



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



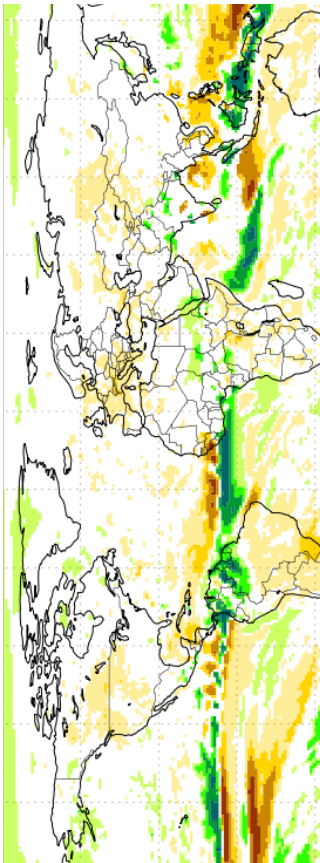
MÉTÉO
FRANCE

COMITÉ SCIENTIFIQUE CONSULTATIF DE MÉTÉO-FRANCE



LA PRÉVISION SAISONNIÈRE ET INFRA-SAISONNIÈRE

Lauriane Batté, CNRM, Météo-France et CNRS, Toulouse, France



Remerciements

L'auteur tient à remercier les collègues ayant contribué à l'élaboration du rapport: Philippe Peyrillé (équipe TROPICS du CNRM), Constantin Ardilouze, Jean-François Guérémy, Damien Specq et Laurent Dorel (équipe Prévision Atmosphérique Saisonnière et TELéconnexions - PASTEL du CNRM), Christian Viel (équipe Analyse et Veille Hydrologique de la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques - DCSC), Jean-Michel Soubeyrou (DCSC), Julie Capo (division Energie du Département Conseil et Services - CS de la Direction des Services Météorologiques - DSM).

Ce rapport a bénéficié des relectures attentives de Marc Pontaud, Samuel Morin et David Salas y Méliá, ainsi que des retours constructifs des rapporteurs Yves Brunet (INRAE) et Pascale Lherminier (IFREMER).

Sommaire

1	Principes de la prévision saisonnière	5
1.1	Qu'est-ce qu'une prévision saisonnière ?	5
1.2	Ingrédients clés d'une prévision	5
1.2.1	Sources de prévisibilité	5
1.2.2	Modèles numériques	6
1.2.3	Prévision d'ensemble	6
1.2.4	Les re-prévisions	7
1.2.5	Des sorties numériques aux applications	8
2	Positionnement de Météo-France sur la thématique	9
2.1	Un acteur établi et reconnu en prévision saisonnière	10
2.2	La prévision saisonnière dans la stratégie de Météo-France	10
2.3	Le programme Copernicus Climate Change Services	12
2.4	L'échelle "S2S": une dichotomie assumée	14
2.4.1	Implication dans le projet S2S	14
2.4.2	Conséquences du positionnement sur la thématique	14
2.4.3	Implication de Météo-France dans des projets institutionnels liés à S2S	15
3	Avancées et prospectives des travaux de recherche	17
3.1	Sources de prévisibilité et leur modélisation	17
3.1.1	Surfaces continentales	17
3.1.2	Océan et glace de mer	19
3.1.3	Représentation des modes de variabilité et téléconnexions	21
3.2	Conception et évaluation des systèmes de prévision	23
3.2.1	Choix de modélisation	23
3.2.2	Initialisation et génération d'ensembles	26
3.2.3	Evaluation des ensembles et cas d'étude	28
3.2.4	Approches de calibration et combinaison des ensembles de prévision	29

4	Quelles applications pour la prévision saisonnière et S2S ?	32
4.1	Les services climatiques à ces échelles à Météo-France	32
4.1.1	Services climatiques institutionnels	32
4.1.2	Applications sectorielles	35
4.1.3	Valorisation commerciale des services climatiques	37
4.2	Prospective d'évolution de ces services climatiques	37
5	Conclusion et perspectives	38
5.1	Verrous et défis à relever	38
5.1.1	Limites des applications en métropole liées à une plus faible prévisi- bilité	38
5.1.2	Fournir une information fiable et adaptée aux échéances	39
5.1.3	Coordonner la recherche et les services autour de l'échelle infra- saisonnière	39
5.2	Opportunités	40

Introduction

La prévision saisonnière consiste à prévoir pour les trois à six mois à venir les tendances de paramètres météorologiques. L'appellation « prévision saisonnière » est trompeuse : on s'attend à une information sur la chronologie d'événements météorologiques au cours de la saison, alors que la nature chaotique de l'atmosphère la rend impossible à fournir au-delà de deux ou trois semaines maximum. L'information d'une prévision saisonnière sera probabiliste, le plus souvent sous forme d'indices intégrés sur une fenêtre mensuelle ou trimestrielle. La principale source de prévisibilité à cette échelle provient des régions tropicales, où la variabilité de l'atmosphère est moins chaotique. Le phénomène El Niño - Southern Oscillation (ENSO) est ainsi prévisible à des niveaux proches des corrélations de la prévision numérique du temps jusqu'à 6 à 12 mois d'échéance, selon le mois d'initialisation. Ce phénomène impacte la variabilité des températures, précipitations et de la circulation atmosphérique sur la bande tropicale, mais également aux moyennes latitudes. Sur ces régions, la prévisibilité est plus faible, mais les travaux de recherche ont permis d'identifier des processus clés à inclure dans les modèles dynamiques pour permettre aux systèmes de prévision saisonnière de progresser.

Le domaine d'activité a connu ces dix dernières années un essor considérable à la fois en termes de moyens mis en œuvre et de rayonnement international. En Europe, l'émergence de nouveaux services climatiques autour de la prévision saisonnière, appuyée par le programme Copernicus Climate Change Services (C3S), a impulsé des changements majeurs. L'utilisation des prévisions saisonnières reste limitée par certains facteurs : outre la faible prévisibilité intrinsèque sur les moyennes latitudes, le niveau restreint des performances des systèmes de prévision et l'inadéquation de l'information fournie avec les besoins d'utilisateurs potentiels peuvent être un frein majeur au développement de services (Gerlak et al., 2020). Des prototypes de services utilisant la prévision saisonnière, comme ceux développés pendant le projet FP7 EUPORIAS (2013-2018), ont été riches en enseignements sur la nécessaire co-construction de tels services (Buontempo et al., 2018).

Jusqu'à peu délaissée, la fenêtre temporelle entre deux semaines et deux mois, appelée Subseasonal-to-Seasonal (S2S) ou infra-saisonnière, suscite un engouement marqué comme en témoignent les projets S2S de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) (Vitart et al., 2012) et SubX en Amérique du Nord (Pegion et al., 2019). Toutefois, si les prévisions S2S présentent l'avantage de renouer partiellement avec une chronologie qui fait défaut aux prévisions saisonnières, leurs performances évaluées sur une vingtaine d'années sont du même ordre, voire légèrement en-deçà, de celles-ci. Ainsi, la performance mesurée par la corrélation des anomalies d'une variable de la seconde quinzaine du mois est souvent du même ordre que celle de la moyenne trimestrielle. Les prévisionnistes s'appuient alors sur l'existence de "fenêtres d'opportunité" (voir encadré de la partie 1.2.1) (Mariotti et al., 2020) pendant lesquelles la variable d'intérêt sera, du fait de phénomènes plus anticipables, mieux prévue.

A Météo-France, la production numérique opérationnelle sépare clairement les échelles de la prévision numérique du temps (jusqu'à cinq jours) de la prévision à l'échelle saisonnière produite dans le cadre du programme C3S (échelle d'un à sept mois). La fourni-

ture de services météorologiques et climatiques aux échelles intermédiaires (moyenne échéance jusqu'à quinze jours, et échelle infra-saisonnière) s'appuie sur les prévisions du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). La participation de Météo-France au projet S2S repose sur le système de prévision saisonnière développé au sein de l'équipe Prévisions Atmosphériques Saisonnières et TELéconnexions (PASTEL) du Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat (GMGEC) du CNRM. Nous reviendrons plus en détail sur les implications de ce positionnement dans la partie 2.4 de ce rapport.

Avant d'aborder le cœur du rapport, la partie 1 présente les principes généraux de la prévision saisonnière et précise la terminologie employée par la suite. On décrira ensuite plus précisément le positionnement de l'établissement sur la thématique dans la partie 2. L'objectif principal de ce rapport est de présenter un panorama de l'état des connaissances scientifiques, des travaux de recherche sur la prévision à ces échelles dans l'établissement (partie 3), ainsi que les différentes applications à Météo-France (partie 4). On détaillera pour les différents axes les perspectives envisagées à horizon des cinq prochaines années.

1 Principes de la prévision saisonnière

1.1 Qu'est-ce qu'une prévision saisonnière ?

Un public averti sait pertinemment que les limites de prévisibilité météorologique se situent typiquement autour de la quinzaine de jours. Que peut-on alors entendre par "prévision saisonnière" ? Au lieu de prévoir précisément une suite temporelle de phénomènes météorologiques, ce qu'on appelle "prévision saisonnière" consiste plutôt à informer sur les statistiques du temps sensible (moyenne, dispersion) sur une fenêtre temporelle donnée. Ainsi, la prévision saisonnière s'attachera le plus souvent à fournir des tendances pour une fenêtre de trois mois à venir, voire, lorsque la prévisibilité le permet, une variabilité sur des fenêtres mensuelles. La prévision infra-saisonnière ou sub-saisonnière (S2S) s'intéressera plutôt aux statistiques hebdomadaires ou bihebdomadaires sur une fenêtre allant de quinze jours à deux mois. L'étude de Merryfield et al. (2020) (dont deux chercheurs du CNRM sont co-auteurs) présente une revue récente de l'état de l'art des recherches sur ces échéances de prévision.

1.2 Ingrédients clés d'une prévision

Nous définirons ici la terminologie relative aux différents ingrédients de la prévision climatique.

1.2.1 Sources de prévisibilité

Difficile d'aborder la prévisibilité du climat sans évoquer les travaux fondateurs de Shukla (1998). Quelques mois après l'un des événements El Niño les plus forts jamais enregistrés, cette étude démontrait l'impact qu'avaient les températures de surface de l'océan (notées SST, pour *Sea Surface Temperature*) sur l'atmosphère dans les tropiques, non seulement en surface, mais aussi en termes de circulation atmosphérique et précipitations.

L'océan tropical, et en particulier les SST sur le Pacifique Equatorial, demeure la principale **source de prévisibilité** à l'échelle saisonnière. Il en existe d'autres. Certaines relèvent de modes de variabilité internes du système climatique, comme l'oscillation de Madden-Julian (Madden et Julian, 1971, MJO) pour les échelles S2S. D'autres sources de prévisibilité proviennent de la persistance de conditions particulières (comme par exemple une humidité du sol anormalement élevée sur une région étendue), ou encore de leur propagation (comme lors d'anomalies dans la stratosphère qui influencent l'évolution de la troposphère, Domeisen et al. (2020)). Enfin, des forçages externes peuvent être source de prévisibilité, comme la concentration de gaz à effet de serre, ou les aérosols.

Ces sources de prévisibilité peuvent induire une prévisibilité locale, mais également sur d'autres régions du globe. On appelle **téléconnexion** le lien entre un phénomène climatique et la variabilité de la circulation atmosphérique de grande échelle, influençant les températures et précipitations sur une région distante (Trenberth et al., 1998). L'utilisation du terme implique l'existence d'un mécanisme physique permettant d'établir une causalité

entre les phénomènes.

La notion de **fenêtre d'opportunité** découle de la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes sources de prévisibilité aux échelles S2S et saisonnières décrits plus haut. Les performances des prévisions à ces échelles fluctuent en fonction de ces phénomènes. L'identification des fenêtres spatio-temporelles pour lesquelles ces prévisions sont en capacité d'apporter une information pertinente avec une confiance accrue est un enjeu majeur pour le développement de services autour de ces échelles.

1.2.2 Modèles numériques

Les prévisions climatiques telles qu'abordées dans ce rapport s'appuient sur des **modèles numériques** représentant les différents compartiments du système climatique. Les premiers exemples de prévisions numériques océan-atmosphère à l'échelle de quelques mois se focalisaient sur la prévision du phénomène ENSO (Cane et al., 1986).

Aujourd'hui, les modèles de prévision climatique à l'état de l'art utilisés par les organismes scientifiques représentent l'océan, l'atmosphère, mais également les surfaces continentales et la cryosphère terrestre et marine, afin de bénéficier au mieux des sources de prévisibilité citées dans le paragraphe précédent.

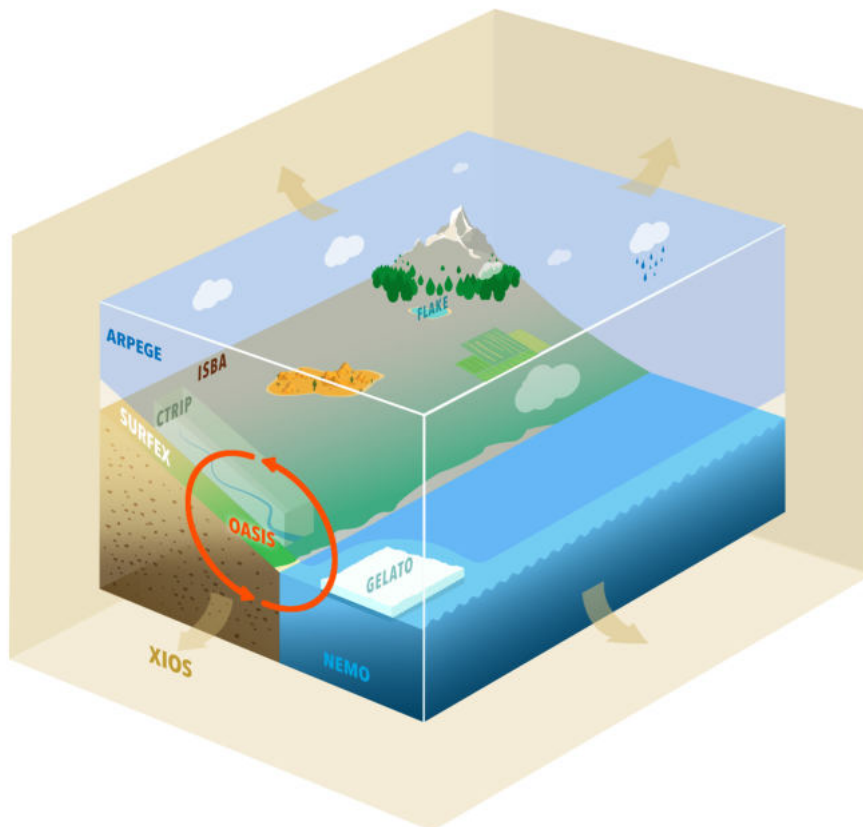
La figure 1 reprend un schéma de principe du modèle de climat couplé CNRM-CM développé au CNRM et au CERFACS, et utilisé en prévision saisonnière à Météo-France.

Par la suite, le terme "modèle" désignera indifféremment une composante spécifique du système climatique (atmosphère, océan, surfaces continentales...) ou le modèle de climat dans son ensemble.

1.2.3 Prévision d'ensemble

Comme précisé précédemment, la nature chaotique de l'atmosphère rend nécessaire une approche probabiliste pour la prévision numérique. Cette approche probabiliste est assurée par une **prévision d'ensemble**: pour chaque prévision, un ensemble de plusieurs intégrations de l'évolution climatique sur une même période, appelées **membres**, est réalisé dans le but d'évaluer l'incertitude qu'on peut y associer. Cette incertitude provient non seulement de l'inexacte connaissance de l'état initial du système climatique au moment du démarrage de la prévision, mais également des incertitudes liées à la formulation et aux paramètres des modèles numériques utilisés. Plusieurs méthodes existent pour prendre en compte ces incertitudes, dont les perturbations stochastiques et l'approche multi-modèle décrites plus loin.

On entend généralement par **système de prévision** la chaîne de production comprenant la stratégie d'initialisation, les simulations numériques d'ensemble, et les post-traitements permettant d'obtenir des sorties numériques de prévision saisonnière.



CNRM-CM

Figure 1: Schéma du modèle couplé de climat CNRM-CM6, source: Voltaire et al. (2019). Les noms désignent les modèles des différentes composantes des enveloppes fluides représentées, ainsi que le logiciel de couplage (OASIS) et la bibliothèque de gestion des entrées/sorties de ces modèles (XIOS).

1.2.4 Les re-prévisions

Au-delà des échéances de la prévision numérique déterministe, les systèmes de prévision tendent à s'écarter de l'état initial (tenant compte des observations) et dériver vers un attracteur proche de l'équilibre du modèle couplé intégré sur des centaines d'années.

De plus, l'initialisation de la prévision consistant à relâcher une contrainte sur le système couplé (comme on pourrait relâcher un ressort qu'on a comprimé vers une longueur fixée), des chocs peuvent apparaître dans les premiers pas de temps, heures, semaines, et mois de prévision, suivant la variable considérée.

Ces deux facteurs, complexes à distinguer l'un de l'autre, induisent des erreurs dans les prévisions climatiques dont il faut tenir compte afin d'en extraire une information utile, et qui le plus souvent empêchent l'utilisation des sorties brutes des prévisions.

Afin de mettre en œuvre des méthodes de correction et de calibration *a posteriori* des prévisions en temps réel, on réalise sur une période passée, typiquement de l'ordre de

vingt ou trente ans, des simulations appelées **re-prévisions**.

Ces re-prévisions permettent également d'évaluer la qualité du système de prévision sur un ensemble de saisons ou événements passés pour lesquels on dispose de données de référence (réanalyses, données d'observation spatialisées...), et donc la possibilité de calculer des scores quantifiant la performance du système.

1.2.5 Des sorties numériques aux applications

Par applications de la prévision saisonnière ou S2S, on entend l'ensemble des services allant de la préparation des bulletins "grand public" aux activités de conseil aux entreprises météo-sensibles pour lesquelles les échéances infra-saisonnière et saisonnière sont particulièrement pertinentes.

Ces travaux nécessitent de replacer les prévisions numériques dans un contexte plus général: compréhension des facteurs pouvant entraîner une prévisibilité accrue ou au contraire plus faible pour la période à venir, post-traitement et correction statistique des sorties numériques, approches de combinaisons multi-modèles et utilisation de "benchmarks" statistiques.

Selon l'utilisation des prévisions, celles-ci peuvent procurer les forçages numériques d'autres modèles numériques utilisés en aval, comme pour les applications en hydrologie.

2 Positionnement de Météo-France sur la thématique

Cette partie décrit l'organisation de Météo-France autour des thématiques de prévision saisonnière et infra-saisonnière. La figure 2 résume les étapes clés du développement de ces thématiques qui sont développées dans ce qui suit. La prévision saisonnière est une activité ancrée historiquement au CNRM depuis les années 1980. La prévision S2S est apparue beaucoup plus récemment, et nous détaillerons le positionnement actuel de Météo-France sur cette échelle dans la partie 2.4.

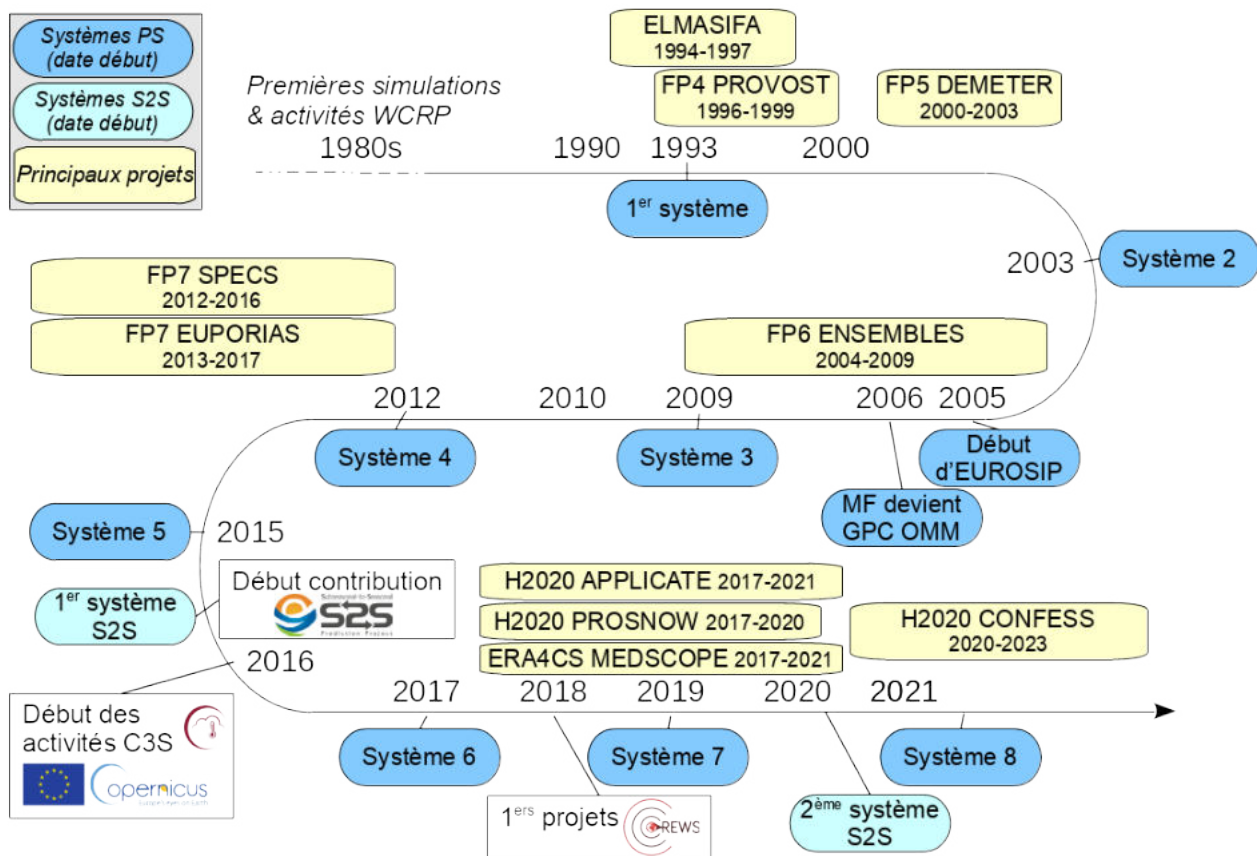


Figure 2: Chronologie répertoriant les principales étapes du développement de la prévision saisonnière et S2S à Météo-France, les systèmes de prévision consécutifs, ainsi que les projets de recherche majeurs en lien avec la thématique auxquels l'établissement a participé.

2.1 Un acteur établi et reconnu en prévision saisonnière

Dans la foulée des projets européens ELMASIFA (programme Avicenne, 1994-1997) et FP4 PROVOST (1996-1999), Météo-France s'est engagé depuis la fin des années 1990 dans la production en temps réel de prévisions saisonnières, diffusées sous forme d'un bulletin à quatre mois d'échéance sur le site Internet de l'établissement. Ces prévisions étaient des simulations d'ARPEGE forcées par une persistance des anomalies de température de surface de l'océan. Suite au projet européen FP5 DEMETER (2000-2003), Météo-France a mis en œuvre son premier système de prévisions couplées océan-atmosphère (Système 2). Dans le cadre du consortium EUROSIP piloté par le CEPMMT, des prévisions de modèles du CNRM, du CEPMMT et du Met-Office, rejoints par la suite par le National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Etats-Unis) et le Japan Meteorological Agency (JMA), étaient post-traitées et diffusées tous les mois sur le site du CEPMMT pour les principales variables atmosphériques d'intérêt à cette échelle (précipitation, température de surface, SST, circulation atmosphérique).

La mise en place à partir de 2015 du programme Copernicus Climate Change Services, qui comprend une composante prévision saisonnière, a permis de standardiser et d'étendre cette production. EUROSIP a cessé ses activités en 2019 avec l'intégration de tous les systèmes de prévision (NCEP et JMA compris) dans la plateforme C3S. Nous reviendrons plus en détail sur les implications de C3S pour l'établissement dans la partie 2.3.

Météo-France remplit des fonctions auprès de l'OMM liées à la prévision saisonnière: l'établissement est l'un des producteurs désignés de prévision saisonnière (Global Producing Center), et a la responsabilité du nœud prévision saisonnière du centre climatique régional (Regional Climate Center) de la zone VI (Europe). Toujours dans le cadre des activités liées à l'OMM, l'établissement participe activement à plusieurs forums climatiques régionaux (RCOF, pour Regional Climate Outlook Forum) sur les régions concernant la métropole et les territoires d'outre-mer. Nous les détaillerons dans la partie 4.1.1. Par ailleurs, l'auteur de ce rapport fait partie depuis 2019 du Working Group on Subseasonal to Interdecadal Prediction (WGSIP), groupe de travail du World Climate Research Programme (WCRP), preuve de l'expertise du CNRM en matière de prévision à l'échelle saisonnière.

2.2 La prévision saisonnière dans la stratégie de Météo-France

La prévision saisonnière est un domaine bien identifié dans la stratégie scientifique de Météo-France, ainsi que les perspectives successives du CNRM évaluées par le HCERES. Un des objectifs du Contrat d'Objectifs et de Performance en cours est de "Innover pour maintenir les systèmes de prévision numérique du temps et de projection climatique au meilleur niveau international et réaliser les simulations en amont des services climatiques". Il est précisé qu'un des moyens de remplir cet objectif est de "poursuivre l'amélioration des systèmes de prévision saisonnière". A Météo-France, ces systèmes s'appuient notamment sur le modèle couplé de climat CNRM-CM.

Les activités de recherche et la production des prévisions numériques à l'échelle saisonnière sont portées par l'équipe PASTEL du CNRM, qui comporte quatre chercheurs et un

ingénieur permanents et plusieurs agents contractuels (actuellement, deux post-doctorants et une doctorante). Cette équipe a donc la particularité d'avoir une production opérationnelle dans ses activités. Le rythme de production (deux dates principales de démarrage à la fin du mois) et les délais de fourniture des prévisions au CEPMMT ont permis à l'équipe d'assurer cette activité sans accroc depuis les années 2000. La surveillance de la chaîne de prévision repose sur un ingénieur, secondé par un chercheur en cas d'indisponibilité (congés). En incluant la production des re-prévisions, la conception des systèmes de prévision et les validations préalables à un changement de système, l'activité directement liée à la production pour C3S peut être estimée à 1,5 équivalent temps plein (ETP) environ depuis 2016. L'équipe PASTEL s'appuie sur le GMGEC pour le développement et l'amélioration du modèle couplé CNRM-CM, et des collaborations externes (notamment Mercator Ocean International pour les réanalyses et analyses océaniques).

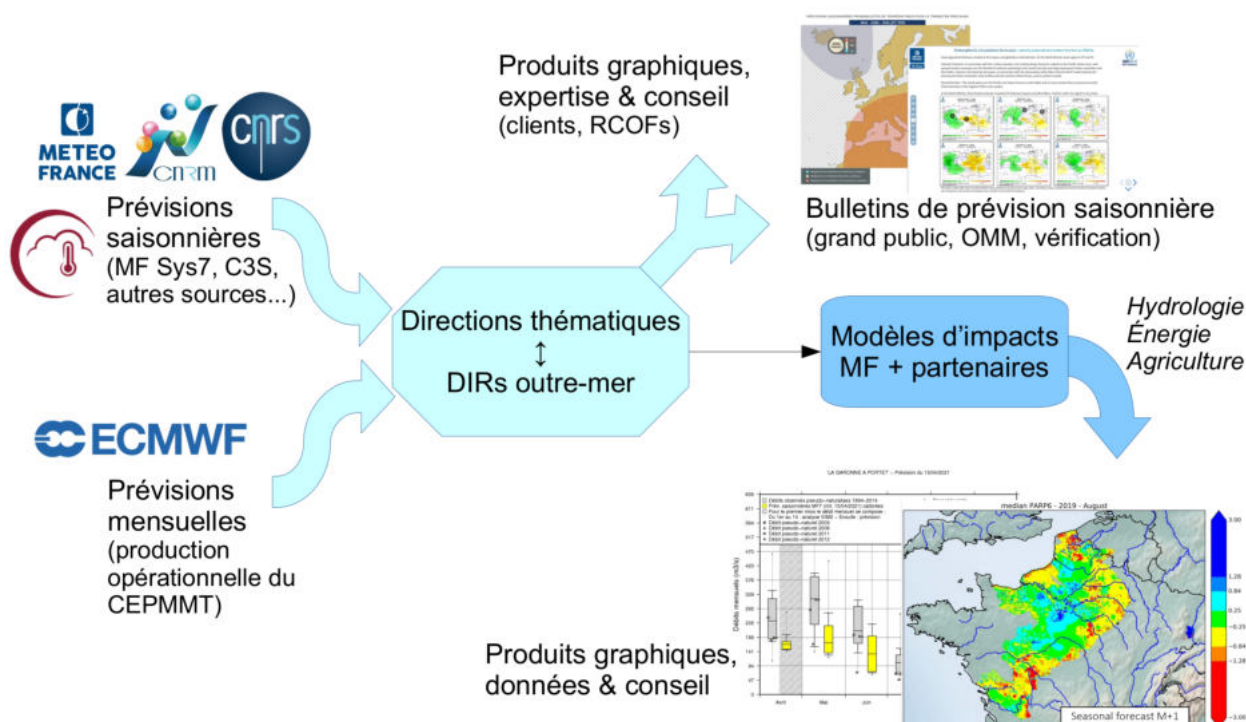


Figure 3: Schéma d'organisation des services utilisant les prévisions saisonnières et infra-saisonnières à Météo-France

Les services exploitant la prévision saisonnière (figure 3) sont principalement développés et produits par la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques (DCSC). L'équipe Analyse et Veille Hydrologique (AVH) est en charge de l'élaboration du bulletin de prévision saisonnière de Météo-France. En plus des services sectoriels décrits dans la partie 4, Météo-France tient un rôle de conseil sur l'échelle saisonnière en tant qu'opérateur de l'Etat, et la DCSC est sollicitée à ce titre sur un certain nombre d'enjeux récurrents (risques de sécheresse, de vagues de chaleur) et ponctuels (par exemple, évaluer le risque d'avoir une saison plus froide pouvant induire des problèmes d'approvisionnement en électricité

si plusieurs centrales nucléaires sont arrêtées pour maintenance). Ces activités mobilisent actuellement environ 3 ETP. Certains services sectoriels comme ceux liés à la demande énergétique se sont développés à la Direction des Services Météorologiques (DSM), notamment dans le cadre du programme C3S. Les directions d'outre-mer ont également mis en place des bulletins et services spécifiques à leur région d'intérêt.

2.3 Le programme Copernicus Climate Change Services

Le programme Copernicus Climate Change Services (C3S) a eu un rôle déterminant dans l'évolution de la prévision saisonnière à Météo-France au cours des six dernières années, tant pour le système de prévision que pour la diversité des produits développés dans les directions en charge des services. C3S est opéré par le CEPMMT par délégation de la Commission Européenne, et remplit ses objectifs en sous-traitant une partie de ses activités dans le cadre de contrats spécifiques.

Deux contrats successifs ont porté sur la fourniture en temps réel de prévisions saisonnières numériques: un premier contrat de 2016 à 2018 s'est d'abord appuyé sur la production pour le consortium EUROSIP pour ensuite passer à une chaîne opérationnelle répondant aux standards édictés par C3S:

- Une résolution atmosphérique horizontale d'au moins 50 km
- Une taille d'ensemble de re-prévisions de 25 membres minimum
- Des données de sortie atmosphériques à fréquence quotidienne au format NetCDF répondant à des exigences de qualité

Dans le cadre d'un deuxième contrat de 2018 à mi-2021, une exigence supplémentaire a été d'augmenter la résolution du modèle d'océan à une résolution équivalente à l'atmosphère. Ceci s'est traduit au CNRM par l'utilisation d'une version à haute résolution du modèle CNRM-CM6 (résolution à 50 km dans l'atmosphère, et au 1/4° pour l'océan).

Parmi les contributeurs contractuels, aux systèmes d'EUROSIP (CEPMMT, Met Office et Météo-France) se sont ajoutés deux nouveaux systèmes opérationnels de prévision saisonnière implémentés au DWD (Allemagne) et au CMCC (Italie). Le multi-modèle s'est ensuite élargi en 2019 pour inclure les contributions bénévoles du NCEP et du JMA. Au total, plus de 400 membres de prévision sont ainsi disponibles chaque mois (le nombre exact variant chaque mois selon le calendrier de production de certains centres contributeurs comme le NCEP, le JMA ou le MetOffice). Les prévisions de ces sept systèmes sont publiées sous la forme de graphiques sur le site https://climate.copernicus.eu/charts/c3s_seasonal/ et les données diffusées sur le portail C3S Climate Data Store (CDS, <https://cds.climate.copernicus.eu/>). Les re-prévisions sur la période 1993-2016 sont également disponibles sur le CDS. La figure 4 montre un exemple de produit graphique multi-systèmes.

Le rythme de mise à jour du système de prévision de Météo-France imposé par les attentes de C3S a été très élevé. Jusqu'en 2015, l'équipe avait développé trois nouveaux systèmes en l'espace de dix ans. Après le passage au Système 6 mi-2017, le Système 7

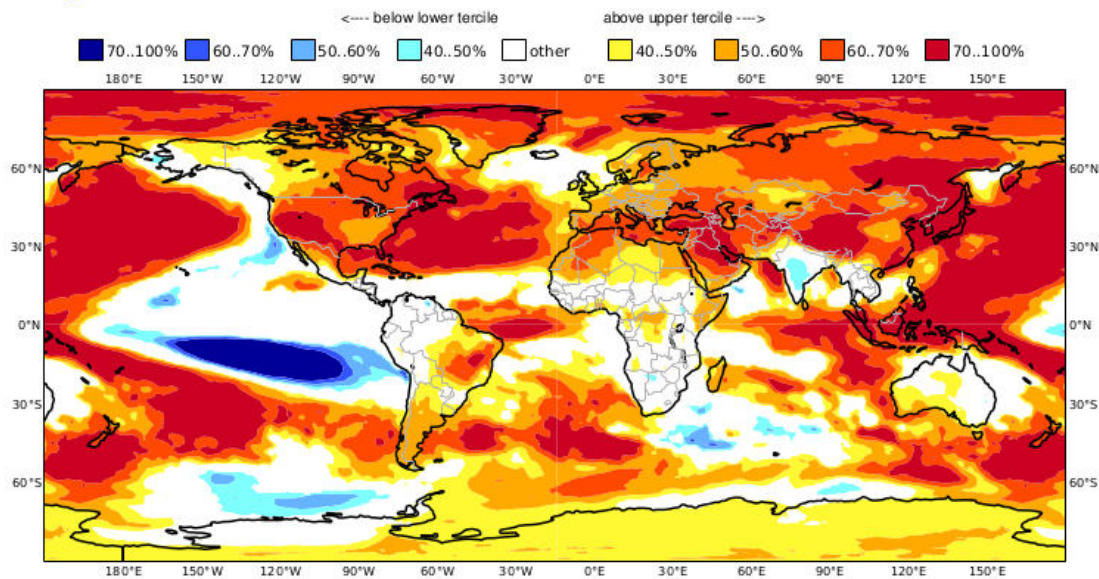


Figure 4: Exemple de graphique produit par C3S à partir des prévisions saisonnières pour la saison de mai à juillet (MJJ) des sept centres contributeurs, initialisées au plus tard le 1^{er} avril. Les plages de couleurs indiquent la probabilité prévue pour le tercile de température à 2m le plus probable. Les régions blanches indiquent soit une région pour laquelle la température prévue est proche des normales, soit une région pour laquelle les modèles divergent sur le scénario à privilégier.

a été lancé à l'automne 2019 et le Système 8 a été défini fin 2020 et passera en production opérationnelle à l'été 2021. Ce rythme a demandé un investissement fort de l'équipe PASTEL en moyens humains et temps de calcul. Cette fréquence de mise à jour a également des conséquences en termes d'activité des équipes en charge des services, notamment pour toutes les applications nécessitant une phase de calibration ou de correction sur la base des re-prévisions.

Les retombées positives de ces contrats sont nombreuses: en particulier, la standardisation de la production de prévision saisonnière a facilité le développement de produits utilisant les sorties de plusieurs modèles producteurs de C3S, intégrés aux bulletins opérationnels et au site <http://seasonal.meteo.fr>. De plus, C3S a permis à Météo-France d'asseoir encore davantage son statut de producteur de prévisions saisonnières vis-à-vis de partenaires nationaux et internationaux.

La deuxième phase du programme C3S démarre en 2021, et Météo-France espère renouveler sa position de producteur opérationnel de prévisions saisonnières. L'établissement a ainsi répondu à l'appel d'offres sur la fourniture de prévisions saisonnières pour les quatre prochaines années. Le rythme de mise à jour du système opérationnel sera

cependant moins élevé qu'auparavant, les principales attentes en termes de qualité et de résolution des modèles étant déjà remplies par le système actuel de prévision.

2.4 L'échelle "S2S": une dichotomie assumée

2.4.1 Implication dans le projet S2S

L'implication de Météo-France dans le projet S2S co-piloté par le WWRP (World Weather Research Programme) et le WCRP (World Climate Research Programme) remonte à 2015, lorsque l'équipe en charge de la prévision saisonnière a été contactée par le CEPMMT afin de contribuer à la base S2S avec ses prévisions en temps réel réalisées pour EUROSIP. L'objectif de ce projet est, à l'instar du projet TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble, Bougeault et al. (2010)) pour la moyenne échéance, de fournir à la communauté une base de données de re-prévisions et prévisions (disponibles trois semaines après le temps réel) afin de nourrir les activités de recherche autour de cette échéance (Vitart et al., 2017).

La disponibilité de ressources de calcul sur le calculateur du CEPMMT a permis de réaliser des re-prévisions à 60 jours d'échéance avec le modèle CNRM-CM utilisé pour le Système 5 de prévision saisonnière, opérationnel à l'époque, pour les 1er et 15 de chaque mois sur la période 1993-2015, et de mettre en place une prévision en temps réel lancée tous les quinze jours, puis à fréquence hebdomadaire.

La mise à disposition de données a suscité un engouement international en termes de projets de recherche. Les États-Unis ont par exemple financé un partenariat entre plusieurs laboratoires d'Amérique du Nord autour de la thématique, le projet SubX. En Europe, la plupart des efforts coordonnés de recherche sur la thématique ont porté sur le développement de services (on citera le projet S2S4E focalisé sur les énergies renouvelables). Si ses collaborations autour de cette échelle restent pour l'heure assez restreintes, l'implication de l'équipe PASTEL dans le projet S2S et la réalisation des prévisions lui a permis de développer des activités de recherche, notamment par le biais d'accueil d'étudiants en stage de master ou en doctorat. Les prévisions temps réel ont également fait l'objet de plusieurs cas d'études valorisés dans des publications scientifiques (Ardilouze et al., 2017b; Batté et al., 2018; Domeisen et al., 2021).

2.4.2 Conséquences du positionnement sur la thématique

Le premier système de prévision S2S développé en 2015 s'est appuyé sur le Système 5 pré-existant, tant pour la préparation des conditions initiales et la génération d'ensembles, que pour les exécutable du modèle couplé de climat. Il en résulte un système de prévision souvent sous-optimal pour la courte et moyenne échéance (1-15 jours), mais dont les performances sur la fenêtre cible de 2 à 6 semaines sont à un niveau équivalent à la plupart des systèmes contribuant au projet (hormis le plus souvent le modèle du CEPMMT dont les performances restent au-dessus des autres centres pour la plupart des variables étudiées).

Lors de la mise en place d'un second système en 2020, l'équipe PASTEL du GMGEC s'est appuyée sur la production opérationnelle du Système 7 de prévision saisonnière,

cette fois-ci en concevant les systèmes de manière conjointe. Ainsi, les deux derniers jeudis du mois utilisés en démarrages décalés (*lag-average*) pour la prévision saisonnière correspondent à deux initialisations hebdomadaires du système S2S, qui sont complétées par les autres jeudis "manquants", ceci à la fois pour les re-prévisions et la production en temps réel pour le projet S2S.

Ceci étant, la méthode de dispersion d'ensemble, si elle permet une dispersion suffisante aux échelles saisonnières, n'est pas optimisée pour l'échelle S2S. De même, l'initialisation de la prévision peut générer des chocs initiaux qui dégradent les performances du système au cours de la première semaine. Le système S2S de Météo-France résulte de compromis en termes de coût de calcul, et ne peut donc être considéré comme un système opérationnel à part entière. Dans le cadre du projet S2S, les productions sont regroupées avec des systèmes conçus sur mesure pour cette fenêtre de prévision.

En termes de ressources humaines, l'activité représente environ 0,2 ETP pour le suivi des prévisions en temps réel et les interactions avec l'équipe technique du projet S2S, et entre 1 et 1,25 ETP en activités de recherche dans l'équipe PASTEL, sachant que d'autres chercheurs du CNRM s'intéressent à cette échelle (notamment dans l'équipe TROPICS du Groupe de Météorologie de Moyenne Échelle (GMME)).

En ce qui concerne la production de services à Météo-France, ce sont les prévisions du CEPMMT (dans la continuité des prévisions à moyenne échéance) qui sont utilisées pour couvrir les échelles mensuelles à saisonnières des produits qui les exploitent. De même, les activités à Météo-France relevant de l'initiative CREWS (Climate Risk and Early Warning Systems, <https://www.crews-initiative.org/en/projects>) s'appuient sur les prévisions du CEPMMT pour cette fenêtre temporelle (voir la partie 2.4.3). Même si la production du CNRM pour S2S n'est pas à visée opérationnelle, le suivi graphique des prévisions via un site interne développé en 2019 (cf. figure 5) a permis à des agents des services opérationnels de Météo-France de mieux quantifier les incertitudes de ces prévisions.

2.4.3 Implication de Météo-France dans des projets institutionnels liés à S2S

Actuellement la demande d'information à l'échelle infra-saisonnière est grandissante. C'est notamment le cas dans les régions tropicales où une anticipation d'une dizaine de jours de périodes sèches / humides ou d'événements extrêmes peut avoir un fort enjeu humain, social et financier. Cela s'est traduit par des interventions dans le cadre des projets CREWS Burkina Faso (2018-2020), CREWS Tchad (2020-2022), CREWS Togo (2020-2022), et CREWS Indian Ocean (2020-2022) dans lesquels Météo-France s'est positionné sur le développement de produits de prévision saisonnière et infra-saisonnière intégrant une expertise humaine, notamment en tirant parti de paramètres et mécanismes pouvant être mieux représentés par les modèles S2S que les précipitations, comme les ondes équatoriales et la circulation de grande échelle. Pour ces projets, l'établissement s'appuie sur les prévisions saisonnières de C3S (dont celles de Météo-France), et sur le système de prévision d'ensemble S2S du CEPMMT.

Beaucoup est actuellement fait en terme de produits de prévisions et de méthodologie par l'IRI (International Research Institute for Climate and Society, Université de Columbia)

Produits issus de la Prévion Sub-saisonnière comparaison des systèmes du CNRM et du ECMWF

Suivi hebdomadaire
Prévion du modèle du CNRM
Prévion du modèle du ECMWF - jeudi
Prévion du modèle du ECMWF - lundi
Régimes de temps
MJO
SSW
Archives
Documentation

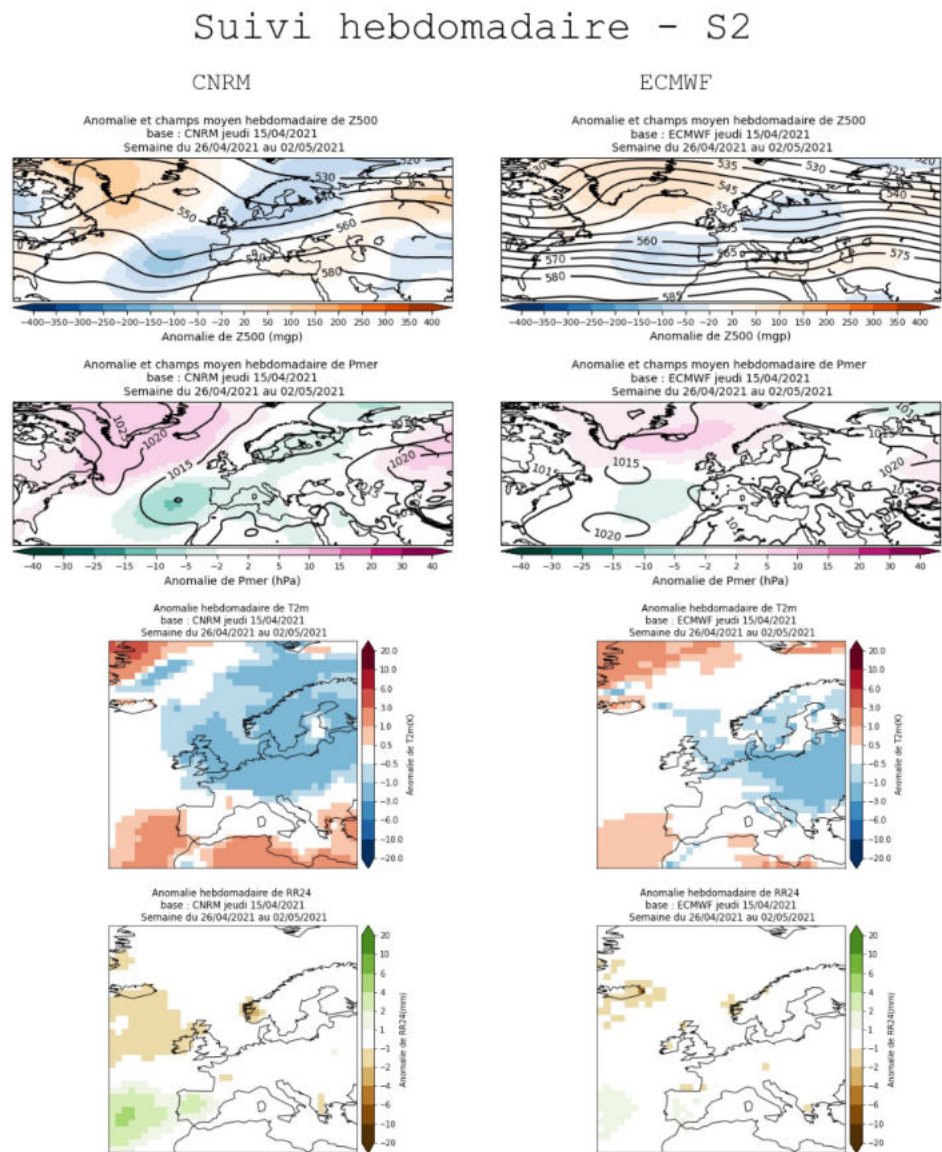


Figure 5: Illustration de produits graphiques de suivi des prévisions disponibles sur un site interne. Les prévisions S2S réalisées au CNRM sont comparées aux prévisions S2S du CEPMMT pour plusieurs champs pertinents (géopotential à 500 hPa, pression au niveau de la mer, température à 2m, précipitations) ainsi que pour des modes de variabilité.

et le CEPMMT sur une base multi-modèle et poussant jusqu'aux produits sur-mesure. Un des atouts de Météo-France est de posséder des compétences fortes à la fois dans les métiers de la prévision synoptique, infra-saisonnière et saisonnière et dans la compréhension des mécanismes physiques en jeu aux différentes échelles.

3 Avancées et perspectives des travaux de recherche

On reprend dans cette partie les différents ingrédients cités dans la partie 1.2 afin de décrire les principaux travaux sur ces aspects et les perspectives associées.

3.1 Sources de prévisibilité et leur modélisation

3.1.1 Surfaces continentales

Bilan L'influence des surfaces continentales, et plus particulièrement de l'humidité du sol, sur la prévisibilité en été a fait l'objet de plusieurs travaux récents au CNRM, notamment dans le cadre d'une thèse de doctorat (Ardilouze, 2019).

L'importance de l'initialisation de l'humidité du sol a été quantifiée dans le cadre d'une étude multi-modèle portée par le CNRM (Ardilouze et al., 2017a). Cette étude a montré qu'on pouvait obtenir une amélioration significative des prévisions de température de surface en été dès lors qu'on initialisait de manière plus réaliste les surfaces continentales en mai, et ce sur des régions identifiées par des travaux antérieurs comme étant soumises à un couplage fort entre l'humidité du sol et l'atmosphère, comme la région des Balkans.

Elle a également permis d'identifier des biais récurrents des modèles utilisés en prévision saisonnière, notamment sur la région des Grandes Plaines d'Amérique du Nord, où on aurait pu s'attendre à des améliorations similaires. Une méthode de correction des flux de précipitations qui pénètrent dans le sol a permis de réduire les biais secs et chauds sur la région, notamment en améliorant la variabilité de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration sur la zone (Ardilouze et al., 2019a).

Pour mieux quantifier le lien entre humidité des sols et précipitations à l'échelle saisonnière, des expériences plus idéalisées ont été menées dans le cadre de projets européens (FP7 SPECS et ERA4CS MEDSCOPE). Dans SPECS, deux jeux de re-prévisions où l'humidité du sol estimée par la réanalyse ERA-Land du CEPMMT était imposée ont été comparés à des expériences où l'humidité du sol pouvait évoluer librement à partir de l'initialisation au 1er mai (Ardilouze et al., 2019b). La figure 6 montre l'influence de l'humidité du sol sur les scores des précipitations sur la saison d'été (JJA) estimée par ce protocole. Les régions en rouge de la figure 6 (c) sont celles pour lesquelles la corrélation des précipitations prévues avec les données d'observation est améliorée lorsque l'humidité du sol est contrainte. L'analyse des expériences a également permis de mettre en exergue les régions d'Europe les plus influencées par les conditions d'humidité du sol, et de préciser le rôle des surfaces continentales pour la bonne prévision des vagues de chaleur de 2003 (en Europe de l'ouest) et 2010 (en Russie occidentale). En effet, d'autres facteurs tels que les conditions de température de surface de la mer et la chronologie des régimes de circulation atmosphérique (chronologie non prévisible à l'échelle de la saison) prédominent dans le cas de l'été 2003, qui est caractérisé par l'occurrence de plusieurs épisodes de vagues de chaleur courtes et intenses. Pour l'événement de 2010, ces simulations confirment le rôle fondamental des surfaces continentales dans l'amplification et la durée de cette vague de chaleur (résultat cohérent avec les travaux de Hauser et al. (2016)).

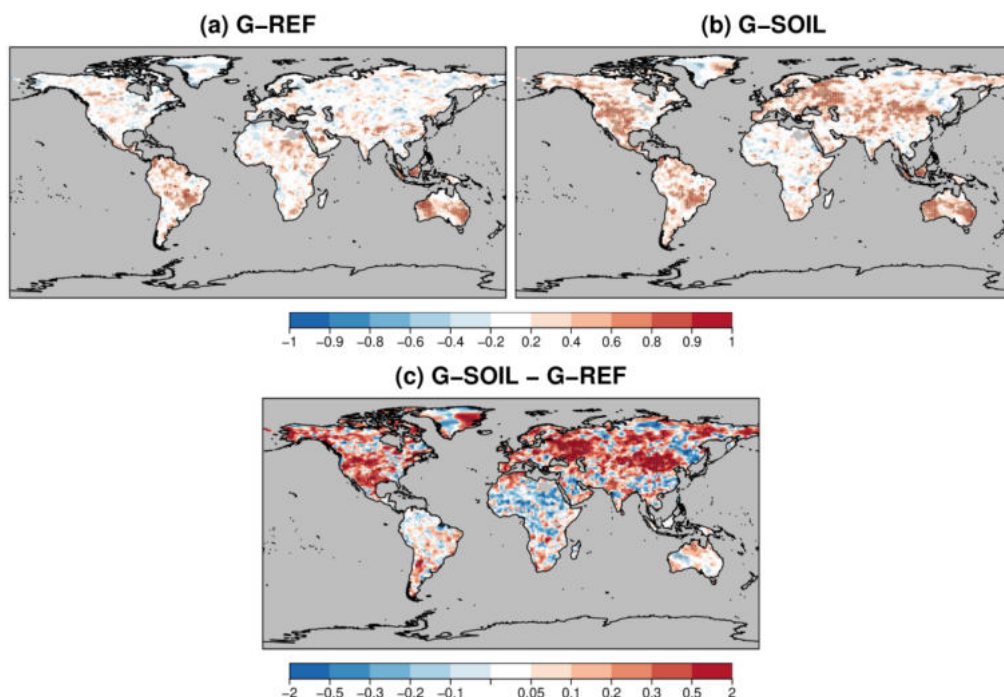


Figure 6: Corrélation des précipitations moyennes des saisons JJA de la période 1993-2012 avec les données GPCC pour des re-prévisions initialisées le 1er mai avec une évolution libre de l'humidité du sol (G-REF, a) et une humidité du sol contrainte vers ERA-Land (G-SOIL, b), et différence de corrélations "G-SOIL - G-REF" (c). Figure adaptée de Ardilouze (2019).

Des expériences dans le cadre du projet ERA4CS MEDSCOPE ont permis de compléter les travaux de thèse de Constantin Ardilouze. De nouvelles expériences multimodèles pour lesquelles l'humidité du sol a été imposée à des valeurs extrêmement sèches et humides sur le bassin Méditerranéen ont approfondi la compréhension du rôle de cette variable sur les précipitations (Ardilouze et al., 2020) et les vagues de chaleur (Materia et al., 2021) sur la région. En effet, ce rôle est difficile à mettre en évidence dans le cadre de re-prévisions en raison du faible rapport signal sur bruit et du peu d'années disponibles.

Perspectives Les perspectives des travaux de ces prochaines années au CNRM sur la thématique sont d'étendre la compréhension des phénomènes à l'origine de prévisibilité à ces échelles au-delà de l'humidité du sol. Les travaux dans le cadre du projet international LS4P (pilote par les programmes S2S et GEWEX, <https://ls4p.geog.ucla.edu/>) s'intéressent aux contributions relatives de l'humidité et de la température des couches superficielles du sol à la prévisibilité du climat à l'échelle infra-saisonnière, non seulement via une rétroaction locale, mais également par l'impact sur la circulation atmosphérique. Dans le cadre du projet H2020 CONFESS qui a débuté fin 2020, on se focalisera sur l'influence d'une meilleure prise en compte de l'utilisation des sols et de la végétation sur la qualité des prévisions, notamment en termes de tendances sur les périodes de re-prévision. L'objectif *in fine* est de tirer parti de jeux d'observations satellites et de données grillées ex-

istantes, afin d'améliorer l'initialisation des prévisions saisonnières produites dans le cadre de C3S. Le défi est de disposer de données globales et aussi homogènes que possibles sur la période de re-prévisions et en temps quasi-réel pour les prévisions, malgré des discontinuités dans les observations satellites. Les travaux du projet H2020 CONFESS se focaliseront sur l'indice foliaire (Leaf Area Index, ou LAI) en utilisant les estimations tirées d'observation satellites d'AVHRR (jusqu'en 2005) et le produit de Copernicus Global Land Service (CGLS-V2-1km) calculé à partir des réflectances de SPOT-VEGETATION (1998-2014) puis PROBA-V (2013-aujourd'hui), ainsi que l'utilisation des sols estimée par les données harmonisées LUH2 (Hurtt et al., 2020). Ils viennent en complément d'un objectif de l'équipe d'investiguer les apports d'une végétation interactive telle qu'intégrée dans le modèle CNRM-ESM2-1 en prévision saisonnière.

L'ensemble de ces travaux s'appuient sur des compétences sur le modèle de surfaces continentales naturelles ISBA-CTRIP de SURFEX développées depuis 2015 au sein de l'équipe PASTEL au GMGEC, mais également des collaborations sur la thématique au sein du laboratoire (équipes Étude Système Terre - EST - du GMGEC, SURFACE du GMME) et à l'international (notamment le CEPMMT, et les CNR-ISAC et CMCC en Italie).

Jusqu'ici, les travaux de l'équipe se sont surtout focalisés sur la saison estivale et le lien entre l'humidité du sol et l'atmosphère, mais l'amélioration de l'initialisation de la neige continentale (étendue et épaisseur) et son impact sur la prévisibilité en hiver (abordés dans le projet MEDSCOPE) font partie des axes à explorer dans les années qui viennent.

3.1.2 Océan et glace de mer

Bilan Si l'ENSO reste la principale source de prévisibilité à l'échelle saisonnière (présentée dans la partie 3.1.3), les travaux au CNRM sur l'océan comme source de prévisibilité ont aussi porté ces dernières années sur les moyennes et hautes latitudes, notamment impulsés par le projet H2020 APPLICATE (2017-2021).

L'étude de re-prévisions avec CNRM-CM6-1 n'a pas permis d'établir de lien statistiquement significatif sur la période 1993-2014 entre l'étendue de glace de mer en Arctique (mers de Barents et Kara, notamment) et l'oscillation Nord-Atlantique. Toutefois, dans un cadre multi-modèle, Acosta-Navarro et al. (2020) ont quantifié à l'aide de régressions linéaires le rôle de la variabilité de la couverture de glace en novembre sur les mers de Barents et Kara dans les scores de prévision de pression de surface, de températures et de précipitations de décembre à février. Ils montrent que plus la corrélation entre l'anomalie de couverture de glace et la pression de surface sur la Russie occidentale est négative, meilleure est la prévision de la pression de surface. Une analyse composite sur les membres de re-prévision suggère que cette téléconnexion est favorisée par des conditions de blocage sur la Scandinavie en novembre.

Dans le cadre d'un stage de master en collaboration avec Mercator Ocean International et l'équipe Interactions Océan Glace Atmosphère (IOGA) du GMGEC, des simulations avec le modèle CNRM-CM ont permis de revisiter l'hypothèse de Duchez et al. (2016) (formulée sur la base de données d'observations et de réanalyse) selon laquelle la vague de chaleur de l'été 2015 en Europe de l'Ouest était principalement pilotée par une zone étendue d'anomalies froides de SST sur l'Atlantique Nord (Souan, 2017). Le mod-

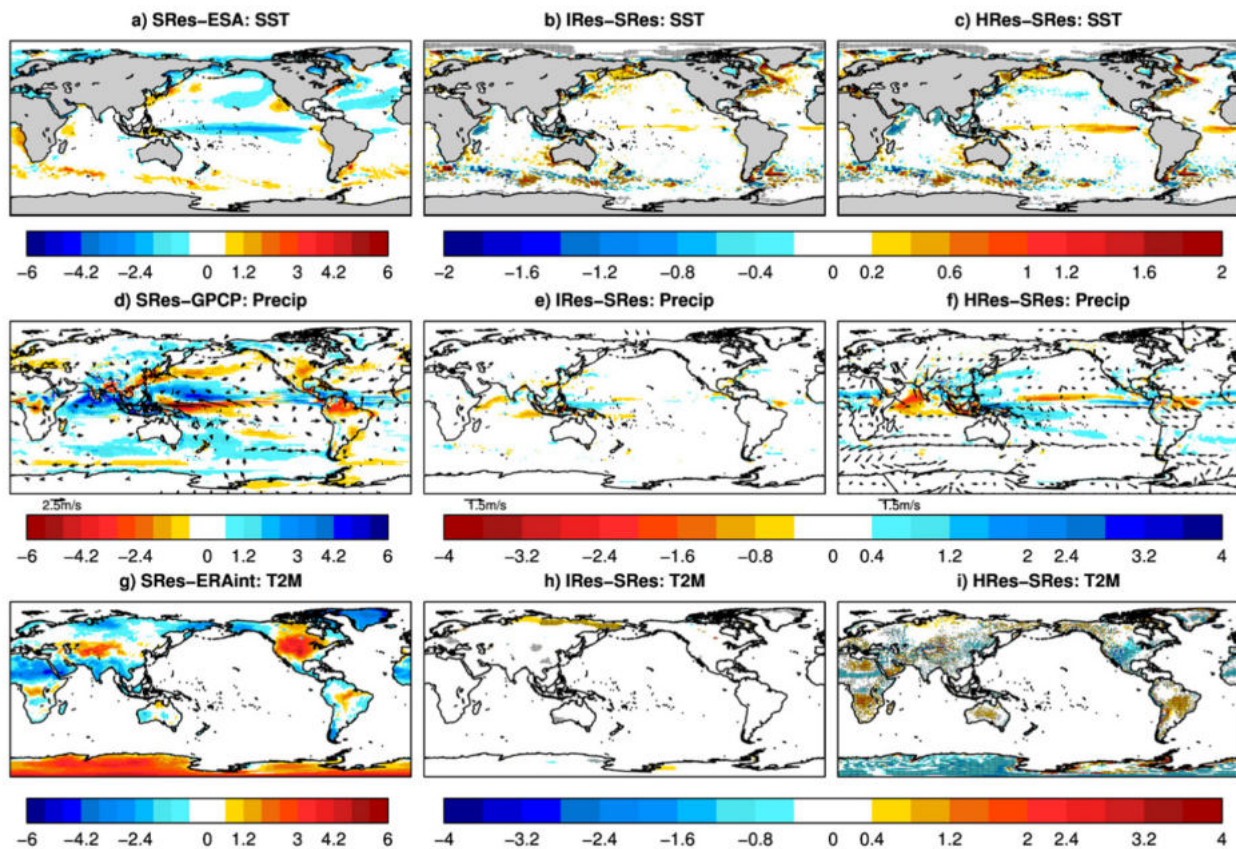


Figure 7: Impact de la résolution sur les biais de trois jeux de re-prévisions de JJA initialisées en mai avec le modèle EC-Earth3: SRes (atmosphère 80km - océan 1°), IRes (atmosphère 80km - océan 1/4°) et HRes (atmosphère 40km - océan 1/4°). La première colonne montre (de haut en bas) les biais de SST, précipitations et température à 2m par rapport à des réanalyses globales pour SRes, et les deux colonnes suivantes montrent les différences de biais entre IRes et SRes, puis HRes et SRes pour ces mêmes variables. Figure adaptée de Prodhomme et al. (2016).

èle couplé ne reproduit pas entièrement le mécanisme proposé, et un rappel océanique permettant de mieux représenter l'anomalie froide n'a eu que peu d'effet sur les températures de l'Europe de l'ouest, ce qui suggère que d'autres processus étaient également à l'œuvre lors de cette saison estivale (comme l'humidité du sol, suggérée par les travaux complémentaires à l'article de (Ardilouze et al., 2017b) portant sur le même événement).

L'impact de l'augmentation de la résolution horizontale des modèles d'océan et de glace de mer ont été quantifiés à la fois en termes d'état moyen et de performances des re-prévisions. Lors d'une étude en collaboration avec le Barcelona Supercomputing Center (BSC), des re-prévisions saisonnières initialisées en mai et novembre avec le modèle EC-Earth ont montré que l'augmentation de résolution océanique permettait d'améliorer les biais en température de surface de la mer, notamment sur les tropiques et les courants de bord Ouest, mais qu'une augmentation de la résolution horizontale atmosphérique était nécessaire pour bénéficier d'améliorations en précipitations et températures de surface

(figure 7, Prodhomme et al. (2016)). Pour les prévisions de glace de mer en Arctique avec le modèle CNRM-CM6, les analyses dans le cadre du projet H2020 APPLICATE ont montré que les conditions initiales jouaient un rôle prédominant sur la résolution horizontale dans l'apparition et l'évolution des biais de bord de glace, surtout en été.

Perspectives En collaboration avec le CERFACS et l'équipe EST du CNRM, la prévisibilité de variables biogéochimiques de l'océan sera estimée à l'aide de re-prévisions avec le modèle de système Terre CNRM-ESM2-1 en cours de réalisation pour le projet H2020 TRIATLAS. Une première évaluation de la prévisibilité potentielle de variables biogéochimiques a été menée avec des re-prévisions initialisées à partir d'états initiaux provenant de la simulation longue en climat pré-industriel (pi-Control) du modèle.

Une des conclusions du projet APPLICATE les plus pertinentes pour la prévision saisonnière est l'importance de l'initialisation de l'épaisseur de la glace de mer pour la prévision sur les régions polaires. Sur ce volet, des travaux pourront être menés en collaboration avec Mercator Ocean International afin d'améliorer la stratégie d'initialisation de la glace de mer dans les systèmes opérationnels à Météo-France. Actuellement, un frein aux progrès sur ce volet est l'emploi de modèles distincts (LIM3 à Mercator Ocean International, GELATO dans CNRM-CM). La convergence des modèles de glace de mer dans NEMO (projet collaboratif SI3) peut être un facteur de progrès à horizon de 5 ans.

Par ailleurs, les améliorations de la paramétrisation des flux de chaleur turbulents entre la glace de mer et l'atmosphère proposées dans le cadre du projet MOPGA ASET mené par Virginie Guemas pourront être intégrées à terme dans le modèle CNRM-CM en prévision S2S et saisonnière.

3.1.3 Représentation des modes de variabilité et téléconnexions

Plusieurs travaux au CNRM ont évalué la représentation dans le modèle couplé CNRM-CM des principaux modes de variabilité aux échelles S2S et saisonnières, dans un cadre initialisé (re-prévisions saisonnières) comme dans un cadre plus idéalisé (expériences de sensibilité dédiées).

A l'échelle saisonnière, les travaux menés dans le cadre du premier contrat C3S (2016-2018) ont permis d'évaluer de manière robuste la représentation des téléconnexions associées à l'ENSO et l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) dans les versions successives des modèles mis en œuvre au CNRM. L'approche est détaillée dans l'article de Volpi et al. (2020).

Un des volets du projet ERA4CS MEDSCOPE s'est intéressé à l'influence de l'ENSO sur les moyennes latitudes. Un protocole d'expériences idéalisées avec trois modèles atmosphériques (IFS cy36r4 utilisé dans EC-Earth3.2, ARPEGE-Climat v6.3, et CAM 5.3, la composante atmosphérique du modèle de prévision du CMCC) a permis d'étudier la non-linéarité de la réponse atmosphérique aux phases El Niño et La Niña (Mezzina et al., 2020), les chemins de propagation du signal vers les moyennes latitudes du bassin Atlantique (Mezzina et al., 2021), ainsi que la modulation de la réponse en fonction des phases de la Pacific Decadal Oscillation (PDO) (Benassi et al., 2021).

Aux moyennes latitudes, des travaux en cours montrent que les conditions NAO+ et NAO- intenses présentent une forte persistance à horizon infra-saisonnier, et les prévisions S2S de température du CNRM et du CEPMMT initialisées dans ces phases sont plus performantes sur une large partie de l'Europe.

Dans la ceinture tropicale, la prévision des pluies demeure un défi pour les modèles dynamiques qui montrent de forts biais dans les prévisions S2S (de Andrade et al., 2019), la cyclogénèse au-delà de la deuxième semaine (Camargo et al., 2019) ou encore les statistiques des pluies journalières sur l'Afrique du nord (Vogel et al., 2018). Plusieurs travaux au CNRM ont donc cherché à tirer parti de sources de prévisibilité d'événements marquants à l'échelle infra-saisonnaire (phases humides/sèches lors d'une saison de mousson, occurrences d'événements comme des cyclones tropicaux) afin d'améliorer les prévisions par rapport aux sorties directes des modèles, comme détaillé ci-après.

A l'échelle infra-saisonnaire, une thèse de doctorat s'est penchée sur les sources de prévisibilité sur le Pacifique Sud-Ouest Tropical (Specq, 2020), plus particulièrement les liens entre la MJO, les phases de l'ENSO et les fortes précipitations sur la région. Ces travaux ont notamment évalué dans un cadre probabiliste la représentation des anomalies d'occurrence des fortes précipitations en fonction des phases de la MJO et de l'ENSO dans des jeux d'observation, et dans plusieurs modèles de la base S2S. Ils ont mis en évidence des limitations des modèles notamment à reproduire les impacts distants de ces sources de prévisibilité, à la fois en termes de positionnement des maxima de précipitation associés et de temporalité. Ces conclusions ont motivé l'utilisation de méthodes bayésiennes telles que décrites dans la partie 3.2.4.

Plus généralement, une source de prévisibilité réside dans les ondes équatoriales atmosphériques, également appelées modes de variabilité intrasaisonnaire en raison de leur forte modulation et couplage avec la convection profonde. Li et Schechmann (2020) montrent par exemple à partir d'observations satellites que chacune des ondes tropicales apporte une contribution en terme de prévisibilité à l'échelle de la ceinture tropicale, potentiellement jusqu'à la vingtaine de jours pour la MJO. Des travaux portés par l'équipe GMME/TROPICS, qui a une compétence forte dans la compréhension et l'analyse de processus des modes de variabilité dans les régions tropicales (notamment en Afrique), ont porté sur la prévisibilité d'événements marquants associés aux ondes équatoriales et paramètres atmosphériques reliés à la convection profonde. Cet axe de recherche s'est développé autour de la plateforme MISVA (Monitoring of intraseasonal Variability over Africa, <http://misva.sedoo.fr>) au sein de laquelle les résultats de recherche sont formulés sous forme de produits de prévision spécifiques, testés en temps réel durant la période de mousson et discutés chaque semaine avec les services de prévision concernés, en particulier dans le cadre des programmes CREWS.

Perspectives Les conclusions des travaux à l'échelle saisonnière sur les sources de prévisibilité sont parfois restreintes par le nombre d'années disponibles, l'interaction d'autres échelles temporelles, et le faible niveau de significativité des liens détectés. Une piste qui sera explorée dans les années qui viennent consistera à exploiter les simulations longues de modèles de climat (du type piControl) à l'aide de méthodes de machine learning. La thèse d'Octave Tessiot (FCPLR Météo-France) débute sur le sujet en mai 2021 et

cherchera à développer, en appliquant des techniques d'apprentissage, un modèle statistique de prévision sur la zone Nord Atlantique - Europe. Les caractéristiques de ce modèle pourraient permettre d'identifier des liens entre prédicteurs et prédicands que des approches linéaires (de type régression linéaire multiple) n'ont pas encore mis en évidence.

Une perspective des travaux sur les ondes équatoriales est de cibler les événements extrêmes de pluies pour lesquelles l'activité ondulatoire semble être un bon prédicteur (Lafore et al., 2017). L'utilisation des ondes équatoriales comme guide d'analyse des prévisions numériques n'en est qu'à ses débuts. Actuellement seuls deux centres proposent des outils de suivi des ondes équatoriales : l'Université de Caroline du Nord pour le modèle américain CFS et le CNRM sur la base du modèle du CEPMMT (IFS). Le CNRM proposera bientôt sur la plateforme MISVA le même type d'outils pour la prévision d'ensemble ARPEGE (PEARP) et du CEPMMT (EPS aux échelles saisonnières). Il ressort de ces travaux de recherche un fort potentiel de la prévision synoptique et saisonnière et de l'usage des ondes équatoriales (Lefort et Peyrillé, 2020), qui doivent être complétés par des approches plus ciblées sur les phénomènes à enjeux considérés (extrême, cyclogenèse, sécheresse). Une proposition de sujet de thèse (FCPLR) a été faite pour rendre cette approche objective, en utilisant une classification par intelligence artificielle des ondes équatoriales et conditions océaniques associés aux extrêmes de précipitation sur la bande tropicale. L'objectif sera de constituer un atlas de situations observées et de définir une méthodologie d'analyse des prévisions S2S.

Les combinaisons entre modes de variabilité intrasaisonniers et interannuels seront étudiées sur chaque bassin océanique: sur l'Afrique de l'ouest, une collaboration avec l'Université du Sénégal (projet ENSO MISVA) a été montée dans ce but. Le rôle de l'activité des perturbations synoptiques dans la construction du cumul saisonnier sur la région sera également exploré.

3.2 Conception et évaluation des systèmes de prévision

3.2.1 Choix de modélisation

Les évolutions du modèle de climat CNRM-CM pour la prévision saisonnière se sont inscrites dans la dynamique de préparation du sixième exercice d'intercomparaison des modèles de climat (CMIP6), pour lequel une version du modèle à haute résolution atmosphérique (tl359, environ 50 km) et océanique ($1/4^\circ$) a été développée, ainsi que dans le cadre des appels d'offres successifs du programme C3S.

Le Système 6 de prévision saisonnière a été défini en 2016. Ce système marquait une première étape vers les résolutions spatiales préconisées dans le cadre de Copernicus, en augmentant la résolution atmosphérique de tl255 (environ 75 km) à tl359 (environ 50 km). Mais la modification majeure consistait à basculer de la physique atmosphérique utilisée pour l'exercice CMIP5 vers une physique dite pronostique définie pour CMIP6 et décrite par Roehrig et al. (2020). Cette physique comprend un calcul des termes diabatiques sur chaque colonne atmosphérique de manière indépendante, mais les échanges horizontaux et l'évolution temporelle sont assurés par l'introduction de variables pronostiques supplémentaires au modèle: l'énergie cinétique turbulente (TKE), la vitesse verticale convective, et la répartition de l'eau solide et liquide (nuages, précipitations de grande échelle

et convective). Les paramétrisations de la convection (Guérémy, 2011), de la turbulence (Cuxart et al., 2000), des nuages et des précipitations grande échelle (Lopez, 2002) ont été reformulées en tenant compte de ces nouvelles variables.

Avec l'appui de l'équipe IOGA et de Mercator Ocean International pour la préparation des conditions initiales, le modèle d'océan a également connu une montée de version majeure, en passant de NEMO 3.2 à NEMO 3.6. La résolution horizontale pour le Système 6 était toujours de 1° (avec un raffinement au $1/3^\circ$ au niveau de l'équateur); la résolution verticale de l'océan est passée de 42 à 75 niveaux, avec une meilleure description de la couche de mélange océanique et l'utilisation de la grille étendue eORCA1.

Pour le Système 7, introduit en 2019, la modification majeure se trouvait dans la résolution horizontale océanique, avec un passage à la grille ORCA 0.25. Si l'impact en termes de scores de prévision était restreint mais significatif, l'état moyen du modèle s'en est trouvé amélioré, résultats cohérents avec les recherches menées dans le cadre du projet européen FP7 SPECS avec EC-Earth et évoquées plus haut (Prodhomme et al., 2016). Dans l'atmosphère, les principaux changements par rapport au Système 6 étaient une meilleure prise en compte de la turbulence en présence de convection par l'introduction des flux convectifs dans l'équation d'évolution de la TKE, et une nouvelle formulation du flux de quantité de mouvement à la surface dû à l'orographie basée sur les travaux de Beljaars et al. (2004).

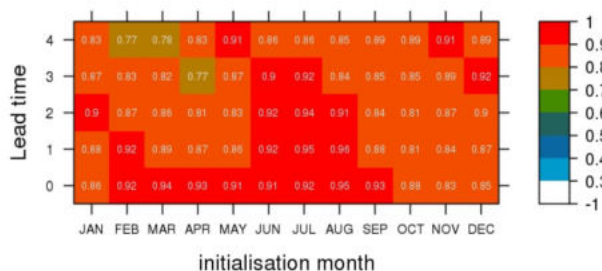
Les évaluations systématiques, en particulier les tableaux de synthèse des scores produits par la DCSC pour le site <http://seasonal.meteo.fr/> (figure 8), montrent que ces évolutions ont maintenu les performances des modèles de Météo-France au niveau de l'état de l'art.

Le Système 8 a permis d'introduire de nouveaux réglages des schémas de flux convectifs et de Beljaars et al. (2004) dans le modèle ARPEGE-Climat, ainsi qu'une résolution verticale accrue de 91 à 137 niveaux. Cet accroissement de la résolution permet de réduire les biais de température et circulation dans la basse stratosphère et la haute troposphère, et d'améliorer la représentation et la prévisibilité de l'oscillation quasi-biennale (QBO). Les niveaux supplémentaires sont ajoutés dans la troposphère comme dans la stratosphère, et permettent également d'augmenter l'intensité convective du modèle. Le changement majeur entre les systèmes 7 et 8 porte cependant sur la méthode d'initialisation, comme détaillé dans la partie 3.2.2.

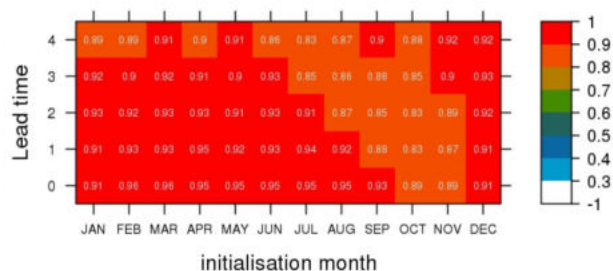
Les évolutions prévisibles des composantes du modèle couplé qui seront explorées dans un cadre de prévision infra-saisonnier et saisonnier sont les suivantes:

- Dans l'atmosphère, les travaux au CNRM pour améliorer la représentation de la convection dans ARPEGE incluront l'évaluation des nouveaux schémas dans des re-prévisions saisonnières. On s'intéressera également à l'apport de l'utilisation du schéma de transferts radiatifs ecRad développé au CEPMMT.
- L'impact de la prise en compte interactive des aérosols sera évalué en vue du prochain système de prévision saisonnier, afin de prendre en compte cette source potentielle de prévisibilité. Le schéma d'aérosols TACTIC-v2 (Michou et al., 2020) permettra de représenter une évolution en ligne des aérosols troposphériques dans ARPEGE.

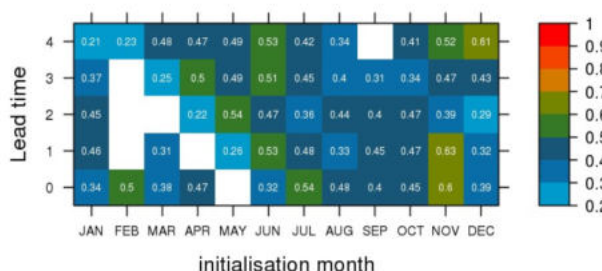
**Meteo-France system 7 - T2m inland
zone Tropiques (lat. -23 to 23 lon. -180 to 180)
Correlation - reference ERA5 1993-2016
3-Month forecasts**



**ECMWF system 5 - T2m inland
zone Tropiques (lat. -23 to 23 lon. -180 to 180)
Correlation - reference ERA5 1993-2016
3-Month forecasts**



**Meteo-France system 7 - EA
Correlation - reference ERAI 1993-2016
3-Month forecasts**



**ECMWF system 5 - EA
Correlation - reference ERAI 1993-2016
3-Month forecasts**

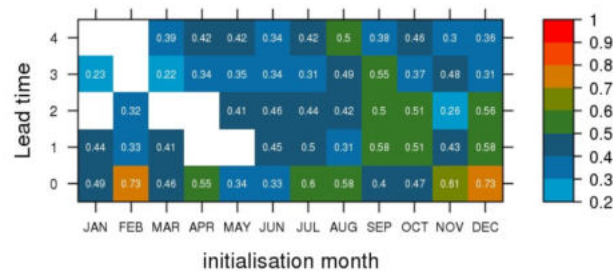


Figure 8: Exemples de tableaux de synthèse des scores de re-prévisions du Système 7 (à gauche) et du système SEAS5 du CEPMMT (à droite) pour les températures à 2m sur les surfaces continentales des Tropiques (en haut) et le mode de variabilité Est Atlantique (en bas), sur la période 1993-2016. Le score présenté ici est la corrélation avec des données de réanalyse (ERA-Interim ou ERA5, suivant la date de production du tableau). Les tableaux indiquent le score pour une saison de trois mois selon le mois d'initialisation (en abscisse) et l'échéance de la prévision (en ordonnée). Ainsi, le carré en bas à gauche de chaque tableau est la corrélation pour les re-prévisions de la saison janvier-février-mars initialisées en janvier.

- Pour la composante océanique, la prise en main du modèle NEMO 4.0 a démarré au sein de l'équipe IOGA. Au cours de la thèse de Morgane Le Breton, démarrée fin 2020, on s'intéressera à la représentation de la couche limite océanique et son impact sur l'apparition et le développement des biais en prévision saisonnière. Des évolutions des paramétrisations physiques de l'océan, comme la convection, seront également mises en œuvre dans ce cadre. La prévisibilité associée aux processus biogéochimiques sera explorée à l'aide de re-prévisions avec CNRM-ESM2-1 pour lesquelles le schéma de biogéochimie marine PISCES est activé (projet H2020 TRI-ATLAS).
- Dans les années à venir, on s'attachera à intégrer dans les simulations couplées les modifications du modèle de glace de mer GELATO proposées dans le cadre du projet H2020 APPLICATE (paramétrisation des mares de fonte, neige sur glace). Le modèle SI3, convergence à l'échelle européenne des modèles de glace de mer utilisés dans NEMO, sera également évalué dans un cadre de prévisions initialisées, en lien avec Mercator Ocean International.
- Pour les surfaces continentales, les travaux sur la prise en compte de la variabilité interannuelle du land use et de l'évolution au cours de la saison de la végétation se poursuivront. L'apport de l'activation d'une végétation interactive dans le modèle sera évalué. On s'intéressera à l'impact de la paramétrisation ISBA-MEB (Boone et al., 2017) sur les biais en prévision infra-saisonnière et saisonnière.

Ces axes de progrès s'appuient principalement sur les collaborations internes au CNRM autour du développement du modèle couplé CNRM-CM. L'ambition est d'aboutir à une version de CNRM-CM avec une plus grande complexité et une meilleure représentation de certains processus couplés pour une prochaine mise à jour du système de prévision saisonnière en 2024.

3.2.2 Initialisation et génération d'ensembles

Bilan La méthode de perturbation du modèle ARPEGE-Climat utilisée pour le système de prévision saisonnière, puis par la contribution du CNRM à la base S2S, est décrite dans Batté et Déqué (2016). Cette méthode consiste à ajouter des incréments à l'équation d'évolution des variables pronostiques du modèle ARPEGE-Climat, tirés aléatoirement parmi un échantillon d'incrément de rappel vers une réanalyse calculés sur une intégration préalable du modèle. Deux paramètres essentiels de cette méthode ont été explorés par de nombreux jeux de re-prévision avec le modèle couplé: la fréquence de tirage des perturbations, ainsi que la force de rappel. Cette dernière est liée de manière non triviale à l'amplitude des perturbations. Pour l'échelle de temps saisonnière, une force de rappel de l'ordre de 30 à 40 jours pour les champs de température, de vent, de pression de surface et d'humidité spécifique a permis d'obtenir le plus grand bénéfice avec ARPEGE-Climat v6.3.

L'initialisation des re-prévisions et prévisions repose sur l'utilisation de données de réanalyse et d'analyse produites par le CEPMMT pour l'atmosphère (réanalyses ERA-

Interim puis ERA5 à partir du Système 7, et analyse opérationnelle d'IFS) et par Mercator Ocean International pour l'océan (versions successives de la réanalyse GLORYS, et des chaînes d'analyse océanique PSY). Pour l'atmosphère, les disparités entre ARPEGE-Climat et le modèle IFS utilisé par le CEPMMT impliquent des ajustements de géométrie et d'interpolation avant utilisation des données, et engendrent des chocs initiaux au démarrage des prévisions. Pour l'océan, la collaboration avec Mercator Ocean International a permis de mettre en place dès le système 3 (en 2008) une chaîne de préparation d'états initiaux spécifiques à la prévision saisonnière, qui consiste à faire tourner les modèles NEMO et GELATO en exerçant un rappel fort en température et salinité vers les champs de la réanalyse puis de l'analyse de Mercator Ocean International.

En préparation du Système 8, l'équipe PASTEL s'est intéressée à une approche d'initialisation couplée, permettant de définir à partir d'une intégration du modèle couplé CNRM-CM contrainte dans l'atmosphère vers la réanalyse ERA5 et dans l'océan vers les données de réanalyse GLORYS. Si cette approche permet d'améliorer l'équilibre du modèle à l'instant initial et de réduire la dérive, les différences constatées en termes de performances du système de prévision sont souvent faibles, avec toutefois une amélioration significative du géopotential à 500 hPa. On note une dégradation des scores de prévision sur la saison d'été pour les SST de la région du Pacifique Equatorial (Nicolay, 2020), compensée par de petites améliorations sur les autres saisons principales (printemps, automne, et hiver).

Perspectives L'étude de l'impact de l'initialisation couplée sur les chocs initiaux et la dérive du modèle au cours des premières semaines de simulation fait l'objet d'une thèse de doctorat démarrée fin 2020. Les travaux permettront d'étudier l'influence de la force du rappel utilisé lors de la définition des états initiaux, ainsi que le rôle de la paramétrisation des flux océan-atmosphère sur l'apparition des biais dans la couche limite océanique et la basse troposphère.

L'initialisation de l'océan (SST et subsurface) est fondamentale non seulement sur les tropiques mais également aux moyennes et hautes latitudes. Tietsche et al. (2020) ont ainsi montré qu'un déséquilibre dans l'état initial de la circulation méridienne de retournement Atlantique (AMOC) pouvait dégrader les prévisions saisonnières, alors même que cette circulation varie peu à cette échelle temporelle. L'intégration de nouvelles données de mesure dans les analyses océaniques (Subramanian et al., 2019) et l'amélioration des schémas d'assimilation (Penny et al., 2019) pourront être des sources de progrès en prévision S2S et saisonnière. Le CNRM continuera sa collaboration avec Mercator Ocean International pour améliorer sa prise en compte de l'état initial océanique dans les systèmes de prévision saisonnière.

L'initialisation couplée employée dans le Système 8 met de côté la composante glace de mer pour laquelle les états initiaux ne permettaient pas une prévisibilité convenable. Dans l'attente d'une meilleure solution, des états initiaux sont produits par une intégration forcée de NEMO-GELATO fortement contrainte vers la réanalyse puis l'analyse de Mercator Ocean International (identiques au Système 7). L'amélioration de l'initialisation de la composante de glace de mer sera un axe de travail prioritaire pour le prochain système.

La méthode de génération d'ensembles (perturbations en cours d'intégration) pourrait

être complétée dans les années qui viennent par d'autres approches stochastiques (telles que mises en œuvre dans le modèle AROME, ou encore portant sur d'autres composantes du modèle couplé). Cette activité dépendra de la mise en place d'un cadre collaboratif, les forces de travail sur la thématique étant réduites dans l'équipe PASTEL depuis 2019.

3.2.3 Evaluation des ensembles et cas d'étude

Bilan En exploitant un grand ensemble (90 membres) de re-prévisions sur une période plus étendue (37 ans), les travaux dans le cadre du projet C3S (Volpi et al., 2020) ont montré que la représentation des téléconnexions dans le modèle de prévision de Météo-France pouvait être évaluée de manière robuste avec un ensemble de 30 membres et sur une période de 23 ans, contrairement à d'autres scores classiquement employés pour lesquels l'incertitude est très élevée avec ces échantillons restreints.

En dehors des régions tropicales, une taille d'ensemble plus grande est nécessaire pour l'évaluation robuste des scores classiquement utilisés comme la corrélation et les scores probabilistes (RPSS, Brier). De plus, des re-prévisions sur l'ensemble du 20^{ème} siècle utilisant la réanalyse ERA-20C ont mis en évidence une variabilité basse fréquence des scores de prévision aux moyennes latitudes, notamment pour l'oscillation Nord-Atlantique (Déqué et Batté, 2015). Ces résultats sont cohérents avec des travaux avec le modèle IFS (Weisheimer et al., 2017). Un autre aspect exploré ces dernières années est l'incertitude des évaluations liées aux données de référence: pour les évaluations probabilistes comme le score de Brier, les différences entre les jeux de données de précipitation encourageant à considérer la référence comme probabiliste.

Même si la période des re-prévisions est restreinte aux années après 1993, les données de prévision saisonnière mises à disposition par C3S sur le Climate Data Store ont facilité l'évaluation, la combinaison et la comparaison des systèmes de prévision saisonnière entre eux. En témoigne la richesse des analyses développées sur le site <http://seasonal.meteo.fr> mis en place et maintenu par la DCSC dans le cadre des activités OMM. Par ailleurs, l'harmonisation des données de sortie et leur diversification ont mené au développement de nouveaux indices de prévision, comme l'indice de vague de chaleur étudié dans le cadre du projet ANR ACASIS (Batté et al., 2018) et généralisé ensuite par la DCSC.

A l'échelle infra-saisonnière, l'évaluation des ensembles de prévision a été illustrée par plusieurs cas d'étude. Le risque de cette approche est de se restreindre aux études *a posteriori* pour des événements climatiques marquants où l'anticipation des systèmes de prévision était jugée satisfaisante. Cet écueil est évité en remplaçant ces études dans un contexte d'évaluation plus général. Les cas d'étude sur l'Europe de l'ouest (Antoine, 2019; Ardilouze et al., 2017b), portant respectivement sur un épisode froid de mars 2018 et une vague de chaleur en 2015, ont été accompagnés d'une évaluation en termes de scores probabilistes des re-prévisions couvrant la même période de l'année. De même, l'étude de Batté et al. (2018) sur l'Afrique de l'ouest a présenté un cas d'étude de 2016 sur le Sénégal dans un contexte de plus grande échelle, en lien avec les sources de prévisibilité sur la région. Dans le cadre de la thèse de doctorat de Damien Specq, l'étude de cas de fortes précipitations sur la Nouvelle Calédonie et leur prévisibilité à l'échelle

S2S a tenté de concilier deux approches: *a priori* en identifiant des situations climatiques pour lesquelles les prévisions S2S seraient plus fiables sur la région (notion de "fenêtres d'opportunité" décrite dans Mariotti et al. (2020)), et *a posteriori* de manière à comprendre les réussites et manquements des prévisions sur un ensemble d'événements marquants bien identifiés (Specq, 2020). Ces travaux se poursuivent actuellement au CNRM, en lien avec les activités sur les ondes équatoriales citées précédemment.

Perspectives Les conclusions de ces différents travaux nous encouragent à poursuivre les voies suivantes pour les années à venir:

- Continuer les travaux sur les fenêtres d'opportunité: dans ce cadre, l'équipe PASTEL participera aux expériences coordonnées du projet SNAP (Stratospheric Network for the Assessment of Predictability) afin d'étudier l'influence de la stratosphère sur la prévisibilité des variables de surface à l'échelle S2S.
- Améliorer la compréhension des conditions climatiques amenant une prévisibilité accrue ("forecasting the forecast skill") aux échelles saisonnières et S2S.
- Inscire ces travaux dans un cadre multi-modèle, en s'appuyant sur la richesse des bases de données disponibles (voir la partie 3.2.4).

La thèse d'Octave Tessiot (déjà mentionnée dans la partie 3.1.3) qui s'appuiera sur des techniques d'intelligence artificielle pour la prévision saisonnière sur l'Atlantique Nord sera riche en enseignements sur les deux premiers points.

3.2.4 Approches de calibration et combinaison des ensembles de prévision

Bilan Dans la lignée des conclusions de projets internationaux comme DEMETER et FP6 ENSEMBLES (Hagedorn et al., 2005; Weisheimer et al., 2011), des travaux pilotés au CNRM ont démontré l'intérêt de l'approche multi-modèle, consistant à construire de grands ensembles en combinant les ensembles de plusieurs modèles de prévision climatique, afin notamment d'extraire la part de signal prévisible et d'ainsi améliorer les prévisions d'ensemble là où les niveaux de prévisibilité sont modestes. Cette approche a été utilisée dans le cadre d'études sur l'influence de l'initialisation de l'humidité des sols sur les moyennes latitudes (Ardilouze et al., 2017a), sur la prévisibilité de l'étendue de glace de mer Arctique en été (Batté et al., 2020), ainsi que la prévision S2S des précipitations sur le bassin Pacifique Sud-Ouest (Specq et al., 2020), illustrée par la figure 9.

Ces études reposaient sur une combinaison multi-modèle sans pondération des différents modèles. A l'échelle saisonnière, les conclusions de Hemri et al. (2020) dans le cadre du programme C3S suggèrent que c'est l'approche la plus appropriée, à condition de calibrer les modèles *a priori* (au moins pour le biais moyen, et idéalement pour la variance). A l'échelle infra-saisonnière, Specq et Batté (2020) ont montré l'intérêt pour des modèles individuels d'une approche mêlant calibration et "bridging", c'est à dire tenant compte de prédicteurs grande échelle, pour l'amélioration des prévisions probabilistes de précipitations. Toutefois, cette méthodologie ne permet pas d'améliorer les résultats d'un

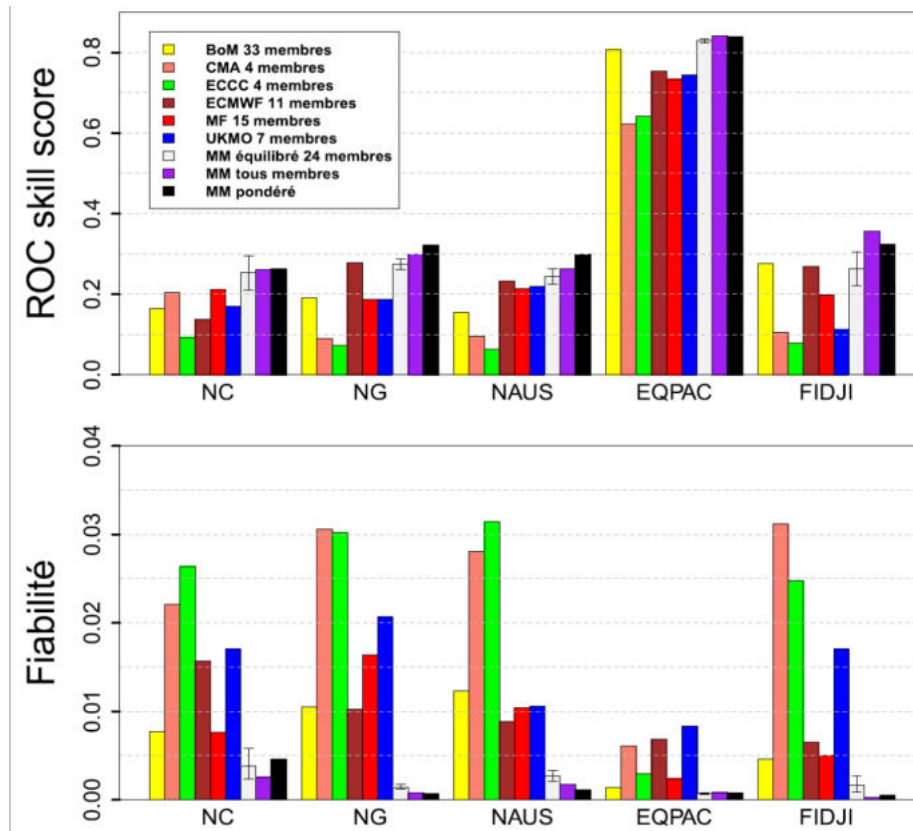


Figure 9: ROC Skill Score (en haut) et fiabilité (en bas) des probabilités de précipitations hebdomadaires supérieures au 80ième centile de la climatologie trois semaines après l’initialisation, pour six systèmes S2S et trois approches multi-modèles sur cinq zones du bassin Pacifique Sud Ouest tropical: Nouvelle Calédonie (NC), Nouvelle Guinée (NG), Nord de l’Australie (NAUS), Pacifique Equatorial (EQPAC) et îles Fidji (FIDJI). Plus le ROC Skill Score est élevé, meilleur est le système, tandis que le terme de fiabilité mesure un biais dans l’espace des probabilités et doit être le plus faible possible. Figure adaptée des travaux de thèse de Specq (2020).

multi-modèle (les améliorations constatées ne sont pas incrémentales) comme détaillé dans Specq (2020).

Un autre volet des travaux de calibration des prévisions entrepris à Météo-France est celui de la descente d’échelle. Cette étape est souvent cruciale pour l’utilisation des prévisions comme forçage de modèles d’impact (voir la partie 4). Dans le cadre des projets H2020 PROSNOW, ERA4CS MEDSCOPE et H2020 SECLI-FIRM, la méthode ADAMONT décrite par Verfaillie et al. (2017) et permettant une correction cohérente entre variables de température, de vent, de précipitation, et de rayonnement à la surface a été adaptée aux prévisions saisonnières. Toutefois, cette méthode qui repose sur une correction quantile-quantile dépendant du régime de temps n’a pas eu de plus-value nette par rapport à la correction quantile-quantile directe. Ceci peut être lié à la réduction des échantillons lorsqu’on divise les données d’apprentissage par régime de temps, mais aussi au faible niveau de prévisibilité du signal grande échelle.

Au LACy, des travaux sont engagés sur la descente d'échelle dynamique avec le modèle AROME de prévisions infra-saisonniers dans le cadre du projet PISSARO. Ce projet, dont la DIROI est partenaire, s'intéresse également à l'intégration de l'information à l'échelle infra-saisonnaire dans les processus de décision de partenaires comme la Croix Rouge ou les Terres Australes et Antarctiques françaises.

Perspectives Les travaux sur la calibration et la combinaison des ensembles de prévision se poursuivront avec les objectifs suivants:

- Enrichir les méthodes de combinaison multi-modèle, en tirant parti des bases de données S2S et C3S pour améliorer la combinaison des ensembles, en lien avec les fenêtres d'opportunité évoquées plus haut. Lors de l'élaboration des bulletins de prévision saisonnière, l'approche multi-modèle (outre les cartes de synthèse produites par C3S) est utilisée de manière subjective. L'objectif de ces travaux serait de proposer un indice de confiance dans les tendances privilégiées reposant sur des critères objectifs de cohérence des modèles et prévalence des forçages de grande échelle.
- Adapter la méthode de calibration et "bridging" à d'autres régions du globe pour lesquelles des prédicteurs de grande échelle sont identifiés. On s'intéressera notamment à l'apport d'une telle méthode sur d'autres régions tropicales et sub-tropicales, notamment dans le cadre du projet LEFE CYPRESSA qui s'intéresse à la variabilité et la prévisibilité des cyclones tropicaux.
- Explorer de nouvelles méthodes statistiques (dont l'intelligence artificielle) pour la calibration et la combinaison des ensembles de prévision dynamiques. On peut citer les travaux de l'équipe GMGEC/MOSCA dans le cadre du projet H2020 EUCP de descente d'échelle de projections climatiques à l'aide d'émulateurs statistiques, qui pourraient être transposés aux prévisions saisonnières à l'avenir.

4 Quelles applications pour la prévision saisonnière et S2S ?

4.1 Les services climatiques à ces échelles à Météo-France

4.1.1 Services climatiques institutionnels

Les services climatiques à Météo-France sur l'échelle saisonnière se sont longtemps focalisés sur la fourniture opérationnelle de bulletins de prévision en tant que nœud OMM pour la région VI (Europe) sur les prévisions à long terme, ainsi que la participation aux Fora Climatiques Régionaux (RCOFs). Ces activités ont été enrichies ces dernières années par la diversification des diagnostics diffusés sur le site <http://seasonal.meteo.fr>, et l'utilisation d'une approche multi-modèle doublée d'une expertise humaine pour l'élaboration des bulletins. La figure 10 montre un exemple des diagnostics inclus dans le bulletin OMM. Les produits préparés s'appuient sur l'analyse des prévisions du système opérationnel de Météo-France, mais également d'autres systèmes contributeurs du programme C3S (SEAS5 du CEPMMT en particulier). Les évaluations systématiques des re-prévisions dynamiques sur le site <http://seasonal.meteo.fr> sont progressivement étendues à ces modèles. Pour la France métropolitaine, une synthèse grand public est diffusée chaque mois sur le site internet de Météo-France et via les réseaux sociaux (figure 11).

Depuis 2017, la DCSC a également mis en place des bulletins de vérification *a posteriori* de prévisions saisonnières. Ces bulletins permettent d'évaluer de manière qualitative les prévisions au regard des analyses globales opérationnelles une fois la saison cible terminée. Un chercheur ou ingénieur du CNRM contribue régulièrement aux réunions de finalisation des bulletins.

La DCSC participe activement aux RCOFs de la région Méditerranée (MedCOF) et de l'Arctique. Les directions interrégionales d'outre-mer contribuent aux RCOFs du Sud-Ouest de l'océan Indien (SWIOCOF) pour la DIROI, des Caraïbes (CariCOF) pour la DIRAG, et des îles du Pacifique (PICO) pour les DIRNC et DIRPF. Ces directions assurent également une production de bulletins de prévision et de services climatiques adaptés aux enjeux de leur région, en utilisant la production opérationnelle de Météo-France mais également d'autres sources d'information (comme des prévisions statistiques ou statistico-dynamiques reposant sur des prédicteurs identifiés, comme présenté ci-dessous).

A l'échelle S2S, un cadre majeur des activités institutionnelles a été le programme CREWS de l'OMM. Dans le cadre du projet CREWS Burkina Faso (2018-2020), l'équipe GMME/TROPICS, l'Ecole Nationale de la Météorologie et la DCSC ont travaillé conjointement pour explorer la prévisibilité associée aux ondes équatoriales et à l'eau précipitable (la colonne de vapeur d'eau sur la verticale) pour mieux anticiper les événements pluvieux. Comparée à la pluie hebdomadaire prévue, l'eau précipitable obtient de meilleurs scores de prévision (Figure 12) et conserve une prévisibilité quasi constante pendant quatre semaines, bien que l'Afrique de l'Ouest ne soit pas la zone du globe la plus sensible à la MJO. L'analyse des ondes et en particulier la basse fréquence (ENSO ou anomalie du cycle saisonnier), la MJO et les ondes de Rossby équatoriales sont apparues comme des facteurs permettant de prévoir l'activité convective, amenant une prévisibilité de quatre se-

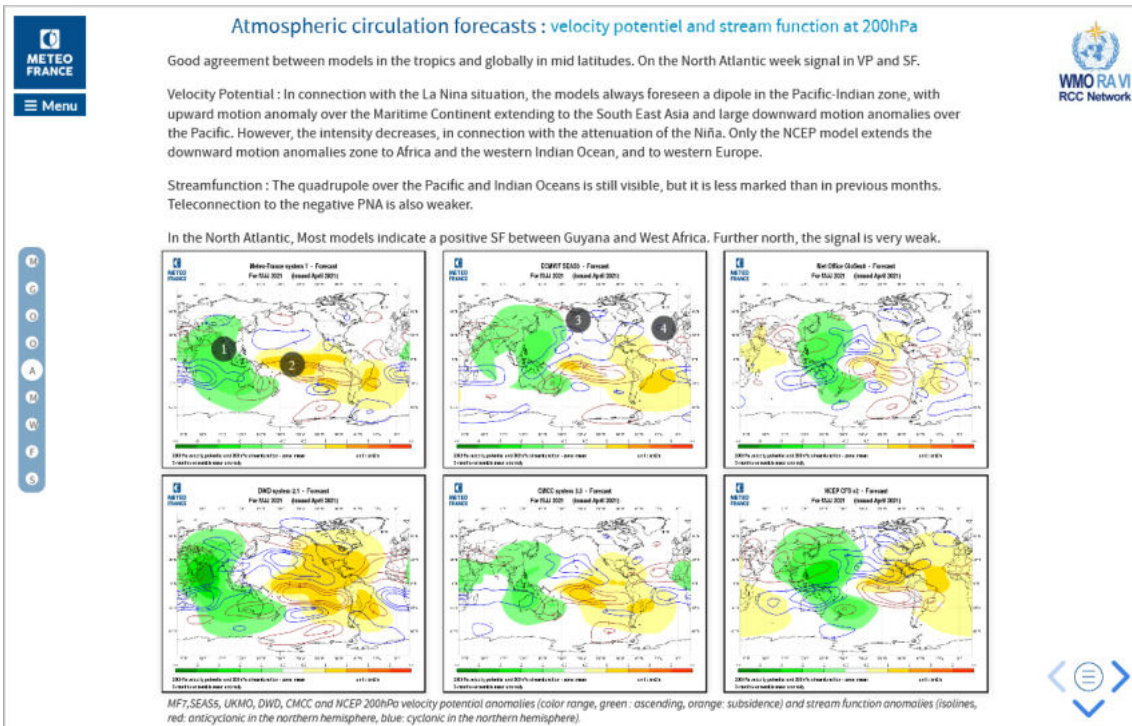


Figure 10: Un exemple des produits multi-systèmes préparés pour le bulletin accessible aux services météorologiques nationaux de la région VI dans le cadre des activités OMM de Météo-France. Les figures (ici, les anomalies de potentiel de vitesse à 200 hPa, en plages de couleur, et les anomalies de circulation diagnostiquées par la fonction de courant à 200 hPa, en contours) sont accompagnées de pastilles aidant à l'interprétation des prévisions, et d'un texte de synthèse.

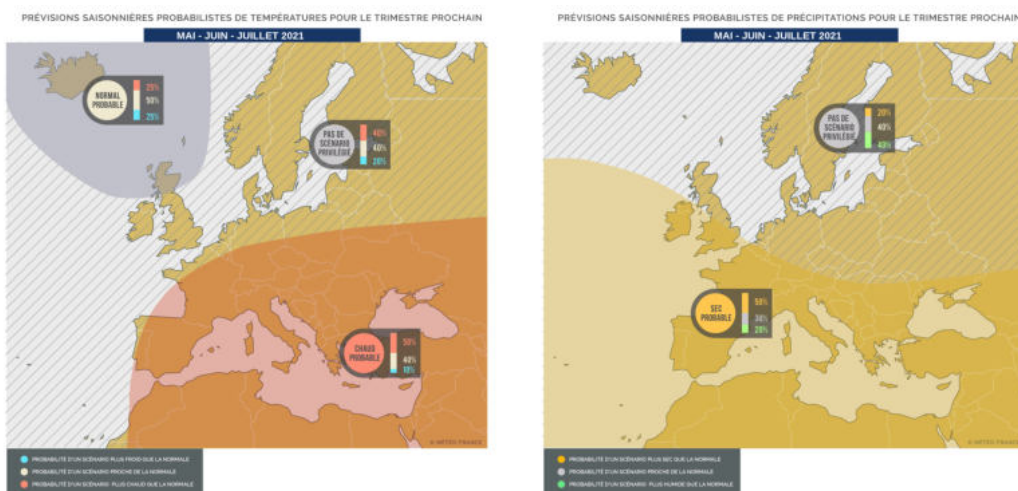


Figure 11: Cartes de synthèse "grand public" diffusées par Météo-France indiquant les scénarios privilégiés pour la température et les précipitations pour la saison de trois mois à venir.

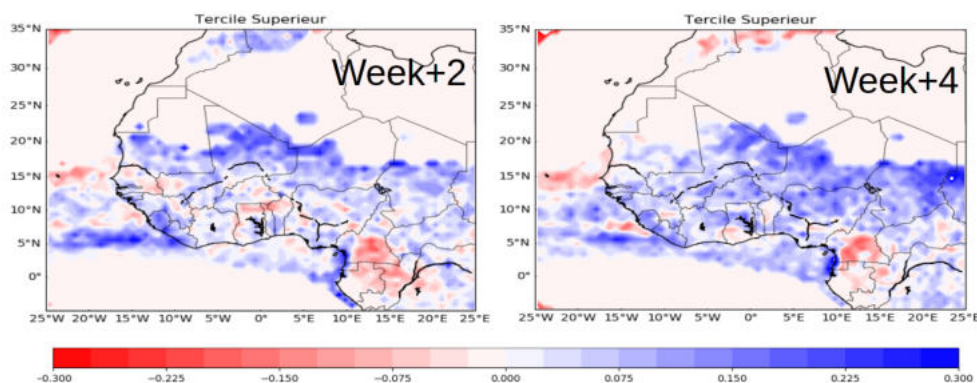


Figure 12: Différence entre le score probabiliste de Heidke (HSS) pour l'eau précipitable et le HSS pour la pluie des re-prévisions du CEPMMT pour la période 1998-2017. Les seuils utilisés sont de 45 mm pour l'eau précipitation, et le tercile supérieur pour la pluie prévue. La couleur bleue (rouge) indique les régions où un meilleur score est obtenu pour l'eau précipitable (pluie). Les données de référence proviennent de l'analyse TRMM (Huffman et al., 2007).

maines à des épisodes intrasaisonniers marqués (phases très humides et fin de saison des pluies tardives; Peyrillé et al. en préparation). Une étude de prévisibilité potentielle liant les pluies à l'eau précipitable montre un lien croissant avec les échelles de temps, suggérant un lien étroit entre activité des perturbations synoptiques et cumul saisonnier. Ce lien a été exploré avec le Système 7 de prévision saisonnière, et on montre qu'un indicateur de pluie basé sur l'activité des ondes d'est africaines obtient de meilleurs scores que l'anomalie de pluie prévue directement par le modèle.

Cette démarche est transposée depuis trois ans sur la DIROI et la DIRNC, où les produits de suivi d'activité ondulatoire basée sur le système de prévision d'ensemble du CEPMMT (EPS) apportent une information très pertinente pour la prévision de cyclogenèse. En particulier, l'exercice de briefing temps réel MISVA a été transposé à la DIROI et a montré un gain de prévisibilité associé à l'analyse ondulatoire comparée aux sorties brutes de l'EPS.

Un réel apport à l'échelle subsaisonnaire est la capacité à pouvoir cibler un événement intrasaisonnier de la même manière qu'on pourrait décrire une perturbation des moyennes latitudes. On commence en effet à connaître suffisamment bien les modes de fonctionnement de chacun des modes de variabilité intrasaisonnaire pour trouver des indicateurs plusieurs semaines à l'avance aussi bien sur l'Afrique de l'Ouest, l'océan Indien ou l'Indonésie (Lefort et Peyrillé, 2020), qui sont des territoires très contrastés en termes de comportement de la convection. Cette approche est actuellement faite de façon empirique dans le sens où les outils et produits mis à disposition des prévisionnistes sont exploratoires, mais sera amenée à être plus objective à l'avenir (voir les perspectives de la partie 3.1.3 à ce sujet).

4.1.2 Applications sectorielles

Un secteur pour lequel Météo-France a construit des collaborations durables et démontré une plus-value de la prévision saisonnière est celui de la prévision hydrologique. Les travaux ont porté à la fois sur la prévision des étiages (Viel et al., 2016), et sur les ressources en eaux souterraines. La prévision d'étiages s'appuie sur une chaîne de modélisation utilisant les prévisions dynamiques de Météo-France en forçage de simulations avec la plateforme SURFEX-TRIP (Besson et al., 2020). Des travaux pour étendre cette chaîne au-delà de la métropole à d'autres bassins comme le Pô ou l'Ebre ont été menés dans le cadre du projet ERA4CS MEDSCOPE, et seront poursuivis dans les années qui viennent. Le partenariat avec le Syndicat Mixte d'Etudes et d'Aménagement de la Garonne (SMEAG) est un exemple de service mûri avec l'appui de projets (comme FP7 EUPO-RIAS).

La prévision des ressources en eaux souterraines en France s'inscrit dans le cadre de la plateforme nationale AQUI-FR (<http://www.geosciences.ens.fr/aqui-fr>), et mobilise à Météo-France les équipes DCSC/AVH et GMME/SURFACE. Les sorties atmosphériques des 51 membres de la prévision saisonnière du Système 7 de Météo-France forcent le modèle SURFEX V8 qui calcule ainsi le drainage et le ruissellement utilisés en entrée de plusieurs modèles hydrogéologiques, couvrant notamment plus d'un tiers des aquifères sédimentaires du territoire (Vergnes et al., 2020). Un exemple de produit est présenté figure 13. Depuis 2020, la chaîne de prévision des ressources en eau souterraine est implémentée en temps réel. Un bulletin a ainsi été fourni au ministère de la Transition Écologique au printemps 2020 pour identifier les territoires à risque (<https://www.eaufrance.fr/publications/bsh/2020-04>).

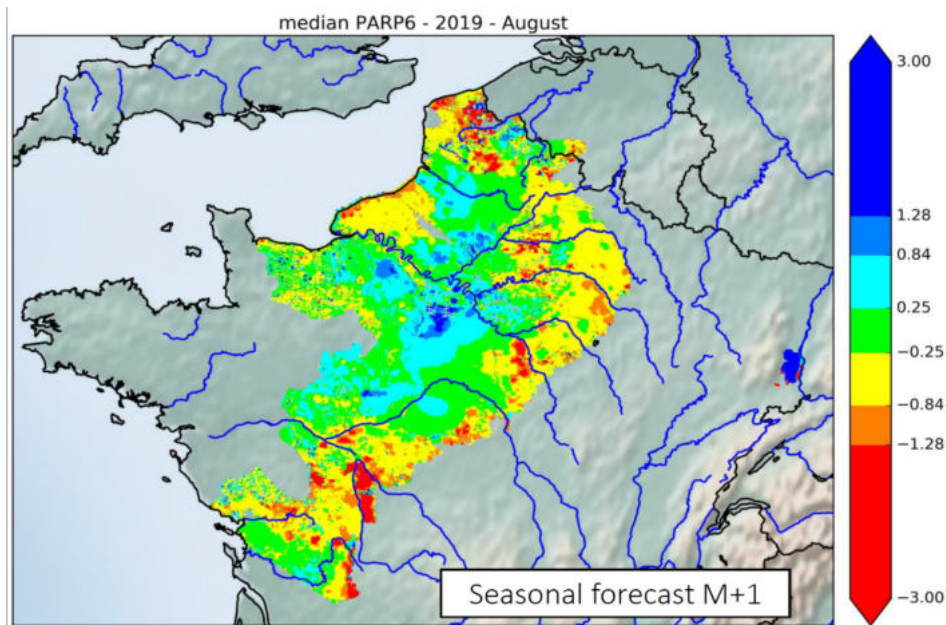


Figure 13: Prévision médiane d'un indice standardisé de niveau piézométrique de nappe pour le mois d'août 2019, utilisant la prévision saisonnière initialisée fin juin / début juillet en amont de la plateforme de modélisation AQUI-FR. Figure tirée de Leroux et al. (2019).

En dehors de la métropole, les prévisions saisonnières sont utilisées pour la gestion de barrages: l'IRD notamment utilise les données de prévision fournies par Météo-France pour prévoir le débit du fleuve Sénégal au barrage du Manatali (en collaboration avec l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal¹).

En lien avec les prévisions hydrologiques, des démonstrateurs de services climatiques ont été développés en partenariat avec l'INRAE dans le cadre du projet ERA4CS MED-SCOPE. Météo-France a ainsi fourni aux équipes de l'INRAE des re-prévisions d'indice d'humidité du sol et de paramètres atmosphériques calibrées à l'aide de la réanalyse régionale UERRA (<http://www.uerra.eu/>), utilisées en entrée de modèles d'impact pour évaluer les besoins en eau pour l'agriculture (bassin de la Durance) ou le risque de feux de forêts sur la région Méditerranéenne. Ce projet a permis de renforcer les collaborations avec l'INRAE autour de l'information à cette échelle. Parmi ces collaborations, un projet (SEPIM) portant sur la prévision du risque de jaunisse de la betterave (maladie portée par les pucerons) a démarré en 2021 pour une durée de 3 ans. Il est financé dans le cadre du Plan National de Recherche et Innovation "vers des solutions opérationnelles contre la jaunisse de la betterave sucrière".

Les sorties de prévision saisonnière de température, précipitation et rayonnement ont été corrigées avec la méthode ADAMONT pour forcer des modèles d'évolution du manteau neigeux, afin de développer un service de gestion de la neige des domaines skiables dans les Alpes européennes (projet H2020 PROSNOW). Le projet a permis de tester la faisabilité d'une telle application (avec une approche "sans couture" combinant prévisions de moyenne échéance et prévision saisonnière pour l'estimation de l'état futur du manteau neigeux), et de développer la chaîne de modélisation à mettre en oeuvre. Toutefois, la plus-value de la prévision saisonnière étant inexistante sur les régions et mois d'intérêt, c'est une distribution basée sur la climatologie qui a été retenue comme forçage au-delà de la moyenne échéance pour la mise en oeuvre opérationnelle de ce service depuis l'hiver 2020-2021 (Morin, 2020).

Si le programme C3S a permis la diffusion de données de prévision multi-systèmes dans un cadre formalisé et pérenne, il a également impulsé la mise en place de services d'informations sectorielles (SIS) utilisant les prévisions saisonnières. Météo-France a participé au démonstrateur Clim4Energy (porté par l'IPSL, en collaboration notamment avec le groupe EDF) dans le cadre de la première phase du programme, portant sur des cas d'étude et l'évaluation de la prévisibilité de la demande énergétique dans les re-prévisions saisonnières et les projections climatiques. Le projet C3S-Energy (<https://climate.copernicus.eu/operational-service-energy-sector>) a porté sur l'intégration des produits des démonstrateurs dans une chaîne opérationnelle de production pour C3S (l'intégration sur le portail de données de C3S est toujours en cours).

Ces projets ont permis de développer de nouveaux indicateurs pertinents pour le secteur de l'énergie à partir des sorties numériques des prévisions saisonnières. Il est cependant à noter que les projets sectoriels financés par le programme C3S plus spécifiquement liés à la fourniture de services en lien avec l'échelle saisonnière sont souvent restés au stade de démonstrateurs, et leur pérennisation dans la prochaine phase reste à confirmer.

¹<http://www.g-eau.fr/index.php/fr/recherche/projets-en-cours/item/724-prevision-saisonniere-du-debit-naturel-de-crue-du-fleuve-senegal>

Une raison probable est la faible prévisibilité sur l'Europe des variables nécessaires à ces services. De plus, la durée limitée de ces contrats a parfois freiné la prise en main des indicateurs par les utilisateurs, les incertitudes liées à l'échelle saisonnière nécessitant de nombreuses interactions lors de la définition d'un service, et le retour sur investissement demandant un effort pluri-annuel.

4.1.3 Valorisation commerciale des services climatiques

Dans le cadre de contrats commerciaux, Météo-France fournit selon les attentes des clients une information basée sur les données de prévision mensuelle du CEPMMT et/ou l'élaboration des bulletins de prévision saisonnière de Météo-France.

A l'échelle S2S, cette information sur la France porte typiquement sur les précipitations, températures maximales et minimales, et prend la forme de données (post-traitées ou brutes) et de graphiques, parfois complétés par un accompagnement d'un prévisionniste. Parmi les clients récents, on peut citer des groupes de l'agroalimentaire (des entreprises de négoce en cacao, café et épices comme Touton SA ou SUCDEN, ainsi que La Fruitière et Martinet), du transport (comme Michelin), de l'énergie (EDF, notamment intéressé par les vagues de froid) et plus généralement d'entreprises aux chaînes logistiques météo-sensibles (Dyson, Butagaz, ou encore Decathlon).

A l'échelle saisonnière, les services sont principalement institutionnels (décrits plus haut) mais certains clients comme Touton SA ont accès aux prévisions saisonnières (données et bulletins).

4.2 Prospective d'évolution de ces services climatiques

La position de référence de l'établissement sur la météorologie et le climat, ainsi que l'engagement de Météo-France auprès de l'OMM comme centre de production globale et nœud régional de prévision saisonnière lui permettent de s'investir dans des collaborations institutionnelles à l'échelle nationale et internationale en termes de services climatiques associés à l'échelle S2S et saisonnière.

Les activités de prévision hydrologique à l'échelle saisonnière seront notamment poursuivies. Le projet ANR CIPRHES (2021-2025) coordonné par l'INRAE permettra de continuer les travaux de recherche et de développement sur la prévision des étiages, en s'intéressant à la combinaison d'informations à travers les échelles (de la climatologie passée aux prévisions à courte échéance et saisonnières). L'établissement continuera également ses travaux de recherche et les collaborations pour la prévision des aquifères (programme Aqui-FR).

La disponibilité des données "brutes" (déjà en libre accès pour l'échelle saisonnière via le programme C3S, et prévues à horizon 2024 pour les données S2S du CEPMMT) ouvre un champ large d'applications possibles, à la fois pour l'établissement mais également pour des concurrents. Les retours de la part des utilisateurs au sujet de leur usage des prévisions saisonnières sont rares, le plus souvent car les informations à cette échelle sont fournies en complément d'autres services. La mise en place de nouveaux services demande un investissement en temps et moyens humains, notamment pour expliquer les

limites des prévisions à ces échéances et la nécessité d'utiliser une information probabiliste, mais également pour cerner en détail les besoins des clients et le réalisme des attentes au vu des contraintes (limites de prévisibilité, délais d'action, aversion au risque). Le positionnement de Météo-France sur des projets de recherche et développement et des collaborations dans la durée et favorisant la co-construction de services est susceptible de limiter le risque de "sur-vendre" les prévisions saisonnières et S2S, et de mieux répondre aux attentes des clients et bénéficiaires de services sur ces échéances.

5 Conclusion et perspectives

Ce document présente une synthèse des activités de recherche et développement autour de la prévision aux échelles S2S et saisonnières à Météo-France, de la compréhension des sources de prévisibilité aux applications. Plutôt que de résumer les différentes thématiques abordées lors de ce rapport, cette conclusion décrit les différents verrous (scientifiques et méthodologiques) mis en évidence lors de la réflexion ayant nourri ce travail et propose des pistes pour les résoudre. Elle présente également les opportunités s'offrant à l'établissement et à la communauté scientifique pour progresser sur cette thématique à l'avenir.

5.1 Verrous et défis à relever

5.1.1 Limites des applications en métropole liées à une plus faible prévisibilité

Un frein important pour le développement de services climatiques aux échéances infra-saisonnières et saisonnières en métropole est la plus faible prévisibilité à ces échelles sur l'Europe de l'ouest que sur les régions tropicales. Les travaux en modélisation du climat et sur l'initialisation sont fondamentaux, et ont permis des progrès considérables depuis les premières années d'activités sur la thématique. Les améliorations à venir reposeront sur une meilleure prise en compte des processus sources de prévisibilité et de leurs incertitudes. L'équipe PASTEL au CNRM peut s'appuyer sur des compétences en interne au laboratoire mais également dans la communauté afin d'intégrer les progrès en modélisation du climat et en initialisation dans ses systèmes de prévision. Ceci étant, une notion indispensable à prendre en compte lors de la conception de services, et pour laquelle les travaux de recherche au CNRM continueront à apporter leurs contributions, est celle de la prévisibilité intrinsèque du climat sur les régions d'intérêt.

Ainsi, on notera que les services climatiques les plus développés en France métropolitaine bénéficient d'autres sources de prévisibilité que la seule information des modèles numériques de prévision saisonnière. Un exemple est l'état initial du manteau neigeux qui est pris en compte dans les chaînes de gestion de l'enneigement (PROSNOW) et de modélisation hydrologiques, et apporte une prévisibilité pendant les saisons de printemps et d'été. Toutefois, les modèles dynamiques apportent souvent une plus-value démontrée par rapport à l'utilisation d'une climatologie sur les périodes de re-prévision, à condition de bénéficier de post-traitements adaptés. On comprend alors l'importance pour l'établissement de maintenir une activité de recherche et développement sur cet axe.

5.1.2 Fournir une information fiable et adaptée aux échéances

Au-delà des limites des prévisions, même si les bulletins s'attachent à communiquer leur incertitude, l'information demandée par le client revêt souvent une forme déterministe (médiane de la distribution), ou alors consiste en la fourniture de données sans accompagnement pour leur utilisation. De nombreux travaux, notamment dans le cadre du projet FP7 EUPORIAS ou C3S QA4SEAS, ont démontré l'importance des échanges nourris entre utilisateurs et fournisseurs de services climatiques. Ces activités nécessitent donc non seulement la fourniture de données, parfois à fine résolution spatiale et temporelle, mais également une expertise humaine et un dialogue permanent entre producteurs et utilisateurs de l'information, y compris en fonction des configurations météorologiques de grande échelle influant sur la prévisibilité.

5.1.3 Coordonner la recherche et les services autour de l'échelle infra-saisonnière

Si la demande est (dans certains secteurs comme l'énergie) aussi voire plus grande que pour l'échelle saisonnière, les activités autour de l'échelle S2S sont assez dispersées au sein de l'établissement, du fait de la séparation des divisions de services entre DSM et DCSC, et du CNRM en groupes se focalisant sur des échelles et outils de modélisation distincts. En effet, l'échelle S2S devrait permettre de faire le lien entre les équipes travaillant sur la prévision d'ensemble météorologique (par exemple, le système PEARP) et la prévision saisonnière. Les travaux de convergence des modèles de prévision numérique du temps et de climat pourraient être une source de progrès, même si les configurations utilisées (en termes d'initialisation, de couplages et de résolution) ne permettent pas d'envisager un système "sans couture" dans les années à venir. Les ressources humaines étant limitées, et cette échelle n'étant pas le cœur de métier "historique" de ces équipes, un fonctionnement en silo est parfois de mise.

Avec les ressources actuelles et les approches de modélisation employées, il n'est pas prévu de mettre en place une production opérationnelle de prévisions S2S. L'équipe PASTEL souhaite maintenir sa contribution au projet S2S dans les années à venir et réfléchira à la pertinence de combiner les systèmes de prévision S2S et prévision saisonnière lors du passage au Système 9 (prévu pour 2024).

L'approche développée par l'équipe GMME/TROPICS mêlant échelles synoptique et infrasaisonnière pourrait être vecteur d'interactions et de synergies entre approches méthodologiques complémentaires. De même, les enseignements du projet CIPRHES pourront être bénéfiques au-delà de l'activité de prévision hydrologique, en ce qui concerne l'exploitation "sans couture" des données de prévisions météorologiques à courte, moyenne, et longue échéance jusqu'à la prévision saisonnière, en entrée de modèles d'impacts.

L'expérience construite ces dernières années en termes de sources de prévisibilité, de leur modulation intrasaisonnière, et des approches d'évaluation et de calibration des ensembles doit être davantage partagée avec les services en charge de l'exploitation opérationnelle.

5.2 Opportunités

Face aux défis énumérés plus haut, le paysage actuel de la recherche et développement en prévision climatique laisse présager plusieurs opportunités à saisir par l'établissement.

En l'espace de cinq ans, l'intérêt pour la prévision saisonnière et/ou S2S s'est diffusé au-delà des équipes de recherche spécialisées, tant en interne au sein même du CNRM qu'avec d'autres directions de Météo-France et des partenaires externes. Plusieurs projets de recherche européens, pour lesquels une collaboration en interne a été mise en place, pourraient avoir des retombées positives sur la qualité du système de prévision: c'est le cas du projet H2020 CONFESS (sur l'initialisation et la modélisation des surfaces continentales) mais aussi du projet H2020 TRIATLAS (sur la prévisibilité de la biogéochimie marine). De même, plusieurs initiatives transverses impliquant des équipes ayant des compétences en compréhension du climat tropical, en variabilité du climat, ou encore en modélisation à fine échelle et prévision sur les régions d'outre mer, comprennent un axe sur la prévision saisonnière. Ceci permettra de dynamiser les échanges entre les équipes concernées, et d'éviter le travail en silo.

Hormis leur participation au groupe technique des laboratoires contribuant à la base S2S, les chercheurs étudiant l'échelle S2S à Météo-France sont peu visibles dans les groupes de travail du projet. En effet, ceux-ci consacrent une plus grande part de leur temps à la prévisibilité saisonnière. Nos travaux récents, des publications communes, le recrutement d'un jeune chercheur (Damien Specq) ayant consacré sa thèse au CNRM à cette échelle de temps, et le projet SNAP (Stratospheric Network for the Assessment of Predictability) sont l'occasion pour le CNRM de s'intégrer plus durablement dans une communauté scientifique déjà bien établie. L'objectif pour les cinq ans à venir est de consolider l'activité de recherche sur cette échelle S2S.

Pour l'échelle saisonnière, des opportunités de collaboration sont également à saisir avec des laboratoires et centres opérationnels à l'extérieur de l'établissement. Les interactions avec Mercator Ocean International sont régulières lors de la mise en place de nouveaux systèmes, et pour assurer la continuité de la production. Ces dernières années, deux stages de M2 ont été co-encadrés avec Mercator Ocean International sur des sujets autour de l'initialisation et de l'impact de l'océan sur la prévision. Cette démarche doit être poursuivie dans les années à venir sur des sujets comme l'initialisation de l'état de la glace de mer, ou encore les approches de perturbation des conditions initiales océaniques. Enfin, les interactions avec le CEPMMT sur la thématique ne doivent pas être restreintes à une relation de fournisseur de données pour C3S: le projet H2020 CONFESS et des opportunités dans le cadre du programme Horizon Europe sont d'excellentes occasions d'échanger de manière plus fréquente sur l'initialisation, la calibration et l'évaluation de la prévision saisonnière.

Principaux acronymes

AVH Analyse et Veille Hydrologique

BSC Barcelona Supercomputing Center

C3S Copernicus Climate Change Services

CEPMMT Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme

CMCC Centre euro-Méditerranéen sur le Changement Climatique

CNR-ISAC Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima

CREWS Climate Risk and Early Warning Systems

DCSC Direction de la Climatologie et des Services Climatiques

DIRAG Direction Interrégionale Antilles-Guyane

DIRNC Direction Interrégionale de la Nouvelle Calédonie

DIROI Direction Interrégionale pour l'océan Indien

DIRPF Direction Interrégionale de la Polynésie Française

DSM Direction des Services Météorologiques

DWD Deutsche Wetter Dienst

ENSO El Niño - Southern Oscillation

EPS Ensemble Prediction System

EUROSIP EUROpean Seasonal to Interannual Prediction

FCPLR Formation Complémentaire Par La Recherche

GEWEX Global Energy and Water Exchanges project

GMGEC Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat

GMME Groupe de Météorologie de Moyenne Échelle

IFS Integrated Forecasting System

IOGA Interactions Océan Glace Atmosphère

IPSL Institut Pierre-Simon Laplace

JJA Juin Juillet Août

JMA Japan Meteorological Agency

LS4P Initiative on impact of initialized Land temperature and Snowpack on Subseasonal to Seasonal Prediction

MJO Oscillation de Madden-Julian

MOSCA MOdélisation du Système Climatique Régional

NAO North Atlantic Oscillation

NCEP National Centers for Environmental Prediction

OMM Organisation Météorologique Mondiale

PASTEL Prévisions Atmosphériques Saisonnières et TELéconnexions

PDO Pacific Decadal Oscillation

RCOF Regional Climate Outlook Forum

S2S Subseasonal-to-Seasonal

SEAS5 Système 5 du CEPMMT

SIS Services d'Informations Sectorielles

SMEAG Syndicat Mixte d'Etudes et d'Aménagement de la Garonne

SST Sea Surface Temperature

UERRA Uncertainties in Ensembles of Regional Reanalyses

WCRP World Climate Research Programme

WGSIP Working Group on Subseasonal to Interdecadal Prediction

WWRP World Weather Research Programme

References

- Acosta-Navarro, J. C., Ortega, P., Batté, L., Smith, D., Bretonnière, P. A., Guemas, V., Massonnet, F., Sicardi, V., Torralba, V., Tourigny, E., et Doblas-Reyes, F. (2020). Link between autumnal Arctic sea ice and Northern Hemisphere winter forecast skill. *Geophysical Research Letters*, 47: e2019GL086753. doi: 10.1029/2019GL086753.
- Antoine, S. (2019). Prévisibilité d'événements extrêmes aux échelles sub-saisonniers. Rapport de Master, Université Paul Sabatier / Ecole Nationale de la Météorologie, Toulouse, France.
- Ardilouze, C. (2019). *Impact de l'humidité du sol sur la prévisibilité du climat estival aux moyennes latitudes*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, France. URL <https://www.theses.fr/2019INPT0048>.
- Ardilouze, C., Batté, L., Bunzel, F., Decremer, D., Déqué, M., Doblas-Reyes, F. J., Douville, H., Fereday, D., Guemas, V., MacLachlan, C., Müller, W., et Prodhomme, C. (2017a). Multi-model assessment of the impact of soil moisture initialization on mid-latitude summer predictability. *Climate Dynamics*, 49: 3959–3974. doi: 10.1007/s00382-017-3555-7.
- Ardilouze, C., Batté, L., et Déqué, M. (2017b). Subseasonal-to-seasonal (S2S) forecasts with CNRM-CM: a case study on the July 2015 West-European heat wave. *Advances in Science and Research*, 14: 115–121. doi: 10.5194/asr-14-115-2017. URL <https://asr.copernicus.org/articles/14/115/2017/>.
- Ardilouze, C., Batté, L., Decharme, B., et Déqué, M. (2019a). On the link between summer dry bias over the U.S. Great Plains and seasonal temperature prediction skill in a dynamical forecast system. *Weather and Forecasting*, 34. doi: 10.1175/WAF-D-19-0023.1.
- Ardilouze, C., Batté, L., Déqué, M., van Meijgaard, E., et van den Hurk, B. (2019b). Investigating the impact of soil moisture on European summer climate in ensemble numerical experiments. *Climate Dynamics*, 52: 4011–4026. doi: 10.1007/s00382-018-4358-1.
- Ardilouze, C., Materia, S., Batté, L., Benassi, M., et Prodhomme, C. (2020). Precipitation response to extreme soil moisture conditions over the mediterranean. *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-020-05519-5.
- Batté, L. et Déqué, M. (2016). Randomly correcting model errors in the ARPEGE-Climate v6.1 component of CNRM-CM: applications for seasonal forecasts. *Geoscientific Model Development*, 9: 2055–2076. doi: 10.5194/gmd-9-2055-2016.
- Batté, L., Ardilouze, C., et Déqué, M. (2018). Forecasting West African heat waves at subseasonal and seasonal time scales. *Monthly Weather Review*, 146(3): 889–907. doi: 10.1175/MWR-D-17-0211.1.
- Batté, L., Välisuo, I., Chevallier, M., Acosta Navarro, J. C., Ortega, P., et Smith, D. (2020). Summer predictions of Arctic sea ice edge in multi-model seasonal re-forecasts. *Climate Dynamics*, 54: 5013–5029. doi: 10.1007/s00382-020-05273-8.
- Beljaars, A. C. M., Brown, A. R., et Wood, N. (2004). A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130: 1327–1347. doi: 10.1256/qj.03.73.

- Benassi, M., Conti, G., Gualdi, S., Ruggieri, P., Materia, S., García-Serrano, J., Palmeiro, F. M., Batté, L., et Ardilouze, C. (2021). El Niño teleconnection to the Euro-Mediterranean late-winter: the role of extratropical Pacific modulation. *Climate Dynamics*, accepted.
- Besson, F., Etchevers, P., Habets, F., Le Moigne, P., Rousset-Regimbeau, F., Soubeyroux, J.-M., et Viel, C. (2020). Suivi en temps réel des sécheresses: de l'analyse à la prévision saisonnière. *La Houille Blanche*, 4: 82–92. doi: 10.1051/lhb/2020042.
- Boone, A., Samuelsson, S., Golvik, S., Napoly, A., Jarlan, L., Brun, E., et Decharme, B. (2017). The interactions between soil–biosphere–atmosphere land surface model with a multi-energy balance (ISBA-MEB) option in SURFEXv8 – Part 1: Model description. *Geoscientific Model Development*, 10: 843–872.
- Bougeault, P., Toth, Z., Bishop, C., Brown, B., Burridge, D., Chen, D. H., Ebert, B., Fuentes, M., Hamill, T. M., Mylne, K., Nicolau, J., Paccagnella, T., Park, Y.-Y., Parsons, D., Raoult, B., Schuster, D., Silva Dias, P., Swinbank, R., Takeuchi, Y., Tennant, W., Wilson, L., et Worley, S. (2010). The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91: 1059–1072. doi: 10.1175/2010BAMS2853.1.
- Buontempo, C., Hanlon, H. M., Bruno Soares, M., Christel, I., Soubeyroux, J.-M., Viel, C., et al. (2018). What have we learnt from EUPORIAS climate service prototypes? *Climate Services*, 9: 21–32. doi: 10.1016/j.cliser.2017.06.003.
- Camargo, S. J., Camp, J., Elsberry, R. L., Gregory, P. A., Klotzbach, P. J., Schreck, C. J., Sobel, A. H., Ventrice, M. J., Vitart, F., Wang, Z., Wheeler, M. C., Yamaguchi, M., et Zhan, R. (2019). Tropical cyclone prediction on subseasonal time-scales. *Tropical Cyclone Research and Review*, 8: 150–165. doi: 10.1016/j.tcr.2019.10.004.
- Cane, M. A., Zebiak, S. E., et Dolan, S. C. (1986). Experimental forecasts of El-Niño. *Nature*, 321: 827–832. doi: 10.1038/321827a0.
- Cuxart, J., Bougeault, P., et Redelsperger, J. L. (2000). A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126: 1–30.
- de Andrade, F. M., Coehlo, C. A. S., et Cavalcanti, I. F. A. (2019). Global precipitation hindcast quality assessment of the Subseasonal to Seasonal (S2S) prediction project models. *Climate Dynamics*, 52: 5451–5475. doi: 10.1007/s00382-018-4457-z.
- Domeisen, D. I., Butler, A. H., Charlton-Perez, A. J., Ayarzagüena, B., Baldwin, M. P., Dunn-Sigouin, E., Furtado, J. C., Garfinkel, C. I., Hitchcock, P., et Karpechko, A. Y. e. a. (2020). The role of the stratosphere in subseasonal to seasonal prediction: 2. Predictability arising from stratosphere-troposphere coupling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125. doi: 10.1029/2019JD030923.
- Domeisen, D. I. V., White, C., Afargan-Gerstman, H., Muñoz, A. G., Janiga, M. A., Vitart, F., Ole Wulff, C., Antoine, S., Ardilouze, C., Batté, L., Bloomfield, H. C., Brayshaw, D., Camargo, S. J., Charlton-Pérez, A., Collins, D., Cowan, T., del Mar Chaves, M., Ferranti, L., Gómez, R., Gonzalez, P. L. M., Gonzalez Romero, C., Infanti, J. M., Karozis, S., Kim, H., Kolstad, E. W., La-Joie, E., Lledó, L., Magnusson, L., Malguzzi, P., Manrique-Suñen, A., Mastrangelo, D., Materia, S., Medina, H., Palma, L., Pineda, L. E., Sfestos, A., Son, S.-W., Soret, A., Strazzo, S., et Tian,

- D. (2021). Advances in the subseasonal prediction of extreme events. *Bulletin of the American Meteorological Society*, submitted.
- Duchez, A., Frajka-Williams, E., Josey, S. A., Evans, D. G., Grist, J. P., Marsh, R., McCarthy, G. D., Sinha, B., Berry, D. I., et Hirschi, J. J.-M. (2016). Drivers of exceptionally cold North Atlantic Ocean temperatures and their link to the 2015 European heat wave. *Environmental Research Letters*, 11(7): 074004. doi: 10.1088/1748-9326/11/7/074004.
- Déqué, M. et Batté, L. (2015). A seasonal re-forecast of mid-latitude circulation over the 20th century. In WGNE, editor, *Blue Book*. URL https://www.wcrp-climate.org/WGNE/BlueBook/2015/individual-articles/06_deque_michel_20Century.pdf.
- Gerlak, A. K., Mason, S. J., Daly, M., Liverman, D., Guido, Z., Soares, M. B., Vaughan, C., Knudson, C., Greene, C., Buizer, J., et Jacobs, K. (2020). The Gnat and the Bull: Do climate outlook forums make a difference? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(6): E771 – E784. doi: 10.1175/BAMS-D-19-0008.1. URL <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/101/6/BAMS-D-19-0008.1.xml>.
- Guérémy, J.-F. (2011). A continuous buoyancy based convection scheme: one- and three-dimensional validation. *Tellus A*, 63: 687–706. doi: 10.1111/j.1600-0870.2011.00521.x.
- Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F. J., et Palmer, T. N. (2005). The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting - I. Basic concept. *Tellus A*, 57: 219–233. doi: 10.1111/j.1600-0870.2005.00103.x.
- Hauser, M., Orth, R., et Seneviratne, S. I. (2016). Role of soil moisture versus recent climate change for the 2010 heat wave in Western Russia. *Geophysical Research Letters*, 23(6): 2819–2826.
- Hemri, S., Bhend, J., Liniger, M. A., Manzanaras, R., Siegert, S., Stephenson, D. B., Gutiérrez, J. M., Brookshaw, A., et Doblas-Reyes, F. J. (2020). How to create an operational multi-model of seasonal forecasts? *Climate Dynamics*, 55: 1141–1157. doi: 10.1007/s00382-020-05314-2.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., Gu, G. J., Nelkin, E. J., Bowman, K. P., Hong, Y., Stocker, E. F., et Wolff, D. B. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8: 38–55. doi: 10.1175/Jhm560.1.
- Hurt, G. C., Chini, L., Sahajpal, R., S., F., Bodirsky, B. L., Calvin, K., Doelman, J. C., Fisk, J., et al. (2020). Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 13: 5425–5464. doi: 10.5194/gmd-13-5425-2020.
- Lafre, J.-P., Beucher, F., Peyrillé, P., Diongue-Niang, A., Chapelon, N., Bouniol, D., Caniaux, G., Favot, F., Ferry, F., Guichard, F., Poan, E., Roehrig, R., et Vischel, T. (2017). A multi-scale analysis of the extreme rain event of Ouagadougou in 2009. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143: 3094–3109. doi: 10.1002/qj.3165.
- Lefort, T. et Peyrillé, P. (2020). The 2020 monsoon over Asia and Africa: how well the S2S models performed. *S2S Newsletter*, 15. URL http://www.s2sprediction.net/file/newsletter/S2S_Newsletter15.pdf.

- Leroux, D. J., Munier, S., Habets, F., Besson, F., Rousset, F., Le Moigne, P., Vergnes, J.-P., Viennot, P., Etchevers, P., et Amraoui, N. (2019). Seasonal forecast of the groundwater resource in France. European Meteorological Society Annual Meeting. URL http://www.geosciences.ens.fr/wp-content/uploads/2019/09/LerouxDJ_GroundwaterSF_v3.pdf.
- Li, Y. et Schechmann, S. N. (2020). Predictability of tropical rainfall and waves: Estimates from observational data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146: 1668–1684. doi: 10.1002/qj.3759.
- Lopez, P. (2002). Implementation and validation of a new prognostic large-scale cloud and precipitation scheme for climate and data-assimilation purposes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128: 229–257.
- Madden, R. A. et Julian, P. R. (1971). Detection of a 40–50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific. *Journal of Atmospheric Sciences*, 28(5): 702 – 708. doi: 10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2.
- Mariotti, A., Baggett, C., Barnes, E. A., Becker, E., Butler, A., Collins, D. C., Dirmeyer, P. A., Ferranti, L., Johnson, N. C., Jones, J., et al. (2020). Windows of opportunity for skillful forecasts subseasonal to seasonal and beyond. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101: E869–E896.
- Materia, S., Ardilouze, C., Prodhomme, C., Donat, M., Doblas-Reyes, F., Benassi, M., Caron, L., Ruggieri, P., et Gualdi, S. (2021). Summer Temperature Response to Extreme Soil Conditions in the Mediterranean Transitional Zone. *Climate Dynamics*, in revision.
- Merryfield, W. J., Baehr, J., Batté, L., Becker, E. J., Butler, A. H., Coelho, C. A. S., Danabasoglu, G., Dirmeyer, P. A., Doblas-Reyes, F. J., Domeisen, D. I. V., Ferranti, L., Ilynia, T., Kumar, A., Muller, W. A., Rixen, M., Robertson, A. W., Smith, D. M., Takaya, Y., Tuma, M., Vitart, F., White, C. J., Alvarez, M. S., Ardilouze, C., Attard, H., Baggett, C., Balmaseda, M. A., Beraki, A. F., Bhattacharjee, P. S., Bilbao, R., de Andrade, F. M., DeFlorio, M. J., Diaz, L. B., Ehsan, M. A., Fragkoulidis, G., Grainger, S., Green, B. W., Hell, M. C., Infanti, J. M., Isensee, K., Kataoka, T., Kirtman, B. P., Klingaman, N. P., Lee, J.-Y., Mayer, K., McKay, R., Mecking, J. V., Miller, D. E., Neddermann, N., Ng, C. H. J., Ossò, A., Pankatz, K., Peatman, S., Pegion, K., Perlwitz, J., Recalde-Coronel, G. C., Reintges, A., Renkl, C., Solaraju-Murali, B., Spring, A., Stan, C., Sun, Y. Q., Tozer, C. R., Vigaud, N., Woolnough, S., et Yeager, S. (2020). Current and Emerging Developments in Subseasonal to Decadal Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(6): E869 – E896. doi: 10.1175/BAMS-D-19-0037.1.
- Mezzina, B., García-Serrano, J., Bladé, I., Palmeiro, F. M., Batté, L., Ardilouze, C., Benassi, M., et Gualdi, S. (2020). Multi-model assessment of the late-winter extra-tropical response to El Niño and La Niña. *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-020-05415-y.
- Mezzina, B., Palmeiro, F. M., García-Serrano, J., Bladé, I., Batté, L., et Benassi, M. (2021). Multi-model assessment of the late-winter stratospheric response to El Niño and La Niña. *Climate Dynamics*, in revision.
- Michou, M., Nabat, P., Saint-Martin, D., Bock, J., Decharme, B., Mallet, M., et al. (2020). Present-day and historical aerosol and ozone characteristics in CNRM CMIP6 simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12: e2019MS001816. doi: 10.1029/2019MS001816.

- Morin, S. (2020). PROSNOW: a novel climate service enabling realtime optimisation of snow management in mountain ski resorts through weather and seasonal forecasting, in-situ observations and snow cover modelling. *Project Repository Journal*, 7: 62–65. URL <https://edition.pagesuite-professional.co.uk/html5/reader/production/default.aspx?pubname=&edid=c2e20a7f-4d97-4ec6-b15e-ea040b9b71d7&pnum=62>.
- Nicolay, F. (2020). Initialisation couplée pour la prévision saisonnière : impact sur les interactions océan-atmosphère. Rapport de Master, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Pegion, K., Kirtman, B. P., Becker, E., Collins, D. C., LaJoie, E., Burgman, R., Bell, R., DelSole, T., Min, D., Zhu, Y., Li, W., Sinsky, E., Guan, H., Gottschalck, J., Metzger, E. J., Barton, N. P., Achuthavarier, D., Marshak, J., Koster, R. D., Lin, H., Gagnon, N., Bell, M., Tippett, M. K., Robertson, A. W., Sun, S., Benjamin, S. G., Green, B. W., Bleck, R., et Kim, H. (2019). The Subseasonal Experiment (SubX): A Multimodel Subseasonal Prediction Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100: 2043–2060. doi: 10.1175/BAMS-D-18-0270.1.
- Penny, S. G., Akella, S., Balmaseda, M. A., Browne, P., Carton, J. A., Chevallier, M., Counillon, F., Domingues, C., et al. (2019). Observational needs for improving ocean and coupled reanalysis, S2S prediction, and decadal prediction. *Frontiers in Marine Science*, 6: 391. doi: 10.3389/fmars.2019.00391.
- Prodhomme, C., Batté, L., Massonnet, F., Davini, P., Bellprat, O., Guemas, V., et Doblas-Reyes, F. (2016). Benefits of increasing the model resolution for the seasonal forecast quality in EC-Earth. *Journal of Climate*, 29(24): 9141–9162. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0117.1.
- Roehrig, R., Beau, I., Saint-Martin, D., Alias, A., Decharme, B., Guérémy, J.-F., Voldoire, A., Abdel-Lathif, A. Y., Bazile, E., Belamari, S., Blein, S., Bouniol, D., Bouteloup, Y., Cattiaux, J., Chauvin, F., Chevallier, M., Colin, J., Douville, H., Marquet, P., Michou, M., Nabat, P., Oudar, T., Peyrillé, P., Piriou, J.-M., Salas y Méliá, D., Séférian, R., et Sénési, S. (2020). The CNRM Global Atmosphere Model ARPEGE-Climat 6.3: Description and Evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7): e2020MS002075. doi: 10.1029/2020MS002075.
- Shukla, J. (1998). Predictability in the midst of chaos: a scientific basis for climate forecasting. *Science*, 282: 728–731. doi: 10.1126/science.282.5389.728.
- Souan, C. (2017). Impact de l'anomalie froide en Atlantique Nord sur les prévisions saisonnières de l'été 2015. Rapport de Master, Université Paul Sabatier / Ecole Nationale de la Météorologie, Toulouse, France.
- Specq, D. (2020). *Prévisibilité des fortes précipitations aux échéances infra-saisonnières sur le Pacifique Sud-Ouest tropical*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, France. URL <https://www.theses.fr/2020INPT0089>.
- Specq, D. et Batté, L. (2020). Improving subseasonal precipitation forecasts through a statistical–dynamical approach : application to the southwest tropical Pacific. *Climate Dynamics*, 55: 1913–1927. doi: 10.1007/s00382-020-05355-7.
- Specq, D., Batté, L., Déqué, M., et Ardilouze, C. (2020). Multimodel forecasting of precipitation at subseasonal timescales over the southwest tropical Pacific. *Earth and Space Science*, 7: e2019EA001003. doi: 10.1029/2019EA001003.

- Subramanian, A. C., Balmaseda, M. A., Centurioni, L., Chattopadhyay, R., Cornuelle, B. D., DeMott, C., Flatau, M., Fujii, Y., et al. (2019). Ocean observations to improve our understanding, modeling, and forecasting of subseasonal-to-seasonal variability. *Frontiers in Marine Science*, 6: 427. doi: 10.3389/fmars.2019.00427.
- Tietsche, S., Balmaseda, M., Zuo, H., Roberts, C., Mayer, M., et Ferranti, L. (2020). The importance of North Atlantic Ocean transports for seasonal forecasts. *Climate Dynamics*, 55: 1995–2011. doi: 10.1007/s00382-020-05364-6.
- Trenberth, K. E., Branstator, G. W., Karoly, D., Kumar, A., Lau, N.-C., et Ropelewski, C. (1998). Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 103: 14291–14324. doi: 10.1029/97JC01444.
- Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., et Lafaysse, M. (2017). The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geoscientific Model Development*, 10: 4257–4283. doi: 10.5194/gmd-10-4257-2017.
- Vergnes, J.-P., Roux, N., Habets, F., Ackerer, P., Amraoui, N., Besson, F., Caballero, Y., Courtois, Q., de Dreuzy, J.-R., Etchevers, P., Gallois, N., Leroux, D. J., Longuevergne, L., Le Moigne, P., Morel, T., Munier, S., Regimbeau, F., Thiéry, D., et Viennot, P. (2020). The AquIFR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France: evaluation over a 60-year period. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24: 633–654. doi: 10.5194/hess-24-633-2020.
- Viel, C., Beaulant, A.-L., Soubeyroux, J.-M., et Céron, J.-P. (2016). How seasonal forecast could help a decision maker: an example of climate service for water resource management. *Advances in Science and Research*, 13: 51–55. doi: 10.5194/asr-13-51-2016.
- Vitart, F., Robertson, A., et Anderson, D. (2012). Sub-seasonal to Seasonal Prediction Project: bridging the gap between weather and climate. *WMO Bulletin*, 61: 23–28.
- Vitart, F., Ardilouze, C., Bonet, A., Brookshaw, A., Chen, M., Codorean, C., Déqué, M., Ferranti, L., Fucile, E., Fuentes, M., et al. (2017). The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1): 163–173.
- Vogel, P., Knippertz, P., Fink, A. H., Schlueter, A., et Gneiting, T. (2018). Skill of global raw and postprocessed ensemble predictions of rainfall over northern tropical Africa. *Weather and Forecasting*, 33: 369–388. doi: 10.1175/WAF-D-17.0127.1.
- Voldoire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin, J., Guérémy, J.-F., Michou, M., Moine, M.-P., Nabat, P., Roehrig, R., Salas y Méliá, D., Sférian, R., Valcke, S., Beau, I., Belamari, S., Berthet, S., Cassou, C., Cattiaux, J., Deshayes, J., Douville, H., Ethé, C., Franchistéguy, L., Geoffroy, O., Lévy, C., Madec, G., Meurdesoif, Y., Msadek, R., Ribes, A., Sanchez-Gomez, E., Terray, L., et Waldman, R. (2019). Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(7): 2177–2213. doi: 10.1029/2019MS001683.
- Volpi, D., Batté, L., Guérémy, J.-F., et Déqué, M. (2020). Teleconnection-based evaluation of seasonal forecast quality. *Climate Dynamics*, 55: 1353–1365. doi: 10.1007/s00382-020-05327-x.

- Weisheimer, A., Palmer, T. N., et Doblas-Reyes, F. J. (2011). Assessment of representations of model uncertainty in monthly and seasonal forecast ensembles. *Geophysical Research Letters*, 38. doi: 10.1029/2011gl048123.
- Weisheimer, A., Schaller, N., O'Reilly, C., MacLeod, D. A., et Palmer, T. (2017). Atmospheric seasonal forecasts of the twentieth century: multi-decadal variability in predictive skill of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) and their potential value for extreme event attribution. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143: 917–926. doi: 10.1002/qj.2976.