

SUJET DE THESE

Sujet de thèse : Propagation des incertitudes dans le système couplé océan-atmosphère à échelle kilométrique

Encadrants:

François Bouttier (francois.bouttier@meteo.fr, tél. 05 76 07 98 25)

Cindy Lebeau-pin Brossier (cindy.lebeau-pin-brossier@meteo.fr, tél. 05 61 07 90 39)

Laboratoire: équipe GMME/PRECIP, CNRM, Météo-France et CNRS (42 Av Coriolis 31057 Toulouse)

Etudiant(e): non encore identifié

Financement: non encore identifié

Sujet de la thèse:

Cette thèse étudie la prévision d'ensemble dans le système couplé AROME/NEMO, comme outil simulant la propagation des erreurs à l'interface atmosphère-océan, pour (1) comprendre les processus physiques en jeu, et (2) étudier le potentiel d'un futur système de prévision probabiliste intégré.

1. Contexte: les interactions physiques mutuelles entre atmosphère et océan sont importantes pour l'étude et la prévision de plusieurs phénomènes des moyennes latitudes aussi divers que les précipitations intenses méditerranéennes (Rainaud et al 2017 ; Meroni et al 2018), les brises côtières (Sweeney et al 2014) et le temps sensible en zone insulaire ou côtière (Pullen et al 2017), le brouillard (Fallmann et al 2019), les nuages (Leahy et al 2013), les tempêtes (Ricchi et al 2017 ; Mogensen et al 2018). Le couplage d'un modèle océanique à un modèle de prévision du temps permet notamment de représenter les structures de fine échelle (tourbillons), le contenu thermique de la couche superficielle (combinant la température de la couche et son épaisseur), la stratification et leurs évolutions interactives à l'échelle intra-diurne et permet une meilleure représentation des interactions à l'interface air-mer.

Le couplage océan-atmosphère pour la prévision constitue un point d'étape important dans la construction d'un système de prévision intégrée à Météo-France. On s'intéresse ici à la simulation numérique du système couplé océan-atmosphère à des échéances de quelques heures à quelques jours, à une résolution horizontale de l'ordre du kilomètre. Un nouveau système de prévision couplant les modèles d'atmosphère AROME et d'océan NEMO ouvre en 2021 de nouvelles possibilités d'étude du comportement de ce système couplé, avec un réalisme sans précédent des phénomènes sensibles à ce couplage.

La qualité de telles simulations restera cependant limitée par les lacunes des systèmes d'observation initialisant les modèles numériques, la résolution des calculs, et les approximations dans la représentation des processus physiques. Dans de tels modèles, seule une partie des phénomènes simulés a une valeur prédictive, qu'il faut séparer du bruit lié aux erreurs de prévisions. Cette séparation est rendue possible par une technique de simulation des erreurs appelée prévision d'ensemble (PE): elle consiste à injecter des perturbations quasi-aléatoires dans les modèles utilisés,

ce qui produit des ensembles de simulations parallèles dont la dispersion est révélatrice de la croissance des erreurs au cours des simulations. La prévision d'ensemble est 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).

2. Intérêt du sujet:

Le sujet proposé est novateur par son utilisation d'un nouvel outil de simulation couplé océan-atmosphère à très haute résolution, ainsi que par l'application de techniques de prévision d'ensemble en mode couplé.

Etudier la réaction d'un tel système à des perturbations représentatives des erreurs de prévision, va permettre d'analyser comment les incertitudes se propagent entre les systèmes Océan et Atmosphère. Par exemple, comment les variations à petite échelle de la température de surface de la mer perturbent-elles l'évolution de la couche limite atmosphérique, et modifient-elles la couverture nuageuse et les champs de précipitations ? Inversement, les incertitudes dans la prévision des brises côtières modifient les circulations marines locales, ce qui devrait influencer notamment la formation d'upwelling ou la stratification superficielle. On s'attachera à identifier par les ensembles des situations où la dispersion de l'ensemble couplé océan-atmosphère s'amplifie rapidement au fil du temps, ce qui permettra d'identifier les processus-types en jeu et de tester si l'interactivité du couplage a ou non un impact important sur les prévisions. On se focalisera sur un petit nombre de situations météorologiques a priori intéressantes car connues pour être à la fois sensibles et impactantes: épisode de pluies méditerranéennes intenses, brise thermique diurne, et développement de brouillard ou de nuage bas côtiers.

Les processus ciblés sont particulièrement significatifs pour les populations de l'arc méditerranéen, puisqu'il s'agit de mieux prévoir les pluies méditerranéennes intenses, les structures de vent importantes pour la qualité de l'air côtier, ainsi que la température et l'ensoleillement sur le littoral. Ces phénomènes sont fréquemment impactants sur la zone du Roussillon, respectivement par leurs conséquences en terme de crues rapides, de prévision de la qualité de l'air urbain, de tourisme.

Le test en vraie grandeur d'un ensemble couplé océan-atmosphère permettra en outre de caractériser l'apport pour les prévisions d'un tel système ainsi que d'anticiper les difficultés à le régler (par exemple, quelle amplitude donner aux différents types de perturbations), ce qui aidera à définir une stratégie pour son déploiement futur en prévision opérationnelle en temps réel à l'horizon 2024.

3. Méthodologie concernant les modèles numériques:

La thèse proposée s'inscrit dans le projet transverse du CNRM sur la mise au point d'un « système Terre » à échelle kilométrique pour la prévision numérique du temps (PNT). Elle bénéficiera d'un stage ayant configuré le modèle océanique (domaine, options physiques, conditions initiales et aux limites) qui sera couplé au système opérationnel de PNT AROME-France (1.3 km de résolution), dans la poursuite des travaux de couplage de Rainaud et al. (2017) et Sauvage (2019). Cette configuration du modèle NEMO (FRA36) sera largement déclinée du prochain système régional (eIBI) de Mercator Océan International (MOI) couvrant les façades maritimes de la France métropolitaine et dont la résolution est de $1/36^\circ$ (~2.5km), mais avec un domaine plus restreint pour être contenu dans le domaine AROME-France. Au début de la thèse, des validations auront été conduites sur l'initialisation au moyen d'expériences numériques océaniques forcées, afin principalement d'évaluer l'apport des champs instantanés d'eIBI par rapport aux moyennes quotidiennes d'eIBI ou aux analyses quotidiennes du système global (PSY4, $1/12^\circ$) de MOI pour

différents cas d'étude pendant lesquels les interactions océan-atmosphère jouent un rôle important. Ce travail doit ainsi permettre une première identification de potentielles sources d'incertitudes pour les futures prévisions couplées.

Au début de la thèse, le couplage de la configuration NEMO-FRA36 avec AROME-France par l'interface de couplage SURFEX-OASIS (Voltaire et al 2017) sera finalisé. Ce développement sera largement avancé en 2021 grâce aux derniers travaux de portage du système couplé (AROME/SURFEX-OASIS-NEMO/XIOS) sur le nouveau HPC de Météo-France et son utilisation sera facilitée de par son insertion dans l'environnement Olive/Vortex (collab. MOI, CNRM/GMAP, CNRM/GMME, LACy).

4. Méthodologie concernant la prévision d'ensemble

La partie atmosphérique sera dans une configuration très proche du système PE AROME de MF (Bouttier et al 2016) au début 2021: 16 membres AROME-France à résolution 1,3km, perturbés dans leur forçage de grande échelle (par l'ensemble global PEARP), leurs conditions initiales (par une assimilation d'ensemble AROME), les équations du modèle (schéma physique stochastique SPPT complété par des perturbations de paramètres), et les conditions de surfaces continentales. Les perturbations stochastiques de surface marine (autour d'une température de surface fixe) utilisées opérationnellement par AROME serviront de référence, par rapport à un couplage avec un ensemble de champs d'eIBI.

La partie océanique sera reconfigurée en 16 membres NEMO munis de perturbations ensemblistes assez simples: perturbation des conditions initiales en utilisant des analyses de provenances multiples, et perturbation de l'équation d'état et de paramètres de NEMO pour représenter sommairement ses incertitudes de modélisation. Une partie des modules correspondants a été développée dans la communauté NEMO, bien qu'ils n'aient pas encore été utilisés pour effectuer des prévisions d'ensembles temps réel, il sera intéressant de les récupérer pour les adapter aux besoins spécifiques de la thèse. Un acquis sur les modes de perturbation du modèle NEMO a été décrit dans Brankart et al (2015).

La validation des champs prévus par les simulations de l'ensemble AROME+NEMO reposera dans un premier temps sur des comparaisons entre différentes configurations de l'ensemble, puis sur des comparaisons modèle-observation à l'aide d'outils de validation ensemblistes propres à l'équipe: calcul de scores probabilistes (notamment "fiabilité" statistique c-à-d cohérence entre dispersion des paramètres prévus et erreur des prévisions) et post-traitements filtrant les petites échelles non-prévisibles dans l'atmosphère et l'océan, afin d'éviter les problèmes de "double peine" liés aux très hautes résolutions de calcul mises en oeuvre.

5. Méthodologie d'étude des propagations d'erreurs

Le coeur de la thèse consistera à comparer entre elles différentes configurations des prévisions d'ensemble AROME+NEMO, la séquence actuellement envisagée est la suivante: sur un petit nombre de cas d'étude,

- validation de l'ensemble NEMO seul (avec atmosphère imposée), pour documenter la croissance d'erreur interne à l'océan;
- comparaison entre une simulation non-perturbée AROME+NEMO, et des ensembles couplés à sens unique océan->atmosphère: (a) (NEMO perturbé)->(AROME non perturbé), (b) (NEMO perturbé)->(AROME perturbé), (c) (AROME seul avec perturbations non-

physiques de la surface océanique) : ceci permettra d'identifier les processus de propagation des erreurs de l'océan vers l'atmosphère, et de quantifier s'ils modifient de manière non-négligeable un ensemble purement atmosphérique.

- travail inverse avec un système couplé à sens unique atmosphère->océan, afin d'identifier de même les processus de propagation vers l'océan.
- comparaison de 3 configurations de l'ensemble couplé interactif océan<->atmosphère, où l'on ne perturbe que l'un des 2 compartiments, puis les 2 à la fois. Ceci permettra d'étudier comment la propagation des erreurs se manifeste dans les processus étroitement couplés entre océan et atmosphère. La littérature suggère que c'est notamment possible en situations de brises, de brouillard ou de couverture en nuages bas. On utilisera des cas d'étude où un impact significatif sur ces phénomènes météorologiques est attendu.

On réfléchira aussi à des cas de sensibilité purement océanique à des variations du forçage atmosphérique, bien que la priorité de la thèse ira a priori à l'identification d'impacts sur la météorologie côtière en métropole. Si l'opportunité se présente, on envisagera une application des outils de la thèse à la simulation de cyclones tropicaux, en collaboration avec le laboratoire LACY.

Des expériences complémentaires seront menées pour caractériser le rôle spécifique de l'interface océan/atmosphère dans la propagation des erreurs, notamment la fréquence de couplage, la prise en compte des vagues et les incertitudes sur les paramétrisations des flux.

Ensuite, on effectuera des études de sensibilité plus poussées permettant de critiquer et d'optimiser les sources de perturbations utilisées, notamment en termes de contributions relatives aux incertitudes des conditions initiales et des forçages (latéraux et à l'interface océan/atmosphère). Si les ressources calcul le permettent, les études de cas seront complétées par des validations avec des scores objectifs vis à vis d'observations atmosphériques et océaniques.

6. Chronologie des travaux

(à préciser)

7. Environnement de travail, encadrement et collaborations envisagées:

C. Lebeaupin Brossier est une chercheuse expérimentée en modélisation océanique et en couplage océan-atmosphère, notamment sur le sujet des précipitations méditerranéennes intenses (projet collaboratif de recherche HyMeX). Elle a directement encadré et publié des travaux de recherche sur ces thèmes, sur lesquels elle travaillera durant la thèse. En collaboration avec Jonathan Beuvier de Mercator Océan International (MOI), elle a proposé un sujet de stage pour début 2021 sur le "Développement et tests d'initialisation du compartiment océanique pour le futur système couplé AROME-France/NEMO", qui est le modèle numérique central du présent sujet de thèse. Sa proximité avec les experts du modèle NEMO à MOI garantit un fort soutien scientifique et technique sur les aspects océaniques de la thèse.

F. Bouttier, titulaire d'une HDR, est un chercheur expérimenté en modélisation atmosphérique à résolution kilométrique et en prévision d'ensemble. Il a directement encadré et publié des travaux de recherche sur ces thèmes, sur lesquels il travaillera durant la thèse. En collaboration avec les autres spécialistes de la prévision d'ensemble à Météo-France (MF), il a directement développé et conduit diverses études sur le système de prévision d'ensemble PE AROME, qui sera le composant principal de la prévision d'ensemble utilisée dans cette thèse.

Le principal composant technique restant à développer est le module de perturbation ensembliste de NEMO, que l'équipe construira avec le/la doctorant(e) en début de thèse à partir de briques logicielles déjà ébauchées à MOI.

Le/la doctorant(e) sera physiquement hébergé(e) dans la même équipe de recherche que les deux encadrants (CNRM/GMME/PRECIP), et bénéficiera de l'accès au supercalculateur de MF avec un environnement collaboratif fort sur les outils utilisés, ainsi que sur les techniques de prévision d'ensemble et d'étude de processus océan/atmosphère. Ce travail s'inscrit dans un objectif stratégique prioritaire du CNRM visant à munir MF d'un système de modélisation intégrée du système Terre à haute résolution.

La thèse bénéficiera d'interactions avec des collaborations externes préexistantes de l'équipe, notamment avec MOI et la communauté de R&D météorologique européenne ALADIN-HIRLAM. Ce sujet est susceptible d'intéresser plusieurs partenaires externes importants, notamment le LACY (Univ. de La Réunion/CNRS/MF), les autres laboratoires actifs dans le domaine, le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme, et les utilisateurs de produits de simulations numériques à l'interface océan/atmosphère.

Références:

- Bouttier, F., L. Raynaud, O. Nuissier, B. Menetrier, 2016: Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Q J R Meteorol Soc.* , **142**, 390-403. <https://doi.org/10.1002/qj.2622>
- Brankart, J.-M., Candille, G., Garnier, F., Calone, C., Melet, A., Bouttier, P.-A., Brasseur, P., and Verron, J., 2015: A generic approach to explicit simulation of uncertainty in the NEMO ocean model, *Geosci. Model Dev.*, **8**, 1285–1297, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1285-2015>
- Fallmann, J., Lewis, H, Sanchez, JC, Lock, A. 2019 : Impact of high-resolution ocean–atmosphere coupling on fog formation over the North Sea. *Q J R Meteorol Soc.* **145**: 1180– 1201. <https://doi.org/10.1002/qj.3488>
- Leahy, S.M., Kingsford, M.J. and Steinberg, C.R. (2013) Do clouds save the Great Barrier Reef? Satellite imagery elucidates the cloud–SST relationship at the local scale. *PLoS One*, **8**, 70400.
- Meroni, A. N., L. Renault, A. Parodi, and C. Pasquero, 2018: Role of the Oceanic Vertical Thermal Structure in the Modulation of Heavy Precipitations Over the Ligurian Sea. *Pure App. Geophys.*, **175** (11), 4111–4130, <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2002-y> .
- Mogensen, K. S., T. Hewson, S. Keeley, L. Magnusson, 2018: Effects of ocean coupling on weather forecasts. *ECMWF newsletter*, 156, 6-7, <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/156/news/effects-ocean-coupling-weather-forecasts>.
- Pullen, J., R. Caldeira, J. D. Doyle, P. May, and R. Tomé, 2017: Modeling the air-sea feedback system of Madeira Island. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **9** (3), 1641–1664, doi:10.1002/2016MS000861 .
- Rainaud, R., Lebeaupin Brossier, C., Ducrocq, V. and Giordani, H., 2017: High-resolution air–sea coupling impact on two heavy precipitation events in the Western Mediterranean. *Q J R Meteorol Soc.*, **143**: 2448–2462.
- Ricchi, A., Miglietta, M.M., Barbariol, F., Benetazzo, A., Bergamasco, A., Bonaldo, D., Cassardo, C., Falcieri, F.M., Modugno, G., Russo, A., Sclavo, M. and Carniel, S., 2017: Sensitivity of a Mediterranean tropical-like cyclone to different model configurations and coupling strategies. *Atmosphere*, **8**, 92.
- 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. PhD. thesis, University Toulouse III, Paul Sabatier, 194 pp, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02439736>.
- Sweeney, J.K., Chagnon, J.M. and Gray, S.L., 2014: A case study of sea breeze blocking regulated by sea-surface temperature along the English south coast. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14**, 4409–4418. <https://doi.org/10.5194/acp-14-4409-2014>.
- Voldoire, A., Decharme, B., Pianezze, J., Lebeaupin Brossier, C., Sevault, F., Seyfried, L., Garnier, V., Bielli, S., Valcke, S., et al., 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, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4207-2017>
- Wei, M., Rowley, C., Martin, P., Barron, C. N. and Jacobs, G. (2014), The US Navy's RELO ensemble prediction system and its performance in the Gulf of Mexico. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **140**: 1129-1149. doi:10.1002/qj.2199