &amp; gratifications) / environ 90 membres d'une trentaine d'instituts (ou laboratoires) dans 10 pays</i>
2016-2020	<b>Membre du Comité Exécutif International</b> du programme HyMeX
2019-	<b>Membre du Comité International de Transition "HyMeX Fellow-On"</b> pour la suite du programme HyMeX
2020-2022	<b>Membre suppléante représentant Météo-France au Comité International d'experts pour la prévision océanographique à Mercator Océan International (METOF)</b> <i>Membre titulaire : Matthieu Chevallier (Météo-France, DIROP/MAR/D)</i>
2022-	<b>Membre représentant Météo-France au Comité International d'experts pour la prévision océanographique à Mercator Océan International (METOF)</b> <i>Suppléant : Jonathan Beuvier (Météo-France, CNRM/GMGEC/PASTEL)</i>
2023-	<b>Membre du Plinius Conference Steering Committee</b>

### **Niveau national**

2016-2020	<b>Membre du Comité Exécutif National</b> du programme HyMeX
2020-2021	<b>Membre du Comité de transition</b> sur les suites du programme HyMeX
2016-2023	<b>Membre du Comité d'Expertise du CT1</b> ("Environnement") du GENCI

### **Niveau régional**

2022-	<b>Co-pilote de l'Axe Scientifique Transverse "Couplages" de l'OMP</b> <i>pilote : C. Barthe (LAERO); autre co-pilote : L. Renault (LEGOS)</i>
-------	---

### **Au CNRM**

2014-	<b>Membre élue du Conseil de laboratoire</b> <i>pour le collège des chercheurs CNRS</i>
2016-2019	<b>Pilote du groupe de travail thématique transverse (G3T) "Processus couplés à l'interface océan-atmosphère"</b>

	<i>Co-pilote Matthieu Chevallier (CNRM/GMGEC) / Animation scientifique / Une trentaine de membres du CNRM et de Météo-France (DirOp/MAR)</i>
2019-2021	<b>Animation scientifique</b> : Gestion de diffusion de portraits sur les écrans du CNRM <i>Cet outil visait à encourager et augmenter la visibilité des contractuel-le-s et doctorant-e-s, et de leurs travaux, au sein du laboratoire</i>
2021	<b>Animatrice des discussions de l'avant-projet transverse</b> sur le "Système de modélisation et prévision météorologique et environnementale à échelle kilométrique" <i>Préparation du projet transverse issu de la prospective HCERES du laboratoire</i>
2022-	<b>Responsable du projet transverse AROBASE (AROMe-BASEd coupled System)</b> <i>Pilotage de projet</i>

## Activités éditoriales

### Rapportrice

2008	1 article pour la revue "Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society"
2014	1 article pour la revue "Climate Dynamics"
2015	1 article pour la revue "Dynamics of Atmospheres and Oceans", 1 article pour la revue "Ocean Modelling"
2016	1 article pour la revue "Ocean Modelling", 1 article pour la revue "Climate Dynamics"
2017	1 article pour la revue "Climate Dynamics"
2018	1 article pour la revue "Pure and Applied Geophysics", 1 article pour la revue "JGR-Atmospheres", 2 articles pour la revue "Ocean Science"
2019	1 article pour la revue "Ocean Science", 1 article pour "Ocean Modelling"
2020	1 article pour la revue "Geophysical Research Letter"
2021	1 article pour la revue "Dynamics of Atmospheres and Oceans", 1 article pour la revue "Geoscientific Model Development"
2023	1 article pour la revue "Geoscientific Model Development", 1 article pour la revue "Atmospheric Research"

## Autres activités

### Organisation de conférence

2017	Pilotage du comité d'organisation des <b>Ateliers de modélisation de l'Atmosphère</b> sur "les couplages océan-atmosphère-vagues", 30 janvier-3 février 2017, Toulouse
2022	Comité d'organisation des <b>Ateliers de modélisation de l'Atmosphère</b> pour le volet sur "le couplage océan-atmosphère", 7-9 juin 2022, Toulouse

### Jury de thèse

29 novembre 2018	<b>Alexis Foussard</b> , "Influence des tourbillons océaniques sur le rail des dépressions atmosphériques", LMD (Paris) <i>Examinatrice</i>
21 octobre 2022	<b>Douglas Jr Keller</b> , "Impact du Mistral sur la formation d'eaux denses en Méditerranée", LMD (Palaiseau) <i>Examinatrice</i>
6 décembre 2022	<b>Laetitia Corale</b> , "Couplage Océan-Vagues-Atmosphère pour l'amélioration de la prévision des cyclones tropicaux du bassin sud-ouest de l'océan Indien", LACY (Saint-Denis-de-la-Réunion) <i>Examinatrice</i>

### Comité de thèse

2014-2017	<b>Pierre-Etienne Brilouet</b> , "Thermodynamique et turbulence dans les épisodes de vent fort dans le Golfe du Lion", LA (Toulouse)
2019-2022	<b>Laetitia Corale</b> , "Impact du couplage Océan-Vagues-Atmosphère pour la prévision opérationnelle des Cyclones Tropicaux sur le Sud-Ouest de l'Océan Indien", LACy (La Réunion)
2021-2024	<b>Meredith Dournaux</b> , "Modélisation des aérosols marins et de leurs impacts sur les nuages convectifs en condition de tempêtes", LAERO (Toulouse)

# Annexe B

## Liste de productions

Mise à jour le 25 octobre 2023

### B.1 Publications

#### B.1.1 Publications parues dans des revues à comité de lecture (48)

- Pianezze, J., J. Beuvier, **C. Lebeaupin Brossier**, G. Samson, G. Faure, G. Garric, 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 Sys. Sci.*, **22**, 1301-1324, doi :10.5194/nhess-22-1301-2022.
- Khodayar, S., S. Davolio, P. Di Girolamo, **C. Lebeaupin Brossier**, E. Flaounas, N. Fourrié, K.-O. Lee, D. Ricard, B. Vié, F. Bouttier, A. Cãldas-Alvarez, V. Ducrocq, 2021 : Overview towards improved understanding of the mechanisms leading to heavy precipitation in the Western Mediterranean : lessons learned from HyMeX. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 17051-17078, doi :10.5194/acp-21-17051-2021.
- Sauvage, C., **C. Lebeaupin Brossier**, M.-N. Bouin, 2021 : Towards kilometer-scale ocean-atmosphere-wave coupled forecast : a case study on a Mediterranean heavy precipitation event. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 11857-11887, doi :10.5194/acp-21-11857-2021.
- Brilouet, P.-E., J.-L. Redelsperger, M.-N. Bouin, F. Couvreur, **C. Lebeaupin Brossier**, 2021 : A Case Study of the Coupled Ocean-Atmosphere Response to an Oceanic Diurnal Warm Layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **147**, 2008-2032, doi :10.1002/qj.4007.
- Caumont, O., M. Mandement, F. Bouttier, J. Eeckman, **C. Lebeaupin Brossier**, A. Lovat, O. Nuisier, O. Laurantin, 2021 : The heavy precipitation event of 14–15 October 2018 in the Aude catchment : A meteorological study based on operational numerical weather prediction systems and standard and personal observations. *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, **21**, 1135-1157, doi :10.5194/nhess-21-1135-2021.
- Bouin, M.-N. and **C. Lebeaupin Brossier**, 2020 : Impact of a medicane on the oceanic surface layer from a coupled, kilometre-scale simulation. *Ocean Sci.*, **16**, 1125-1142, doi :10.5194/os-16-1125-2020.
- Bouin, M.-N. and **C. Lebeaupin Brossier**, 2020 : Surface processes in the 7 November 2014 medicane from air-sea coupled high-resolution numerical modelling. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 6861-6881,

doi :10.5194/acp-20-6861-2020.

- Sauvage, C., **C. Lebeauin Brossier**, M.-N. Bouin, V. Ducrocq, 2020 : Characterization of the air-sea exchanges mechanisms during a Mediterranean heavy precipitation event using realistic sea state modelling. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 1675-1699, doi :10.5194/acp-20-1675-2020.
- Sauvage, C., **C. Lebeauin Brossier**, V. Ducrocq, M.-N. Bouin, B. Vincendon, M. Verdecchia, I. Taupier-Letage, F. Orain, 2018 : Impact of the representation of the freshwater river input in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Modell.*, **131**, 115-131, doi :10.1016/j.ocemod.2018.09.005.
- Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, **C. Lebeauin Brossier**, 2018 : Lagged effects of the Mistral wind on heavy precipitation through ocean-atmosphere coupling in the region of Valencia. *Clim. Dyn.*, **51** (3), 969-983, doi :10.1007/s00382-016-3153-0.
- Lac, C., J-P. Chaboureaud, V. Masson, J-P. Pinty, P. Tulet, J. Escobar, M. Leriche, C. Barthe, B. Aouizerats, C. Augros, P. Aumond, F. Auguste, P. Bechtold, S. Berthet, S. Bielli, F. Bosseur, O. Caumont, J-M. Cohard, J. Colin, F. Couvreur, J. Cuxart, G. Delautier, T. Dauhut, V. Ducrocq, J-B. Filippi, D. Gazen, O. Geoffroy, F. Gheusi, R. Honnert, J-P. Lafore, **C. Lebeauin Brossier**, Q. Libois, T. Lunet, C. Mari, T. Maric, P. Mascart, M. Mogé, G. Molinié, O. Nuissier, F. Pantillon, P. Peyrillé, J. Pergaud, E. Perraud, J. Pianezze, J-L. Redelsperger, D. Ricard, E. Richard, S. Riette, Q. Rodier, L. Seyfried, J. Stein, K. Suhre, O. Thouron, S. Turner, A. Verrelle, B. Vié, F. Visentin, V. Vionnet, P. Wautelet, 2018 : Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 1929-1969, doi :10.5194/gmd-11-1929-2018.
- Voltaire, A., B. Decharme, J. Pianezze, **C. Lebeauin Brossier**, F. Sevault, L. Seyfried, V. Garnier, S. Bielli, S. Valcke, A. Alias, M. Accensi, F. Arduin, M.-N. Bouin, V. Ducrocq, S. Faroux, H. Giordani, F. Léger, P. Marsaleix, R. Rainaud, J-L. Redelsperger, E. Richard, S. Riette, 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**, 4207-4227, doi :10.5194/gmd-10-4207-2017.
- Bouin, M.-N., J-L. Redelsperger, **C. Lebeauin Brossier**, 2017 : Processes leading to deep convection and sensitivity to sea-state representation during HyMeX IOP8 heavy precipitation event. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **143**, 2600-2615, doi :10.1002/qj.3111.
- Rainaud, R., **C. Lebeauin Brossier**, V. Ducrocq, H. Giordani, 2017 : High-resolution air-sea coupling impact on two heavy precipitation events in the Western Mediterranean. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **143**, 2448-2462, doi :10.1002/qj.3098.
- Lebeauin Brossier, C.**, F. Léger, H. Giordani, J. Beuvier, M.-N. Bouin, V. Ducrocq, N. Fourrié, 2017 : Dense water formation in the north-western Mediterranean area during HyMeX-SOP2 in 1/36° ocean simulations : Ocean-atmosphere coupling impact. *J. Geophys. Res. Oceans*, **122** (7), 5749-5773, doi :10.1002/2016JC012526.
- Giordani, H., **C. Lebeauin Brossier**, F. Léger, G. Caniaux, 2017 : A PV-approach for dense water formation along fronts : Application to the Northwestern Mediterranean. *J. Geophys. Res. Oceans*, **122** (2), 995-1015, doi :10.1002/2016JC012019.
- Omriani, H., P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, **C. Lebeauin Brossier**, S. Mailler, 2017 : Spatial and temporal variability of wind energy resource and production over the North Western Mediterranean Sea : Sensitivity to air-sea interactions. *Renewable Energy*, **101**, 680-689, doi : 10.1016/j.renene.2016.09.028.
- Estournel, C., P. Testor, I. Taupier-Letage, M.-N. Bouin, L. Coppola, P. Durand, P. Conan, A. Bosse, P.-E. Brilouet, L. Beguery, S. Belamari, K. Béranger, J. Beuvier, D. Bourras, G. Canut, A. Doerenbecher, X. Durrieu de Madron, F. D'Ortenzio, P. Drobinski, V. Ducrocq, N. Fourrié, H. Giordani,

- L. Houpert, L. Labatut, **C. Lebeaupin Brossier**, M. Nuret, L. Prieur, O. Roussot, L. Seyfried, S. Somot, 2016 : HyMeX-SOP2 : the field campaign dedicated to dense water formation in the northwestern Mediterranean. *Oceanography*, **29** (4), 196-206, doi :10.5670/oceanog.2016.94.
- Léger, F., **C. Lebeaupin Brossier**, H. Giordani, T. Arsouze, J. Beuvier, M-N. Bouin, E. Bresson, V. Ducrocq, N. Fourrié, M. Nuret, 2016 : Dense water formation in the north-western Mediterranean area during HyMeX-SOP2 in 1/36° ocean simulations : Sensitivity to initial conditions. *J. Geophys. Res. Oceans*, **121** (8), 5549-5569, doi :10.1002/2015JC011542.
- Ruti, P. M., Somot S., Giorgi F., Dubois C., Flaounas E., Obermann A., Dell'Aquila A., Pisacane G., Harzallah A., Lombardi E., Ahrens B., Akhtar N., Alias A., Arsouze T., Aznar R., Bastin S., Bartholy J., Béranger K., Beuvier J., Bouffies-Cloch e S., Brauch J., Cabos W., Calmanti S., Calvet J-C., Carillo A., Conte D., Coppola E., Djurdjevic V., Drobinski P., Elizalde-Arellano A., Gaertner M., Galán P., Gallardo C., Gualdi S., Goncalves M., Jorba O., Jordà G., L'Heveder B., **Lebeaupin Brossier C.**, Li L., Liguori G., Lionello P., Maci s D., Nabat P., Onol B., Raikovic B., Ramage K., Sevault F., Sannino G., Struglia M. V., Sanna A., Torma C., Vervatis V., 2016 : MED-CORDEX initiative for Mediterranean Climate studies. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **97**, 1187-1208, doi :10.1175/BAMS-D-14-00176.1.
- Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, E. Flaounas, **C. Lebeaupin Brossier**, S. Somot, M. Stéfanon, 2016 : Influence of submonthly air-sea coupling on heavy precipitation events in the Western Mediterranean basin. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **142** (S1), 453-471, doi :10.1002/qj.2717.
- Thévenot, O., M-N. Bouin, V. Ducrocq, **C. Lebeaupin Brossier**, O. Nuissier, J. Pianezze, F. Duffourg, 2016 : Influence of the sea state on Mediterranean heavy precipitation : a case study from HyMeX SOP1. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **142** (S1), 377-389, doi :10.1002/qj.2660.
- Rainaud, R., **C. Lebeaupin Brossier**, V. Ducrocq, H. Giordani, M. Nuret, N. Fourrié, M-N. Bouin, I. Taupier-Letage, D. Legain, 2016 : Characterisation of air-sea exchanges over the Western Mediterranean Sea during the HyMeX SOP1 using the AROME-WMED model, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **142** (S1), 173-187, doi :10.1002/qj.2480.
- Flaounas, E., A. Di Luca, P. Drobinski, S. Mailler, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, **C. Lebeaupin Brossier**, 2016 : Cyclones contribution to the Mediterranean Sea water budget. *Clim. Dyn.*, **46** (3), 913-927, doi :10.1007/s00382-015-2622-1.
- Omrani, H., T. Arsouze, K. Béranger, M. Boukthir, P. Drobinski, **C. Lebeaupin Brossier**, H. Mairech, 2016 : Sensitivity of the sea circulation to the atmospheric forcing in the Sicily Channel. *Prog. Oceanogr.*, **140**, 54-68, doi :10.1016/j.pocean.2015.10.007.
- Guyennon, A., M. Baklouti, F. Diaz, J. Palmieri, J. Beuvier, **C. Lebeaupin Brossier**, T. Arsouze, K. Béranger, J-C. Dutay, and T. Moutin, 2015 : New insights into the organic carbon export in the Mediterranean Sea from 3D modeling. *Biogeosc.*, **12**, 7025-7046, doi :10.5194/bg-12-7025-2015.
- Lebeaupin Brossier, C.**, S. Bastin, K. Béranger, and P. Drobinski, 2015 : Regional mesoscale air-sea coupling impacts and extreme meteorological events role on the Mediterranean Sea water budget, *Clim. Dyn.*, **44** (3), 1029-1051, doi :10.1007/s00382-014-2252-z.
- Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, and **C. Lebeaupin Brossier**, 2015 : Sensitivity of an intense rain event between an atmosphere-only and an atmosphere-ocean coupled model : 19 September 1996, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **141**, 258-271, doi : 10.1002/qj.2355.
- Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, and **C. Lebeaupin Brossier**, 2014 : Prior history of Mistral and Tramontane winds modulates heavy precipitation events in

- southern France. *Tellus A*, **66**, 24064, doi :10.3402/tellusa.v66.24064.
- Sevault, F., S. Somot, A. Alias, C. Dubois, **C. Lebeaupin Brossier**, P. Nabat, F. Adloff, M. Déqué and B. Decharme, 2014 : A fully coupled Mediterranean regional climate system model : design and evaluation of the ocean component for the 1980-2012 period. *Tellus A*, **66**, 23967, doi :10.3402/tellusa.v66.23967.
- Lebeaupin Brossier, C.**, T. Arsouze, K. Béranger, M-N. Bouin, E. Bresson, V. Ducrocq, H. Giordani, M. Nuret, R. Rainaud, I. Taupier-Letage, 2014 : Ocean mixed layer responses to intense meteorological events during HyMeX-SOP1 from a high-resolution ocean simulation. *Ocean Modelling*, **84**, 84-103, doi :10.1016/j.ocemod.2014.09.009
- Di Luca, A., E. Flaounas, P. Drobinski, and **C. Lebeaupin Brossier**, 2014 : The atmospheric component of the Mediterranean Sea water budget in a WRF multi-physics ensemble and observations, *Clim. Dyn.*, **43** (9-10), 2349-2375, doi :10.1007/s00382-014-2058-z.
- Stéfanon, M., P. Drobinski, F. D'Andrea, **C. Lebeaupin Brossier**, S. Bastin, 2014 : Soil moisture-temperature feedbacks during heat waves over Western Europe, *Clim. Dyn.*, **42** (5-6), 1309-1324, doi :10.1007/s00382-013-1794-9.
- Lebeaupin Brossier, C.**, P. Drobinski, K. Béranger, S. Bastin and F. Orain, 2013 : Ocean memory effect on the dynamics of coastal heavy precipitation preceded by a Mistral event in the North-Western Mediterranean. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **139**, 1583-1597, doi :10.1002/qj.2049.
- Flaounas, E., P. Drobinski, M. Vrac, S. Bastin, **C. Lebeaupin Brossier**, M. Stéfanon, M. Borga and J-C. Calvet, 2013 : Precipitation and Temperature space-time variability and extremes in the Mediterranean region : Evaluation of dynamical and statistical downscaling methods. *Clim. Dyn.*, **40**, 2687-2705, doi :10.1007/s00382-012-1558-y.
- Masson, V., P. Le Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, F. Bouyssel, P. Brousseau, E. Brun, J.-C. Calvet, D. Carrer, B. Decharme, C. Delire, S. Donier, K. Essauini, A.-L. Gibelin, H. Giordani, F. Habets, M. Jidane, G. Kerdraon, E. Kourzeneva, M. Lafaysse, S. Lafont, **C. Lebeaupin Brossier**, A. Lemonsu, J.-F. Mahfouf, P. Marguinaud, M. Moktari, S. Morin, G. Pigeon, R. Salgado, Y. Seity, F. Taillefer, G. Tanguy, P. Tulet, B. Vincendon, V. Vionnet and A. Voltaire, 2013 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 929-960, doi :10.5194/gmd-6-929-2013.
- Beuvier, J., K. Béranger, **C. Lebeaupin Brossier**, S. Somot, F. Sevault, Y. Drillet, R. Bourdallé-Badie, N. Ferry, F. Lyard, 2012 : Spreading of the Western Mediterranean Deep Water after winter 2005 : time-scales and deep cyclones transport, *J. Geophys. Res.*, **117**, C07022, doi :10.1029/2011JC007679.
- Drobinski, P., A. Anav, **C. Lebeaupin Brossier**, G. Samson, M. Stéfanon, S. Bastin, M. Baklouti, K. Béranger, J. Beuvier, R. Bourdallé-Badie, L. Coquart, F. D'Andrea, N. de Noblet, F. Diaz ; J-C. Dutay, C. Ethe, M-A. Foujols, D. Khvorostiyannov, G. Madec, E. Maisonnave, M. Mancip, S. Masson, L. Menut, J. Palmieri, J. Polcher, S. Turquety, S. Valcke and N. Viovy, 2012 : Modelling the Regional Coupled Earth system (MORCE) : application to process and climate studies in vulnerable regions, *Environmental Modelling and Software*, **35**, 1-18, doi :10.1016/j.envsoft.2012.01.017.
- Claud, C., B. Alhammoud, B. Funatsu, **C. Lebeaupin Brossier**, J-P. Chaboureaud, K. Béranger, P. Drobinski, 2012 : A high resolution climatology of precipitation and deep convection over the Mediterranean region from operational satellite microwave data : development and application to the evaluation of model uncertainties, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **12**, 785-798, doi :10.5194/nhess-12-785-2012.
- Lebeaupin Brossier, C.**, K. Béranger, and P. Drobinski, 2012 : Sensitivity of the northwestern Me-

diterranean Sea coastal and thermohaline circulations simulated by the 1/12°-resolution ocean model NEMO-MED12 to the spatial and temporal resolution of atmospheric forcing, *Ocean Modelling*, **43-44**, 94-107, doi :10.1016/j.ocemod.2011.12.007.

**Lebeaupin Brossier, C.**, K. Béranger, and P. Drobinski, 2012 : Ocean response to strong precipitation events in the Gulf of Lions (northwestern Mediterranean Sea) : a sensitivity study, *Ocean Dyn.*, **62** (2), 213-226, doi :10.1007/s10236-011-0502-8.

**Lebeaupin Brossier, C.**, K. Béranger, C. Deltel and P. Drobinski, 2011 : The Mediterranean response to different space-time resolution atmospheric forcings using perpetual mode sensitivity simulations, *Ocean Modelling*, **36**, (1-2), 1–25, doi :10.1016/j.ocemod.2010.10.008.

**Lebeaupin Brossier, C.**, and P. Drobinski, 2009 : Numerical high-resolution air-sea coupling over the Gulf of Lions during two Tramontane/Mistral events, *J. Geophys. Res.*, **114**, D10110, doi : 10.1029/2008JD011601.

**Lebeaupin Brossier, C.**, V. Ducrocq, and H. Giordani, 2009 : Two-way one-dimensional high-resolution air-sea coupled modelling applied to Mediterranean heavy rain events, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **135**, 187-204, doi :10.1002/qj.338.

**Lebeaupin Brossier, C.**, V. Ducrocq, and H. Giordani, 2009 : Effects of the air-sea coupling time frequency on the ocean response during Mediterranean intense events, *Ocean Dyn.*, **59**, (4), 539-549, doi :10.1007/s10236-009-0198-1.

**Lebeaupin Brossier, C.**, V. Ducrocq, and H. Giordani, 2008 : Sensitivity of three Mediterranean heavy rain events to two different sea surface fluxes parameterizations in high-resolution modeling, *J. Geophys. Res.*, **113**, D21109, doi :10.1029/2007JD009613.

Nuissier, O., V. Ducrocq, D. Ricard, **C. Lebeaupin** and S. Anquetin, 2008 : A numerical study of three catastrophic precipitating events over Western Mediterranean region (Southern France). Part I : Numerical framework and synoptic ingredients, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **134**, 111–130, doi :10.1002/qj.200.

Ducrocq, V., O. Nuissier, D. Ricard, **C. Lebeaupin** and T. Thouvenin, 2008 : A numerical study of three catastrophic precipitating events over Western Mediterranean region (Southern France). Part II : Mesoscale triggering and stationarity factors, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **134**, 131–145, doi :10.1002/qj.199.

**Lebeaupin, C.**, V. Ducrocq, and H. Giordani, 2006 : Sensitivity of torrential rain events to the Sea Surface Temperature based on high-resolution numerical forecasts, *J. Geophys. Res.*, **111**, D12110, doi :10.1029/2005JD006541.

### **B.1.2 Publications soumises dans des revues à comité de lecture (1)**

Bouin, M.-N., **C. Lebeaupin Brossier**, S. Malardel, A. Voltaire, C. Sauvage (acc.) : The wave-age dependent stress parameterization (WASP) for momentum and heat turbulent fluxes at sea in SURFEX v8.1. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi :10.5194/gmd-2023-58

### **B.1.3 Actes dans des conférences internationales (5)**

Sauvage, C., **C. Lebeaupin Brossier**, M.-N. Bouin, V. Ducrocq, 2018 : Role of the sea state on the air-sea exchanges during a Mediterranean heavy precipitation event in a kilometer-scale forecast system, Preprints *21<sup>st</sup> AMS Conference on Air-Sea Interaction*, 11-15 June 2018, Oklahoma City, Oklahoma, USA.

Omrani, H., P. Drobinski, B. Jourdié, **C. Lebeaupin Brossier**, K. Béranger, S. Mailler, S. Bastin, T. Arsouze, 2014 : Investigation on the offshore wind energy potential over the North Western



- Mediterranean Sea in a regional climate system model. Preprints *5<sup>th</sup> International Renewable Energy Congress*, 25-27 March 2014, Hammamet, Tunisia.
- Arsouze, T., J. Beuvier, K. Béranger, S. Somot, **C. Lebeaupin Brossier**, R. Bourdallé-Badie, F. Sevault, Y. Drillet, 2013 : Sensibility analysis of the Western Mediterranean Transition inferred by four companion simulations. Preprints *40<sup>th</sup> CIESM*, 28 October - 1 November 2013, Marseille, France.
- Lebeaupin Brossier, C.**, K. Béranger and P. Drobinski, 2010 : Modelling in a perpetual mode the Mediterranean circulation using atmospheric fields at different space-time resolutions , Preprints *39<sup>th</sup> CIESM*, 10-14 May 2010, Venice, Italy.
- Lebeaupin Brossier, C.**, V. Ducrocq and H. Giordani, 2007 : Ocean-atmosphere interactions and coupling associated with Mediterranean heavy rainfall events, Preprints *15<sup>th</sup> AMS Conference on Air-Sea Interaction*, 20-24 August 2007, Portland, Oregon, USA.

### B.1.4 Autres publications (10)

- Lebeaupin Brossier, C.**, C., Guidard, V., et al., 2023 : Application de la Recherche à l'Opérationnel pour l'assemblage d'AROME avec des Systèmes Environnementaux. Comité Scientifique Consultatif de Météo-France 2023, [http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/comsi\\_mf\\_2023\\_arobase.pdf](http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/comsi_mf_2023_arobase.pdf).
- Lebeaupin Brossier, C.**, N. Fourrié, B. Vié, D. Ricard, O. Caumont, Y. Michel, 2021 : Préparer les prévisions météorologiques de demain. *Article grand public de l'INSU*, <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/preparer-les-previsions-meteorologiques-de-demain>.
- Ducrocq, V., B. Boudevillain, C. Bouvier, I. Braud, N. Fourrié, **C. Lebeaupin Brossier**, P. Javelle, O. Nuissier, O. Payrastra, H. Roux, I. Ruin, B. Vincendon, 2019 : "Le programme HyMeX - Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne", *La Houille Blanche*, **3-4**, 5-12, doi :10.1051/lhb/2019048.
- Sevault, F., S. Somot, A. Alias, C. Dubois, **C. Lebeaupin Brossier**, P. Nabat, F. Adloff, M. Déqué, 2013 : A numerical simulation of the 1980-2011 ERA-Interim period on the Mediterranean Sea with the regional climate system model CNRM-RCSM4. *Note de Centre CNRM/GMGEC*, **31**, 67pp.
- Beuvier, J., **C. Lebeaupin Brossier**, K. Béranger, T. Arsouze, R. Bourdallé-Badie, C. Deltel, Y. Drillet, P. Drobinski, N. Ferry, F. Lyard, F. Sevault, S. Somot, 2012 : MED12, oceanic component for the modelling of the regional Mediterranean Earth system, *Mercator Ocean Quarterly Newsletter*, **46**, 60-66.
- Arsouze, T., J. Beuvier, K. Béranger, R. Bourdallé-Badie, C. Deltel, Y. Drillet, P. Drobinski, N. Ferry, **C. Lebeaupin Brossier**, F. Lyard, F. Sevault, S. Somot, 2012 : Release note of the high-resolution oceanic model in the Mediterranean Sea NEMO-MED12 based on NEMO\_v3.2 version, *ENSTA-Paristech technical note*.
- Doerenbecher, A., S. Argence, C. Cassou, O. Caumont, L. Descamps, V. Ducrocq, N. Fourrié, V. Guidard, G. Jaubert, A. Joly, D. Lambert, **C. Lebeaupin Brossier**, T. Pangaud, E. Sanchez-Gomez, O. Talagrand, L. Terray, B. Vincendon, 2010 : Projet Cyprim, partie III - Cyclogenèses et précipitations intenses : éléments de prévisibilité, besoins en observations, *La Météorologie*, **68**, 23-34, doi :10.4267/2042/31993.
- Béranger, K. , J. Beuvier, R. Bourdallé-Badie, C. Deltel, Y. Drillet, **C. Lebeaupin-Brossier**, O. Legalloudec, L. Li, 2009 : *Modélisation de la circulation générale et de façade en Méditerranée*, Rapport interne de projet, Contrat N°08/D3006, Février 2009.
- Lebeaupin Brossier, C.**, 2007 : *Étude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluie intense en région méditerranéenne*. Ph.D. thesis, Univ. Toulouse III - Paul Sabatier, 228pp.

Ducrocq, V., C. Lebeaupin, T. Thouvenin, H. Giordani, K. Chancibault, S. Anquetin and G-M. Saulnier, 2004 : L'événement des 8-9 septembre 2002 : Situation météorologique et simulation à mésoéchelle, *La Houille Blanche*, **6**, 86-92, doi :10.1051/lhb :200406012.

## **B.2 Communications**

### **B.2.1 Conférences internationales**

#### **2005**

Lebeaupin, C., V. Ducrocq, S. Belamari, and H. Giordani : "Air-Sea interactions during Mediterranean torrential rain events", 7<sup>th</sup> Plinius Conference on Mediterranean Storms, Rethymnon, Crete-Greece, 5-7 October 2005. *Oral*

#### **2007**

Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq and H. Giordani : "Air-Sea interactions and coupling in Mediterranean torrential rain events", 1<sup>st</sup> HyMeX workshop, Toulouse, France, 9-11 January 2007. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq, H. Giordani and S. Belamari : "Interactions Air-Mer et Couplage Océan-Atmosphère associés aux événements fortement précipitants méditerranéens", Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 16-18 Janvier 2007. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq and H. Giordani : "Ocean-atmosphere interactions and coupling associated with torrential rainfall events", ICAM 2007 Conference, Chambéry, France, 4-8 June 2007. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq and H. Giordani : "Ocean-atmosphere interactions and coupling associated with Mediterranean heavy rainfall events", 15<sup>th</sup> AMS Conference on Air-Sea Interaction, Portland, Oregon, USA, 20-24 August 2007. *Oral*

#### **2008**

Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq and H. Giordani : "A high-resolution air-sea coupled model applied in Mediterranean heavy rain events", 2<sup>nd</sup> HyMeX workshop, Palaiseau, France, 2-4 June 2008. *Poster*

#### **2009**

Lebeaupin Brossier, C., and P. Drobinski : "Couplage océan-atmosphère à haute résolution appliqué sur le golfe du Lion dans deux situations de mistral", Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 27-29 Janvier 2009. *Oral*

Drobinski, P., A. Anav, S. Bastin, K. Béranger, F. D'Andrea, T. Dubos, F. Hafid, C. Lebeaupin, L. Li, L. Menut, L. Mortier, H. Omrani, N. Viovy, T. Salameh, and S. Szopa : "Plateforme de Modélisation Régionale Couplée (MORCE) pour l'étude des impacts du changement climatique : Application à la Méditerranée", Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 27-29 Janvier 2009. *Poster*

Béranger, K., P. Testor, M. Crépon, J. Beuvier, C. Lebeaupin Brossier : "Modelling the deep water formation in the Gulf of Lions (Mediterranean Sea)", CIESM workshop 38 'Dynamics of Mediterranean Deep Waters', Malta 27-30 May 2009. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., and P. Drobinski : "Numerical mesoscale air-sea coupling over the Gulf of Lions during two Tramontane/Mistral events", 3<sup>rd</sup> HyMeX workshop, Iraklion, Crete-Greece, 2-4 June 2009. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger and P. Drobinski : "Modelling of the Mediterranean circulation using atmospheric fields at different space-time resolution", 3<sup>rd</sup> HyMeX workshop, Iraklion, Crete-Greece, 2-4 June 2009. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger and P. Drobinski : "Ocean response in numerical mesoscale modelling during high-wind events over the Gulf of Lions", 11<sup>th</sup> Plinius conference, Barcelona, Spain, 7-11 September 2009. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., and P. Drobinski : "Numerical mesoscale air-sea coupling over the Gulf of Lions during two Tramontane/Mistral events", 9<sup>th</sup> EMS annual meeting, Toulouse, France, 28 September - 2 October 2009. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger and P. Drobinski : "Modelling of the Mediterranean circulation using atmospheric fields from the WRF model at different space-time resolution", 9<sup>th</sup> EMS annual meeting, Toulouse, France, 28 September - 2 October 2009. *Oral*

## **2010**

Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger and P. Drobinski : "Développement d'un couplage régional océan-atmosphère : Quelles sont les résolutions spatiale et temporelle requises pour la modélisation haute-résolution de la Méditerranée ? ", Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 26-28 Janvier 2010. *Poster*

Bastin, S., P. Drobinski, H. Omrani, K. Goubanova, L. Menut, D. Rodriguez, C. Lebeaupin, A. Colette, M. Stéfanon, A. Anav, B. Bessagnet, D. Khvorostyanov, V. Echevin : "The CORDEX project at Institut Pierre Simon Laplace : the CORDEX-WRF perspective", EGU, Vienne, Austria, May 2010. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger and P. Drobinski : "Modelling in a perpetual mode the Mediterranean circulation using atmospheric fields at different space-time resolutions", 39<sup>th</sup> CIESM, Venice, Italy, May 2010. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger and P. Drobinski : "Rapid upper ocean responses to intense meteorological events in mesoscale ocean-atmosphere regional modelling", 4<sup>th</sup> HyMex workshop, Bologna, Italy, June 2010. *Oral*

Béranger, K., J. Beuvier, C. Lebeaupin Brossier, S. Somot, C. Deltel, F. Lyard, R. Bourdallé-Badie, O. Legalloudec, G. Reffray, Y. Drillet, P. Testor, L. Mortier, J.-L. Fuda, I. Taupier-Letage : "Impact of the parameterisation of the averaged tide energy effect on the deep convection and general circulation of the Mediterranean Sea", 4<sup>th</sup> HyMex workshop, Bologna, Italy, June 2010. *Poster*

## **2011**

Omrani, H., C. Lebeaupin Brossier, P. Drobinski, S. Bastin and T. Dubos : "Med-CORDEX : analysis of the Mediterranean water budget variability regarding the effects of nudging, surface parameterization and horizontal resolution", CORDEX workshop, Trieste, Italy, March 2011. *Oral*

Béranger, K., C. Lebeaupin Brossier, M.-N. Houssais, P. Drobinski, M. Crépon, J. Beuvier, R. Bourdallé-Badie, Y. Drillet, N. Ferry, and F. Lyard : "Impact of the spatial distribution of the wind maximum on the deep convection in the Gulf of Lions and the Ligurian Sea (Western Mediterranean)", EGU, Vienne, Austria, April 2011. *Oral*

Beuvier, J., C. Lebeaupin Brossier, R. Bourdallé-Badie, K. Béranger, S. Somot, Y. Drillet, N. Ferry and F. Lyard : "Modelling the spreading of the Western Deep Water formed during winter 2004-2005 : role of deep eddies", EGU, Vienne, Austria, April 2011. *Poster*

Flaounas, E., P. Drobinski, M. Vrac, S. Bastin, J.-C. Calvet, G. Delrieu, C. Lebeaupin Brossier, E. Morin and H. Omrani : "Dynamical and Statistical downscaling of Mediterranean climate : comparison and uncertainty assessment in the Med-CORDEX and HyMeX context", EGU, Vienne, Austria, April 2011. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger, P. Drobinski, S. Bastin, S. Mailler, G. Samson, S. Masson, G. Madec, S. Valcke, L. Coquart, E. Maisonnave : "The regional coupled system WRF-NEMO over

- the Mediterranean (MORCE platform) : impacts of mesoscale coupled processes on the water budget estimation”, 5th HyMex workshop, Punta Prima, Spain, May 2011. *Oral*
- Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger, P. Drobinski : “Intense weather events and air-sea interactions in the regional WRF-NEMO coupled simulation (MORCE platform) over the Mediterranean”, 5th HyMex workshop, Punta Prima, Spain, May 2011. *Poster*
- Omrani, H., C. Lebeaupin Brossier, P. Drobinski, S. Bastin and K. Béranger : “HyMeX/MED-CORDEX analysis of the Mediterranean water budget variability regarding the effect of horizontal resolution”, 5th HyMex workshop, Punta Prima, Spain, May 2011. *Oral*
- Béranger, K., C. Lebeaupin Brossier, M.-N. Houssais, P. Drobinski, M. Crépon, J. Beuvier, R. Bourdallé-Badie, Y. Drillet, N. Ferry, F. Lyard : “Impact of the wind maximum distribution on the deep convection in the North-Western Mediterranean”, 5th HyMex workshop, Punta Prima, Spain, May 2011. *Poster*
- Flaounas, E., P. Drobinski, M. Vrac, S. Bastin, K. Béranger, M. Borga, J.-C. Calvet, G. Delrieu, C. Lebeaupin Brossier, E. Morin, H. Omrani, G. Tartari, R. Toffolon : “Evaluation of dynamical and statistical methods for downscaling of extreme precipitation and surface temperature in the Mediterranean region in the frame of HyMeX and MED-CORDEX.” , 5th HyMex workshop, Punta Prima, Spain, May 2011. *Oral*
- Drobinski, P. A. Anav, C. Lebeaupin Brossier, G. Samson, M. Stéfanon, S. Bastin, M. Baklouti, K. Béranger, J. Beuvier, R. Bourdallé-Badie, L. Coquart, F. D’Andrea, N. de Noblet, F. Diaz; J-C. Dutay, C. Ethe, M-A. Foujols, D. Khvorostiyarov; G. Madec, E. Maisonnave, M. Mancip, S. Masson, L. Menut, J. Palmieri, J. Polcher, S. Valcke and N. Viovy : “Model of the Regional Coupled Earth System (MORCE) : application to process and climate studies in the Mediterranean region”, 5th HyMex workshop, Punta Prima, Spain, May 2011. *Poster*
- Beuvier, J., C. Lebeaupin Brossier, R. Bourdallé-Badie, F. Sevault, S. Somot, K. Béranger, Y. Drillet, N. Ferry, F. Lyard : “Modelling the spreading of the Western Mediterranean Deep Water formed during winter 2004-2005”, NEMO users meeting, Toulouse, France, 29 June 2011. *Oral*
- Lebeaupin Brossier, C., K. Béranger, P. Drobinski, S. Bastin, G. Samson, S. Masson, G. Madec, L. Coquart, E. Maisonnave, S. Valcke : “Regional mesoscale air-sea coupling impacts on the Mediterranean water budget estimate and variability”, Seminar, Biodiversity and Climate Research Centre (BiK-F) - Francfort University, Germany, 6 July 2011. *Oral*
- Chiriaco, M., S. Bastin, H. Fréville, J. C. Dupont, L. Klenov, M. Haeffelin, C. Lebeaupin Brossier : “Interannual variability of the cloud cover in the Paris Area : A synoptic regime analysis”, 11<sup>th</sup> EMS annual meeting, Berlin, Germany, 12 - 16 September 2011. *Poster*
- Béranger, K., C. Lebeaupin Brossier, P. Drobinski : "HyMeX - Intense weather events and air-sea interactions in the regional WRF-NEMO coupled simulation (MORCE platform) over the Mediterranean", World Climate Research Program (WCRP) Open Science Conference, Denver, CO, USA, October 2011. *Poster*
- Béranger, K., C. Lebeaupin Brossier, P. Drobinski, S. Bastin, S. Mailler, G. Samson, S. Masson, G. Madec, S. Valcke, L. Coquart, E. Maisonnave : "HyMeX - The regional coupled system WRF-NEMO over the Mediterranean (MORCE platform) : impacts of mesoscale coupled processes on the water budget estimation", World Climate Research Program (WCRP) Open Science Conference, Denver, CO, USA, October 2011. *Poster*
- Béranger, K., C. Lebeaupin Brossier, M.-N. Houssais, P. Drobinski, M. Crépon, J. Beuvier, R. Bourdallé-Badie, Y. Drillet, N. Ferry, F. Lyard : "HyMeX - Impact of the wind maximum spatial distribution on the deep convection in the North-Western Mediterranean", World Climate Research Program (WCRP) Open Science Conference, Denver, CO, USA, October 2011. *Poster*
- Somot, S., P. M. Ruti, and the MedCORDEX team : "The Med-CORDEX initiative : towards fully coupled Regional Climate System Models to study the Mediterranean climate variability, change and impact", World Climate Research Program (WCRP) Open Science Conference, Denver, CO, USA, October 2011. *Poster*

Béranger, K., J. Beuvier, C. Lebeau-pin Brossier, S. Somot, 2011 : Spreading of the Western Mediterranean Deep Water after winter 2005 : time-scales and deep cyclone transport, CIESM workshop "Variability of the Eastern and Western Mediterranean circulation and thermohaline properties : similarities and differences", Rome, Italy, 7-9 November 2011. *Poster*

## 2012

Chiriaco M., S. Bastin, J-C. Dupont, L. Klenov, M. Haeffelin, C. Lebeau-pin Brossier : "Le rôle des nuages sur la variabilité du climat régional en Ile de France : comparaisons observations SIRTA/simulation WRF-CORDEX lors d'une analyse en régime de circulation", Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 23-26 Janvier 2012. *Poster*

Lebeau-pin Brossier, C., S. Somot, S. Belamari, M-N. Bouin, A. Alias, F. Sevault : "Evaluation of RCM against long-term in-situ buoys dataset", 6<sup>th</sup> HyMeX workshop, 7-10 May 2012. *Poster*

Chaboureau, J-P., B. Alhammoud, B. M. Funatsu, C. Lebeau-pin Brossier, C. Claud, O. Nuissier, K. Béranger, P. Drobinski : "Verification of model prediction of cloud cover and rain by satellite observation", 6<sup>th</sup> HyMeX workshop, 7-10 May 2012. *Poster*

Mazzocco Drvar D. , M. Telisman Prtenjak, C. Lebeau-pin Brossier : "Evaluation of the numerical forecast of the convective precipitation over Croatia", 6<sup>th</sup> HyMeX workshop, 7-10 May 2012. *Poster*

Stéfanon, M., P. Drobinski, F. D'Andrea, C. Lebeau-pin Brossier : "The soil moisture-temperature feedback during heat waves in MED-CORDEX simulations", 6<sup>th</sup> HyMeX workshop, 7-10 May 2012. *Poster*

Omrani, H., H. Mairech, P. Drobinski, K. Béranger, C. Lebeau-pin Brossier, S. Bastin, M. Boukthir : "Sensitivity of the circulation in the Strait of Sicily to a high resolution atmospheric forcing", 6<sup>th</sup> HyMeX workshop, 7-10 May 2012. *Poster*

## 2013

Arsouze T., J. Beuvier, K. Béranger, S. Somot, C. Lebeau-pin Brossier, R. Bourdallé-Badie, F. Sevault, and Y. Drillet : "Sensibility analysis of the Western Mediterranean Transition inferred by four companion simulations", EGU, Vienne, Austria, 8-12 April 2013. *Oral*

Lebeau-pin Brossier C. : "Characteristics of strong wind events and intense air-sea fluxes from September 2012 to March 2013 (SOP1 & SOP2)", HyMeX SOPs' debriefing workshop, Toulouse, France, 15-17 April 2013. *Oral*

Ducrocq V., S. Belamari, K. Béranger, J. Beuvier, M. N. Bouin, D. Bourras, L. Beguery, L. Coppola, A. Doerenbecher, P. Durand, P. Drobinski, C. Estournel, H. Giordani, D. Hauser, L. Labatut, C. Lebeau-pin-Brossier, M. Nuret, O. Roussot, S. Somot, I. Taupier-Letage, P. Testor : "HyMeX-SOP2 : a field campaign dedicated to dense water formation associated with mistral and tramontane in the Gulf of Lion", 13<sup>th</sup> EMS annual meeting, Reading, UK, 9-13 September 2013. *Poster*

Arsouze T., K. Béranger, J. Beuvier, S. Somot, F. Sevault, C. Lebeau-pin Brossier : "Insight of oceanic circulation in the Gulf of Lion during HyMeX's SOP1 inferred from 4 companion simulations : impact of horizontal and vertical resolution", 7<sup>th</sup> HyMeX workshop, Cassis, France, 7-10 October 2013. *Oral*

Berthou S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, C. Lebeau-pin Brossier : "Precipitation shift during a heavy precipitation event in the Cévennes due to the addition of ocean/atmosphere coupling in MED-CORDEX simulations", 7<sup>th</sup> HyMeX workshop, Cassis, France, 7-10 October 2013. *Poster*

Claud C., B. Alhammoud, B. M. Funatsu, C. Lebeau-pin Brossier, K. Béranger, P. Drobinski, J-P. Chaboureau : "A high resolution climatology of precipitation and deep convection from operational satellite microwave data for evaluating model uncertainties over the Mediterranean region", 7<sup>th</sup> HyMeX workshop, Cassis, France, 7-10 October 2013. *Poster*

Di Luca A., E. Flaounas, P. Drobinski, C. Lebeau-pin Brossier, T. Arsouze, K. Béranger : "The at-

- atmospheric component of the Mediterranean Sea water budget in a WRF physics ensemble and observations", 7<sup>th</sup> HyMeX workshop, Cassis, France, 7-10 October 2013. *Poster*
- Lebeaupin Brossier C., T. Arsouze, E. Bresson, R. Rainaud, V. Ducrocq, H. Giordani, M. Nuret, K. Béranger : "Ocean mixed layer responses to intense meteorological events during HyMeX-SOP1 from a high-resolution ocean simulation", 7<sup>th</sup> HyMeX workshop, Cassis, France, 7-10 October 2013. *Poster*
- Rainaud R., C. Lebeaupin Brossier, V. Ducrocq, H. Giordani, M. Nuret, E. Bresson, N. Fourrié, M-N. Bouin : "How AROME-WMED forecasts the air-sea interface during HyMeX SOP1 ?", 7<sup>th</sup> HyMeX workshop, Cassis, France, 7-10 October 2013. *Poster*
- Sevault F., S. Somot, F. Adloff, A. Alias, C. Dubois, C. Lebeaupin Brossier, P. Nabat, R. Roehrig : "A numerical simulation of the 1980-2012 ERA-Interim period of the Mediterranean with the regional climate system model CNRM-RCSM4", 7<sup>th</sup> HyMeX workshop, Cassis, France, 7-10 October 2013. *Poster*
- Arsouze, T., J. Beuvier, K. Béranger, S. Somot, C. Lebeaupin Brossier, R. Bourdallé-Badie, F. Sevault, Y. Drillet : "Sensibility analysis of the Western Mediterranean Transition inferred by four companion simulations", CIESM Congress, Marseille, France, November 2013. *Oral*
- 2014**
- Berthou S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, C. Lebeaupin Brossier : "When are Mediterranean heavy rain events sensitive to atmosphere-ocean coupled processes? A case study in Southern France.", EGU, Vienne, Austria, 28 April- 2 May 2014. *oral*
- Rainaud, R., C. Lebeaupin Brossier, V. Ducrocq, H. Giordani : "Western Mediterranean Sea air-sea exchanges from the AROME-WMED model during the HyMeX campaign". World Weather Open Science Conference, Montreal, 16-21 August 2014. *oral*
- Thévenot, O., M-N. Bouin, V. Ducrocq, C. Lebeaupin Brossier, O. Nuissier, F. Duffourg : "Sensitivity study of a Heavy Precipitating Event to the sea state using convection-permitting model simulations". World Weather Open Science Conference, Montreal, 16-21 August 2014. *oral*
- Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, C. Lebeaupin Brossier : "When and where are Mediterranean heavy rain events sensitive to atmosphere-ocean coupled processes? 8<sup>th</sup> HyMeX workshop, Valetta, Malta, 15-18 September 2014. *oral*
- Drobinski, P., E. Flaounas, A. Di Luca, S. Mailler, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, C. Lebeaupin Brossier : Cyclones contribution to the Mediterranean Sea water budget. 8<sup>th</sup> HyMeX workshop, Valetta, Malta, 15-18 September 2014. *poster*
- Giordani, H. P. Testor, L. Coppola, L. Prieur, I. Taupier-Letage, M.-N. Bouin, G. Caniaux, C. Lebeaupin Brossier, M. Herrmann, F. D'Ortenzio : A Multiplatform Fine Scale 3D Analysis of the Northwestern Mediterranean during the HyMeX/ASICS Experiment. Application to Dense Water Formation. 8<sup>th</sup> HyMeX workshop, Valetta, Malta, 15-18 September 2014. *oral*
- Lebeaupin Brossier, C., T. Arsouze, K. Béranger, M-N. Bouin, V. Ducrocq, H. Giordani, F. Léger, M. Nuret : How dense water formation in the north-western Mediterranean Sea during HyMeX SOP2 is represented in a 1/36°-resolution ocean simulation? 8<sup>th</sup> HyMeX workshop, Valetta, Malta, 15-18 September 2014. *oral*
- Rainaud, R. C. Lebeaupin Brossier, V. Ducrocq, H. Giordani, M. Nuret, N. Fourrié, M.-N. Bouin, I. Taupier-Letage, D. Legain : Air-sea exchanges over the Western Mediterranean Sea using AROME-WMED model during the HyMeX SOP1, 8<sup>th</sup> HyMeX workshop, Valetta, Malta, 15-18 September 2014. *oral*
- Rainaud, R. C. Lebeaupin Brossier, V. Ducrocq, H. Giordani : Oceanic mixed layer sensitivity of different turbulent flux parametrizations during the SOP1 HyMeX. 8<sup>th</sup> HyMeX workshop, Valetta, Malta, 15-18 September 2014. *poster*
- Thévenot, O., MN. Bouin, V. Ducrocq, C. Lebeaupin Brossier, O. Nuissier, F. Duffourg : Sensitivity study of an Heavy Precipitating Event to the sea state using convection-permitting model simu-

lations. 8<sup>th</sup> HyMeX workshop, Valetta, Malta, 15-18 September 2014. *poster*

## 2015

Béranger K., S. Anquetin, T. Arsouze, B. Boudevillain, J. Beuvier, C. Claud, C. Lebeaupin Brossier, G. Delrieu, P. Drobinski, E. Flaounas, J. Polcher, S. Somot, M. Stéfanon : New insights on the relationship between ocean mesoscale structures and spatio-temporal distribution of precipitations in the western Mediterranean basin during the HyMeX SOPs in 2012-2013, EGU, Vienne, Austria, 13-17 April 2015. *poster*

Béranger K., S. Anquetin, T. Arsouze, M-N. Bouin, S. Berthou, B. Boudevillain, J. Beuvier, C. Claud, C. Lebeaupin Brossier, G. Delrieu, P. Drobinski, M. Hamon, E. Flaounas, J. Polcher, J-F. Rysman, M. Stéfanon : Spatio-temporal distribution of precipitation in the western Mediterranean basin in autumn 2012. 9<sup>th</sup> HyMeX workshop, Mykonos, Greece, 21-25 September 2015. *poster*

Berthou S., S. Mailler, P. Drobinski, K. Béranger, S. Bastin, T. Arsouze, C. Lebeaupin Brossier, S. Somot, M. Stéfanon, E. Flaounas : Systematic modulation of heavy precipitation in the region of Valencia (Spain) by Mistral-induced sea-surface cooling in the previous days. 9<sup>th</sup> HyMeX workshop, Mykonos, Greece, 21-25 September 2015. *poster*

Flaounas, E. A. Di Luca, P. Drobinski, S. Mailler, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, C. Lebeaupin Brossier : Cyclone contribution to the Mediterranean Sea water budget. 9<sup>th</sup> HyMeX workshop, Mykonos, Greece, 21-25 September 2015. *oral*

Giordani H., C. Lebeaupin Brossier, F. Léger, L. Prieur, G. Caniaux, R. Waldmann : Dynamics of the Northwestern Mediterranean during HyMeX/ASICS Experiment : A PV-Perspective. 9<sup>th</sup> HyMeX workshop, Mykonos, Greece, 21-25 September 2015. *oral*

Lebeaupin Brossier, C., M-N. Bouin, A. Wieser : 5-year science review : Air-sea fluxes, marine and ocean boundary layer coupled processes. 9<sup>th</sup> HyMeX workshop, Mykonos, Greece, 21-25 September 2015. *oral*

Léger, F., C. Lebeaupin Brossier, H. Giordani, T. Arsouze, J. Beuvier, M-N. Bouin, V. Ducrocq, N. Fourrié, M. Nuret : Dense water formation in NEMO-AROME WMED : initial conditions and coupling impacts. 9<sup>th</sup> HyMeX workshop, Mykonos, Greece, 21-25 September 2015. *oral*

Rainaud, R., C. Lebeaupin Brossier, V. Ducrocq, H. Giordani, N. Fourrié, M-N. Bouin : High-resolution air-sea coupling with AROME-NEMO WMED for heavy precipitation event study. 9<sup>th</sup> HyMeX workshop, Mykonos, Greece, 21-25 September 2015. *oral*

Thévenot, O., M.-N. Bouin, V. Ducrocq, C. Lebeaupin Brossier, O. Nuissier, J. Pianezze, F. Duffourg : Influence of the sea state on the Mediterranean heavy precipitation : a case study from HyMeX SOP1. 9<sup>th</sup> HyMeX workshop, Mykonos, Greece, 21-25 September 2015. *poster*

Béranger K., S. Anquetin, T. Arsouze, S. Bastin, M-N. Bouin, S. Berthou, B. Boudevillain, J. Beuvier, C. Claud, C. Lebeaupin Brossier, G. Delrieu, C. Dubois, P. Drobinski, S. Froidurot, G. Molinié, J. Polcher, J-F. Rysman, F. Sevault, S. Somot, M. Stéfanon : Heat and freshwater budgets over the Mediterranean area from a new 34-year MED-CORDEX hindcast. Joint HyMeX-Baltic Earth workshop, Roma, Italy, 5-6 November 2015. *poster*

## 2016

Léger, F., C. Lebeaupin Brossier, H. Giordani, T. Arsouze, J. Beuvier, M-N. Bouin, V. Ducrocq, N. Fourrié : The NEMO-AROME WMED high-resolution air-sea coupled system : impact on dense water formation. EGU, Vienne, Austria, 17-22 April 2016. *poster*

Giordani, H., C. Lebeaupin Brossier, F. Léger : Dynamics of the Dense Water Formation in the north-western Mediterranean during the HyMeX/ASICS experiment : a PV-Perspective. 48<sup>th</sup> international Liege colloquium on ocean dynamics, "Submesoscale Processes : Mechanisms, Implications and new Frontiers", Liège, Belgium, 23-27 May 2016. *oral*

Lebeaupin Brossier, C., R. Rainaud, C. Sauvage, V. Ducrocq, M-N. Bouin : The AROME-NEMO WMED high-resolution air-sea coupled system : results and future work. Réunion de la Science Team TIP du programme HyMeX, Toulouse, France, 4 Novembre 2016. *oral*

## 2017

- Bouin, M-N., J-L. Redelsperger, C. Lebeau-pin Brossier : Fine-scale atmospheric processes and sensitivity to sea-state in modelling a Mediterranean heavy precipitation event. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 30 January-3 February 2017. *oral*
- Faure, G., C. Lebeau-pin Brossier, D. Barbary, Y. Drillet, E. Durand : Un premier couplage du modèle Arome avec l'océan en opérationnel à Météo-France. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 30 January-3 February 2017. *oral*
- Giordani, H., C. Lebeau-pin Brossier, F. Léger, G. Caniaux : Dynamics of the Dense Water Formation in the Northwestern Mediterranean during the HyMeX/ASICS Experiment : A PV-Perspective. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 30 January-3 February 2017. *oral*
- Lebeau-pin Brossier, C., F. Léger, H. Giordani, J. Beuvier, M-N. Bouin, V. Ducrocq, N. Fourrié : Le système couplé océan-atmosphère à haute-résolution AROME-NEMO WMED : impact sur la formation d'eau dense. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 30 January-3 February 2017. *oral*
- Rainaud, R, C. Lebeau-pin Brossier, V. Ducrocq, H. Giordani : Impact du couplage océan-atmosphère à haute-résolution sur deux événements fortement précipitants en Méditerranée occidentale. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 30 January-3 February 2017. *oral*
- Sauvage, C., C. Lebeau-pin Brossier, V. Ducrocq, M-N. Bouin : Prévision couplée océan-atmosphère des épisodes méditerranéens : vers une meilleure prise en compte des débits des fleuves et de l'état de mer. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 30 January-3 February 2017. *oral*
- Lebeau-pin Brossier, C., F. Léger, R. Rainaud, V. Ducrocq, H. Giordani, M-N. Bouin, N. Fourrié, C. Sauvage, A. Voltaire : Coupling NEMO to AROME via the SURFEX-OASIS interface : Development and application to the HyMeX SOPs in the Western Mediterranean region. Surfex Users Workshop, 27 February-1 March 2017, Toulouse, France. *oral*
- Bouin, M-N., J-L. Redelsperger, C. Lebeau-pin Brossier : Fine-scale atmospheric processes and sensitivity to sea-state representation during HyMeX IOP8 heavy precipitation event. 10<sup>th</sup> HyMeX workshop, Barcelona, Spain, 4-7 July 2017. *oral*
- Sauvage, C., C. Lebeau-pin Brossier, V. Ducrocq, M-N. Bouin : Ocean-atmosphere coupling for Mediterranean heavy precipitation forecast : Better river runoff and sea state modelling. 10<sup>th</sup> HyMeX workshop, Barcelona, Spain, 4-7 July 2017. *poster*

## 2018

- Faure, G., P. Chambon, C. Lebeau-pin Brossier : Météo-France New NWP Models in Tropical Regions. 33<sup>rd</sup> AMS Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, Ponte Vedra, FL, USA, 16-20 April 2018. *Oral*
- Bouin, M-N., C. Lebeau-pin Brossier : Simulation of the medicane Qendresa and sensitivity to surface air-sea exchanges. 11<sup>th</sup> HyMeX workshop, Lecce, Italy, 28 May - 1 June 2018. *Poster*
- Sauvage, C., C. Lebeau-pin Brossier, M-N. Bouin, V. Ducrocq : Role of the sea state on the air-sea exchanges during a Mediterranean heavy precipitation event in a kilometer-scale coupled forecast system. 11<sup>th</sup> HyMeX workshop, Lecce, Italy, 28 May - 1 June 2018. *Oral*
- Lebeau-pin Brossier, C., M-N. Bouin, S. Belamari, C. Sauvage : Air-sea exchanges in AROME : Sensitivity tests on the 12-14 October 2016 case over South-Eastern France. 11<sup>th</sup> HyMeX workshop, Lecce, Italy, 28 May - 1 June 2018. *Poster*
- Sauvage, C., C. Lebeau-pin Brossier, M-N. Bouin, V. Ducrocq : Role of the sea state on the air-sea exchanges during a Mediterranean heavy precipitation event in a kilometer-scale forecast system. 21<sup>st</sup> AMS Conference on Air-Sea Interaction, Oklahoma city, OK, USA, 11-15 June 2018. *Oral*

## 2019

- Bouin, M-N., C. Lebeau-pin Brossier : Impact of ocean-atmosphere coupling on the medicane Qendresa through high-resolution numerical simulation. 12<sup>th</sup> HyMeX workshop, Split, Croatia, 20-



23 May 2019. *Oral*

Sauvage, C., C. Lebeaupin Brossier, M.-N. Bouin, V. Ducrocq : Characterization of the air-sea exchanges during a Mediterranean heavy precipitation event using realistic sea state modelling. 12<sup>th</sup> HyMeX workshop, Split, Croatia, 20-23 May 2019. *Oral*

Caumont, O., F. Bouttier, C. Lebeaupin Brossier, A. Lovat, M. Mandement, O. Nuissier, O. Laurantin, J. Eeckman : The catastrophic case of heavy rainfall and flash flooding of 14-15 October 2018 in south-western France : a multi-scale observational and modelling analysis. 10<sup>th</sup> European Conference on Severe Storms, Krakow, Poland, 4-8 November 2019. *Oral*

## **2020**

Caumont, O., F. Bouttier, C. Lebeaupin Brossier, A. Lovat, M. Mandement, O. Nuissier, O. Laurantin, J. Eeckman : The catastrophic case of heavy rainfall and flash flooding of 14-15 October 2018 in south-western France : a multi-scale observational and modelling analysis. 30<sup>th</sup> AMS Conference on Weather Analysis and Forecasting / 26<sup>th</sup> AMS Conference on Numerical Weather Prediction, Boston, MA, USA, 13-17 January 2020. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C. : Ocean-Atmosphere coupling (for short and extended predictions). Ocean Modeling for Prediction Workshop "How to improve models for increased prediction skills?", Toulouse, France (virtual), 29 June- 1<sup>st</sup> July 2020. *Oral*

Malardel, S., S. Bielli, J. Pianezze, C. Lebeaupin Brossier : Ocean-Wave-Atmosphere coupling with SURFEX and OASIS for mesoscale simulations and numerical weather prediction of tropical cyclones. 5<sup>th</sup> Workshop on Coupling Technologies for Earth System Models (CW2020), Toulouse, France (virtual), 21-24 September 2020. *Oral*

## **2021**

Lebeaupin Brossier, C., C. Sauvage, M.-N. Bouin, J. Pianezze, J. Beuvier, S. Malardel : Towards ocean-atmosphere-wave coupled forecasts with AROME-NEMO-WW3 : development, first results and future work. 1<sup>st</sup> ACCORD ASW, Virtual, 12-16 April 2021. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., C. Sauvage, M.-N. Bouin, J. Pianezze, J. Beuvier : Towards kilometer-scale ocean-atmosphere-waves coupled forecast : Development and application to Mediterranean heavy precipitation forecast. International Workshop for mid-latitude air-sea interaction : Advancing predictive understanding of regional climate variability and change across timescale, Sapporo, Japan (& virtual), 8-9 and 12-14 June 2021. *Oral, Invited Speaker*

## **2022**

Beuvier, J., Pianezze, J., Lebeaupin Brossier, C., Samson, G., Faure, G., Ruggiero, G., Marquillie, M., Bouttier, F., Garric, G. : Modélisation océanique régionale à haute résolution pour le couplage océan-atmosphère sur l'Europe de l'Ouest et la France métropolitaine. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 7-9 June 2022. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., Faure, G., Sevault F et le groupe projet AROBASE : Le projet AROBASE : Vers un système de modélisation et prévision multi-couplé à échelle kilométrique. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 7-9 June 2022. *Oral*

Marquillie, M., Bouttier, F., Lebeaupin Brossier, C. : Analyse du rôle de la perturbation de la température de surface de la mer dans la prévision d'ensemble AROME opérationnelle et couplée à échelle kilométrique. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 7-9 June 2022. *Oral*

Misi, Q., Beuvier, J., Lebeaupin Brossier, C. : Impact des processus couplés sur la stratification océanique superficielle. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 7-9 June 2022. *Poster*

## **2023**

Lebeaupin Brossier, C., Faure, G., Sevault, F., and the AROBASE project group : The AROBASE project : Towards a kilometer-scale AROME-based multi-coupled modeling and forecasting system. 3<sup>rd</sup> ACCORD All Staff Workshop, 27-31 March 2023, Tallinn, Estonia & hybrid. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., Sevault, F., Faure, G., Bouin, M.-N., Beuvier, J., Bielli, S., Corale, L., Dalphinnet, A., Malardel, S. : The AROBASE project : Development of a kilometre-scale multi-coupled modelling and forecasting system and first results. EMS 2023, 3-8 September 2023, Bratislava, Slovakia & Online. *Oral*

## **B.2.2 Autres communications**

### **2004**

Lebeaupin, C., V. Ducrocq, and H. Giordani : "Études numériques de la sensibilité des épisodes de pluies intenses aux forçages de surface : Influence de la température de surface de la mer Méditerranée", Journée OHM-CV, Nîmes, France, 15 juin 2004. *Poster*

### **2005**

Lebeaupin, C., V. Ducrocq, and H. Giordani : "Étude de la sensibilité des événements fortement précipitants en région méditerranéenne à la température de surface de la mer Méditerranée", Réunion OHM-CV, Toulouse, France, 7 janvier 2005. *Oral*

Lebeaupin, C., V. Ducrocq, S. Belamari, and H. Giordani : "Interactions air-mer dans des cas fortement précipitants en région méditerranéenne", Journées OHM-CV, Grenoble, France, 17-18 novembre 2005. *Oral*

### **2006**

Lebeaupin, C., V. Ducrocq, S. Belamari, H. Giordani and A. Pirani : "Externalisation : Paramétrisation des flux sur mer", Journée CNRM/GMME/MC2, Toulouse, France, 13 mars 2006. *Oral*

Lebeaupin, C., V. Ducrocq, S. Belamari, H. Giordani and A. Pirani : "Sensibilité des événements fortement précipitants à la mer Méditerranée", Réunion de mi-parcours CYclogénèse et PRé-  
cipitations Intenses en région Méditerranéenne (CYPRIM), Thème 2 Eléments de prévisibilité, besoin en observation de la gestion du risque, Toulouse, France, 16 mars 2006. *Oral*

Lebeaupin, C., V. Ducrocq, S. Belamari, H. Giordani and A. Pirani : "Étude du couplage océan-atmosphère sur des événements fortement précipitants en région méditerranéenne", Journée thématique Océan-Atmosphère du CNRM, Toulouse, France, 11 avril 2006. *Oral*

Lebeaupin, C., V. Ducrocq, S. Belamari, H. Giordani and A. Pirani : "Couplage Océan-Atmosphère appliqué à des événements fortement précipitants en région méditerranéenne", Séminaire CNRM/GMME, Toulouse, France, 24 avril 2006. *Oral*

### **2007**

Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq and H. Giordani : "Couplage océan-atmosphère appliqué à des événements fortement précipitants en région méditerranéenne", 4ème réunion des utilisateurs Méso-NH, Toulouse, France, 23-24 avril 2007. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., V. Ducrocq and H. Giordani : "Étude du couplage océan-atmosphère appliqué aux événements fortement précipitants en région méditerranéenne", séminaire LEGI, Grenoble, France, 22 novembre 2007. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., "Étude du couplage océan-atmosphère appliqué aux événements fortement précipitants en région méditerranéenne", soutenance de thèse CNRM/GAME, Toulouse, France, 19 décembre 2007. *Oral*

### **2009**

Hafid, F., P. Drobinski, P., A. Anav, S. Bastin, K. Béranger, F. D'Andrea, T. Dubos, C. Lebeaupin, L. Li, L. Menut, L. Mortier, H. Omrani, N. Viovy, T. Salameh, and S. Szopa : "Développement d'une plate-forme de MODélisation Régionale CouplÉE pour l'étude des impacts d'À»s au changement climatique. Application à la MEDiterranée", Journées du GIS-Climat "Renforcer la recherche interdisciplinaire sur le changement climatique", Paris, France, 25 Mai 2009. *Poster*

- Béranger, K., R. Bourdallé-Badie, C. Deltel, J. Beuvier, Y. Drillet, O. Legalloudec, G. Reffray, A. Moez, L. Li, S. Somot, C. Lebeau-pin-Brossier, S. Law Chune : “Modelling the Mediterranean Sea in the SiMED project”, NEMO users Meeting, Paris, France, 2-3 July 2009. *Poster*
- Beuvier, J., M. Arfa, K. Béranger, R. Bourdallé-Badie, C. Deltel, Y. Drillet, S. Law Chune, C. Lebeau-pin-Brossier, O. Legalloudec, L. Li, , G. Reffray, S. Somot : “Simulation de la mer Méditerranée (PPR SiMED)”, Journées du Groupe Mission Mercator Coriolis, Brest, France, 16-18 Novembre 2009. *Poster*

## 2010

- Drobinski, P., A. Anav, C. Lebeau-pin Brossier, G. Samson, M. Stéfanon, S. Bastin, M. Baklouti, K. Béranger, L. Coquart, Fabio D’Andrea, F. Diaz, M-A. Foujols, D. Khvorostiyannov, G. Madec, E. Maisonnave, M. Mancip, S. Masson, L. Menut, S. Valcke, N. Viovy : Modelling the Regional Coupled Earth system (MORCE) : application to process and climate studies in vulnerable regions, Conférence du GIS-Climat “Autour du changement climatique : adaptations, controverses”, Paris, France, 29 Novembre 2010. *Poster*
- Lebeau-pin Brossier, C., K. Béranger et P. Drobinski : "Développement d’une plate-forme de modélisation régionale pour la Méditerranée : variabilité du système couplé océan-atmosphère et événements intenses", séminaire CNRM, Toulouse, France, 3 décembre 2010. *Oral*

## 2011

- Lebeau-pin Brossier, C., H. Omrani, K. Béranger, P. Drobinski, S. Bastin : “Comparaison des simulations WRF à 20 et 50km de résolution : focus sur évaporation et précipitation”, Journée SiMed, Palaiseau, France, 14 Juin 2011. *Oral*
- Lebeau-pin Brossier, C., K. Béranger, P. Drobinski, S. Bastin, G. Samson, S. Masson, G. Madec, L. Coquart, E. Maisonnave, S. Valcke : “Effet du couplage océan-atmosphère sur le bilan d’eau en Méditerranée”, Journée CORDEX ISPL, Paris, France, 21 Juin 2011. *Oral*
- Chiriaco, M., S. Bastin, H. Fréville, J. C. Dupont, L. Klenov, M. Haeffelin, C. Lebeau-pin Brossier : “Variabilité interannuelle de la couverture nuageuse en Ile-de-France : une analyse en régime synoptique”, Conseil Scientifique du SIRT, Paris, France, 9 Septembre 2011. *Oral*
- Alhammoud, B., K. Béranger, C. Lebeau-pin Brossier, P. Drobinski : “Impact de la résolution verticale sur le réalisme des simulations MED12 : zoom sur l’EMT et la WMT”. Journées du Groupe Mission Mercator Coriolis, Toulouse, France, 7-9 Novembre 2011. *Poster*
- Beuvier, J., K. Béranger, C. Lebeau-pin Brossier, S. Somot, F. Sevault, Y. Drillet, R. Bourdallé-Badie, N. Ferry, F. Lyard : “La WMT dans MED12”, Journées du Groupe Mission Mercator Coriolis, Toulouse, France, 7-9 Novembre 2011. *Poster*
- Alhammoud, B., C. Claud, B. Funatsu, J-P. Chaboureau, C. Lebeau-pin Brossier, K. Béranger, P. Drobinski : “Climatologie mensuelle 1999-2010 des précipitations sur la région méditerranéenne d’après les données satellites micro-ondes”, Journées du Groupe Mission Mercator Coriolis, Toulouse, France, 7-9 Novembre 2011. *Poster*
- Lebeau-pin Brossier, C., S. Bastin, K. Béranger, P. Drobinski, F. Orain : “Impacts du couplage sur un événement de fortes précipitations précédé d’un coup de Mistral”, Journées du Groupe Mission Mercator Coriolis, Toulouse, France, 7-9 Novembre 2011. *Poster*

## 2012

- Lebeau-pin Brossier, C., P. Drobinski., K. Béranger, S. Bastin, F. Orain : “Rôle du couplage océan-atmosphère sur le bilan d’eau en Méditerranée et ses extrêmes”, Journée du pôle Climat et Environnements Régionaux IPSL, Paris, France, 14 Juin 2012. *Oral*

## 2013

- Lebeau-pin Brossier, C., S. Somot, F. Sevault, S. Belamari, F. Adloff, A. Alias, C. Dubois, P. Nabat : “Sensibilité à la paramétrisation des flux turbulents air-mer du système couplé NEMOMED8-TRIP-ALADIN50”, Journées du projet SiMed, Palaiseau, France, 28 Mars 2013. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C. : "Vers le couplage SURFEX-NEMO", 7ème réunion des utilisateurs Méso-NH, Toulouse, France, 21-22 novembre 2013. *Oral*

## **2014**

Lebeaupin Brossier, C., F. Léger : "NEMO-WMED36", réunion du projet ASICS-Med, 15-16 Décembre 2014. *Oral*

## **2015**

Léger, F., C. Lebeaupin Brossier : "WMED36 et son couplage avec AROME". Réunion annuelle SiMed, Toulouse, France, 20-21 Mai 2015. *Oral*

Léger, F., C. Lebeaupin Brossier, H. Giordani, T. Arsouze, J. Beuvier, M-N. Bouin, V. Ducrocq, N. Fourrié, M. Nuret, R. Rainaud : "The NEMO-AROME WMED coupled system : Application to dense water formation during HyMeX SOP2". Journées GMMC, Toulouse, France, 15-17 Juin 2015. *Poster*

Lebeaupin Brossier, C. : "Modélisation des flux forts en Méditerranée", Atelier DEPHY2, Toulouse, France, 2-3 novembre 2015. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., R. Rainaud, F. Léger, V. Ducrocq, H. Giordani : "Le système couplé AROME-NEMO WMED : application aux SOPs HyMeX", 8ème réunion des utilisateurs Méso-NH, Toulouse, France, 5-6 novembre 2015. *Oral*

## **2016**

Ducrocq, V., F. Bouttier, O. Caumont, F. Duffourg, N. Fourrié, R. Honnert, C. Lac, C. Lebeaupin Brossier, O. Nuissier, D. Ricard, B. Vincendon, B. Vié : "Prévision des épisodes méditerranéens", Assises Nationales des Risques Naturels, Marseille, France, 22-23 Mars 2016. *Oral*

Voltaire, A., B. Decharme, J. Pianezze, C. Lebeaupin Brossier, F. Sevault, L. Seyfried, V. Garnier, S. Bielli, S. Valcke, A. Alias, M. Accensi, F. Ardhuin, M-N. Bouin, V. Ducrocq, S. Faroux, H. Giordani, F. Léger, P. Marsaleix, R. Rainaud, J-L. Redelsperger, E. Richard, S. Riette : "The seamless and multi-model coupling between atmosphere, land, hydrology, ocean, waves and sea-ice models based on SURFEX using OASIS3-MCT". Journées GMMC, Toulon, France, 7-9 Juin 2016. *Oral*

## **2017**

Sauvage, C., C. Lebeaupin Brossier, V. Ducrocq, M-N. Bouin : "Prévision couplée océan-atmosphère des épisodes méditerranéens : vers une meilleure prise en compte des débits des fleuves et de l'état de mer". Réunion annuelle SiMed, Marseille, France, 23-24 Mars 2017. *Oral*

Faure, G., C. Lebeaupin Brossier, D. Barbary, et al. : "La v2 des Arome pour les Outre-Mer : des évolutions ambitieuses dès 2017". Atelier de Prévisions Outre-Mer, Toulouse, France, 29 Mai 2017. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., F. Léger, R. Rainaud, C. Sauvage, M-N. Bouin, V. Ducrocq, N. Fourrié, H. Giordani, A. Voltaire : "Le couplage océan-atmosphère AROME-NEMO", Rencontres R& D Météo-France "Le vent dans tous ses états", Toulouse, France, 19-21 Juin 2017. *Oral*

Faure, G., C. Lebeaupin Brossier : "Arome et les vents cycloniques", Rencontres R& D Météo-France "Le vent dans tous ses états", Toulouse, France, 19-21 Juin 2017. *Oral*

Giordani, H., C. Lebeaupin Brossier : "Dynamics of the Dense Water Formation in the Northwestern Mediterranean during the HyMeX/ASICS Experiment : A PV-Perspective". Journées GMMC, Brest, 20-22 Juin 2017. *Oral*

## **2018**

Faure, G., P. Chambon, C. Lebeaupin Brossier, P. Brousseau, D. Barbary, L. Aouf : "Prévision numérique des cyclones à Météo-France", Assemblée Générale du Comité National Français de Géodésie et Géophysique (CNFGG), 5 mars 2018, Paris, France. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., C. Sauvage, M-N. Bouin, V. Ducrocq : "Vers une prévision intégrée en Méditerranée : impact des rivières et couplage atmosphère-vagues-océan.", Rencontres R& D Météo-

France "Les territoires à enjeux", Toulouse, France, 11-13 Juin 2018. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C. : "Interactions air-mer, couplage océan-atmosphère-vagues et épisodes méditerranéens.", Evènement du Jeudi de l'Ecole Nationale de la Météorologie, "Fortes précipitations en Méditerranée", Toulouse, France, 11 Octobre 2018. *Oral*

Ducrocq, V., B. Boudevillain, C. Bouvier, I. Braud, N. Fourrié, C. Lebeaupin Brossier, P. Javelle, O. Nuissier, O. Payrastra, H. Roux, I. Ruin, B. Vincendon : "Le programme HyMeX - Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région Méditerranée". Colloque SHF "De la prévision des crues à la gestion de crise", 14-16 novembre 2018, Avignon, France. *Oral*

### **2019**

Lebeaupin Brossier, C., C. Sauvage : Couplage océan-atmosphère-vagues à échelle kilométrique pour la prévision des épisodes méditerranéens. SiMed annual meeting, Toulouse, France, 29 November 2019. *Oral*

### **2020**

### **2021**

### **2022**

Lebeaupin Brossier, C., J. Beuvier : Impact des processus couplés sur la stratification océanique. Café-séminaire de l'Axe Scientifique Transverse "Couplages" de l'OMP, Toulouse, France, 28 Novembre 2022. *Oral*

### **2023**

Beuvier, J., Lebeaupin Brossier, C., Misi, Q., Sevault, F., Faure, G., Bouin, M.-N. : Modélisation océanique régionale à haute résolution dans le contexte du développement d'AROBASE. Journées du Groupe Mission Mercator Coriolis, Brest, France, 31 May - 2 June 2023. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., et al. : Application de la Recherche à l'Opérationnel pour l'assemblage d'AROME avec des Systèmes Environnementaux. COMSI pour tous, Toulouse, France, 27 juin 2023. *Oral*

Lebeaupin Brossier, C., Sevault, F., Faure, G., Bouin, M.-N., Beuvier, J., S. Malardel, F. Nicolay, A. Dalphinnet : Les premiers pas du système AROBASE : Application au Derecho en Corse. Atelier Prévi-GMAP spécial, Toulouse, France, 24 novembre 2023. *Oral*

# Annexe C

## Glossaire

### - A -

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
AEs	Algerian Eddies
AIS	Atlantic Ionian Stream
AJ	Atlantic Jet
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>
ATC	Atlantic Tunisian Current
AW	Atlantic Water
AWARE	A consistent oceAn-Wave-AtmosphERE coupling : from the processes to climate models

### - B -

BTC	Bifurcation Tyrrhenian Current
-----	--------------------------------

### - C -

CASSIOWPE	Characterising the Atmosphere and Sea Surface Interactions for the deployment of Offshore Wind in the Gulf of Lion
CBLAST	Coupled Boundary Layers and Air-Sea Transfer program

<i>CBLAST-Hurricane</i>	<i>hurricane component of CBLAST</i>
<i>CBLAST-LOW</i>	<i>low-wind component of CBLAST</i>
CEPMMT	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
<i>CERA</i>	<i>Coupled-ERA</i>
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CFB	Current FeddBack
CICE	<i>Los Alamos sea ice model</i>
CIOM	Coupled Ice-Ocean Model
CLAM	Couche Limite Atmosphérique Marine
CLIM-RUN	Climate Local Information in the Mediterranean region : Response to User Needs
CMEMS	Copernicus Marine Environment Monitoring Service
CMIP	Climate Model Intercomparison Projet
CMO	Couche de Mélange Océanique
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CNRM-CM6-1	Version 6 du modèle global de climat du CNRM et du CERFACS
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
COAMPS	Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System
<i>COAMPS-TC</i>	<i>Tropical Cyclone dedicated version of COAMPS</i>
COARE	Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment
COAWST	Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport
CRCM	Canadian Regional Climate Model
CROCO	Coastal and Regional Ocean COmmunity model
CS	Cyclonic Southerly
CSTMS	Community Sediment Transport Modeling System
CSW	Cyclonic SouthWesterly
CTD	Conductivity Temperature Depth
CTRIP	version CNRM du modèle de routage Total Runoff Integrating Pathways
<i>CUPOM</i>	<i>Colorado University version of POM</i>
CYPRIM	CYclogenèse et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne

**- D -**

DEWEX	DEep Water formation EXperiment
DirOp/Mar	Service de prévision MARine de la Direction des Opérations pour la prévision de Météo-France
DWL	Diurnal Warm Layer
DYNAMO	DYNAMics of the Madden-jullian Oscillation

**- E -**

EAG	Eastern Anticyclonic Gyre
ECC	Eastern Corsica Current
ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ECUME	Exchange Coefficients from Unified Multi-campaigns Estimates
ECWAM	ECMWF WAve Model
eIBI	extended-IBI ocean operational regional system
EMDW	Eastern Mediterranean Deep Water
ENSO	El-Niño Southern Oscillation
ENSTA	Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées
EOP	Enhanced Observation Period
ERA	ECMWF Re-Analysis
ESM	Earth System Model
ESMF	Earth System Modeling Framework
EUREC4A	Elucidating the role of clouds- circulation coupling in climate
EXAEDRE	EXploiting new Atmospheric Electricity Data for Research and the Environment

**- F -**

FP7	Seventh Framework Programme
-----	-----------------------------

**- G -**

GELATO	Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean
GEM	Global Environmental Multiscale
GFS	Global Forecast System
GIOPS	Global Ice Ocean Prediction System
GIS	Groupement d'Intérêt Scientifique
GMAP	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision du CNRM
GMGEC	Groupe de Météorologie de Grande Echelle et Climat du CNRM
GOSSIP	Globally Organized System for Simulation Information Passing

**- H -**

HC	Heat Content
HDR	Habilitation à Diriger des Recherches
HPC	High Performance Computing system
HPE	Heavy Precipitation Event
HYCOM	HYbrid Coordinate Ocean Model
HYMEX	Hydrological cycle in the Mediterranean EXperiment

**- I - J -**

IBI	Irish-Biscay-Iberian ocean operational regional system
-----	--



IFS	Integrated Forecast System
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
IOP	Intensive Observation Period
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
IS	Indice de Stratification
ISBA	Interactions between Soil, Biosphere, and Atmosphere

**- K - L -**

LA / Laero	Laboratoire d'Aérodynamique
LACy	Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones
LAM	Limited Area Model
LATEX	Lagrangian Transport Experiment
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
LOCALISING	reaching the Local sCALE in cLimate Studies – towards reliable climate Information for local adaptation strategies
LOCEAN	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques
LOP	Long-term Observation Period
LOPS	Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale

**- M -**

MASCOT	Modélisation et Assimilation des Surfaces Continentales pour l'Opérationnel
MAW	Modified Atlantic Water
MCS	Mesoscale Convective System
MCT	Model Coupling Toolkit
MERMEX	Marine Ecosystems Response in the Mediterranean Experiment
MESO-NH	Modèle de recherche non-hydrostatique développé par le CNRM et le LA
METOF	MOI Expert Team on Ocean Forecasting
<i>MFWAM</i>	<i>Météo-France version of WAM</i>
MISTRALS	Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales
MLD	Mixed Layer Depth
MM5	Mesoscale Model 5
MOI	Mercator Ocean International
MOOSE	Mediterranean Ocean Observing System for the Environment
MORCE-MED	MODélisation Régionale CouplÉE pour l'étude des impacts régionaux du changement climatique - Application à la région MEDiterranée

MOW Mediterranean Outflow Water  
MSWC *système MesoNH-SURFEX-WW3-CROCO*

- N -

NAVDAS Navy Atmospheric Variational Data Assimilation System  
NAVGEM Navy Global Environmental Model  
NC Northern Current  
NCODA Navy Coastal Ocean Data Assimilation  
NCOM Navy Coastal Ocean Model  
NEATL36 Autre nom pour la configuration régional IBI de MOI  
NEMO Nucleus for European Modelling of the Ocean  
NEMO-FRA36 *Configuration du modèle NEMO sur l'Atlantique Nord-Est, Manche, mer du Nord et Méditerranée au 1/36°*  
NEMO-MED12 *Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée au 1/12°*  
NEMO-MED36 *Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée au 1/36°*  
NEMO-MED8 *Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée au 1/8°*  
NEMO-NWMED72 *Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée nord-occidentale au 1/72°*  
NEMO-WMED36 *Configuration du modèle NEMO sur la Méditerranée Occidentale au 1/36°*  
NRL Naval Research Laboratory  
NUOPC National Unified Operational Prediction Capability

- O -

OASIS Ocean Atmosphere Sea Ice Soil  
OASIS3-MCT *coupleur OASIS (v3) interfacé avec MCT*  
OO Océanographie Opérationnelle  
OSTIA Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis

- P -

PEARO Prévision d'ensemble AROME  
PEPR Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche  
PERLE Pelagic Ecosystem Response in the Levant Experiment  
PNT Prévision Numérique du Temps  
POI Période d'Observation Intensive  
POM Princeton Ocean Model  
PPR Projet de Partenariat Renforcé  
PSY2/4 Modèle global de prévision océanographique (1/12°) opéré par MOI  
PV Potential Vorticity

- Q - R -

RCM Regional Climate Model

RCP Representative Concentration Pathways  
RegIPSL Regional climate model of IPSL  
ROMS Regional Ocean Modeling System

**- S -**

SCRIP Spherical Coordinate Remapping and Interpolation Package  
SCV Sub-mesoscale Coherent Vortices  
SIMED Simulation de la mer Méditerranée  
SOP Special Observation Period  
*SOP1 First SOP of HyMeX (5 September - 6 November 2012)*  
*SOP2 Second SOP of HyMeX (27 January - 15 March 2013)*  
SST Sea Surface Temperature  
SURFEX Surface Externalisée  
SWAN Simulating WAVes Nearshore

**- T -**

TDW Tyrrhenian Dense Water  
TRACCS TRAnsformer la modélisation du Climat pour les services ClimatiqueS (PEPR)

**- U -**

UM Unified Model

**- V - W -**

WAG Western Anticyclonic Gyre  
WAM WAve prediction Model  
WASP Wave-Age-dependent Stress Parametrization  
WCC Western Corsica Current  
WIW Winter Intermediate Water  
WMDW Western Mediterranean Dense Water  
WRF Weather Research and Forecasting  
WW3 WaveWatchIII

**- X - Y - Z -**

# **Ocean-atmosphere processes, coupled forecast at fine-scale and heavy precipitation events in the Western Mediterranean basin**

---

## **Abstract**

This manuscript summarizes the author's work on the study of heavy precipitation events in the Mediterranean region and the analysis of the Mediterranean Sea role. The development of several coupled modeling tools permits to highlight the complex role of the heat content, the stratification and the upper-level ocean dynamics of the Med Sea on these severe events, and more generally to improve the representation of air-sea interaction processes in models and evaluations of the coupled effects on high-impacts meteorological phenomena. The context and perspectives of coupled fine-scale modeling and the envisaged progress and challenges for numerical weather prediction are also presented in this manuscript.

---

**Keywords :** air-sea interactions ; coupled numerical modelling ; high-resolution simulations ; Mediterranean Sea ; precipitating systems

# Processus océan-atmosphère, prévision couplée à fine-échelle et précipitations intenses sur le bassin méditerranéen occidental

---

## Habilitation à Diriger des Recherches

Université Toulouse III Paul Sabatier - Sciences De l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace  
*Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales*

Autrice : **Cindy Lebeau**pin Brossier

Soutenue le 4 avril 2024 au **Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM, UMR3589)**,  
Université de Toulouse, Météo-France, CNRS  
42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse cedex, France

---

## Résumé

Ce mémoire synthétise les travaux de l'autrice sur l'étude des épisodes de précipitations intenses en région méditerranéenne et l'analyse du rôle de la mer Méditerranée. Le développement de plusieurs outils de modélisation couplée a permis de mettre en évidence le rôle complexe du contenu de chaleur, de la stratification et de la dynamique superficielle de la Méditerranée sur ces épisodes, et plus généralement d'améliorer la représentation des processus d'interactions air-mer dans les modèles et l'analyse des effets couplés sur les phénomènes météorologiques à enjeux. Le contexte et les perspectives de modélisation couplée à fine-échelle et les progrès envisagés et enjeux pour la prévision numérique du temps sont également présentés dans ce manuscrit.

---

**Mots clés :** interactions air-mer ; Méditerranée ; modélisation numérique couplée ; simulations à haute-résolution ; systèmes précipitants