



La prévision infra-saisonnière et saisonnière avec des modèles de climat

Questions scientifiques et considérations pratiques

Damien Specq

CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

Contact: damien.specq@meteo.fr

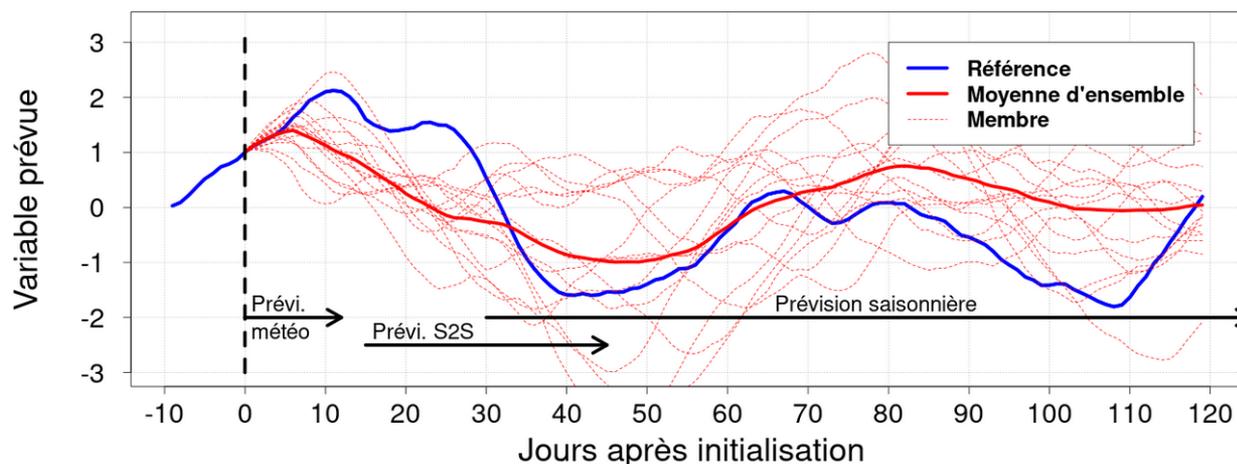
*Remerciements : C. Ardilouze, L. Batté, J. Beuvier, L. Dorel, J-F. Guérémy, F. Thottuvilampil,
équipe DCSC/ACS*

Colloque « Prévisibilité dans les sciences de l'atmosphère, de l'océan et du climat »

Paris, 2 octobre 2023

Prévisions saisonnières et S2S à Météo-France

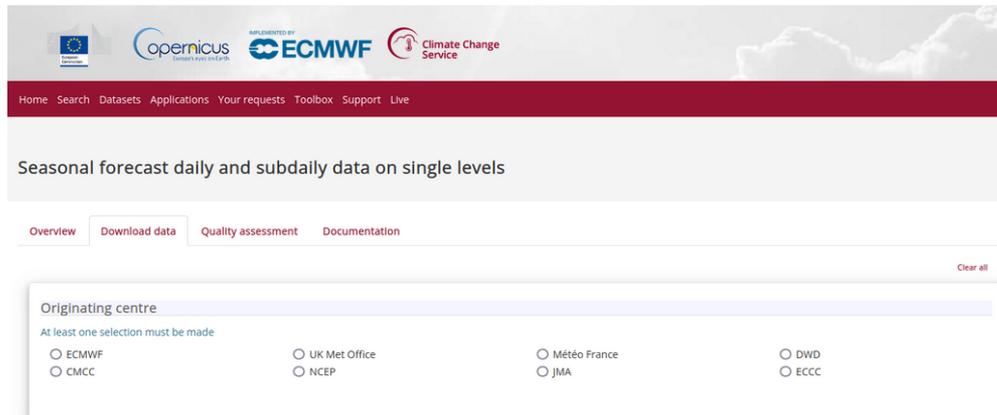
- Météo-France (CNRM) produit des prévisions saisonnières et infra-saisonnières (S2S) avec son modèle de climat couplé (CNRM-CM)
- Prévisions = **simulation + initialisation temps réel + ensembles**
- Prévisions comparées à des re-prévisions (i.e initialisées dans le passé)



Type de prévision	Infra-saisonnière (S2S)	Saisonnière
Durée couverte par la simulation	45 jours	7 mois
Périodes cibles (moyenne)	Semaines S2, S3, S4, etc.	Mois M2-M4
Fréquence d'actualisation	1 fois par semaine	1 fois par mois

Et qu'est-ce qu'on en fait ?

- Fournisseur de données : Copernicus C3S (saisonnier), S2S (infra-saisonnier)
- Évaluation, vérification
- Études scientifiques (ex : analyses de sensibilité, expériences idéalisées)
- Bulletins de prévision saisonnière (1 par mois)



The screenshot shows the Copernicus C3S website interface. At the top, there are logos for the European Union, Copernicus, ECMWF, and Climate Change Service. Below the logos is a navigation bar with links: Home, Search, Datasets, Applications, Your requests, Toolbox, Support, Live. The main heading is 'Seasonal forecast daily and subdaily data on single levels'. Below this is a tabbed interface with 'Download data' selected. A filter dropdown for 'Originating centre' is open, showing a list of radio button options: ECMWF, CMCC, UK Met Office, NCEP, Météo France, JMA, DWD, and ECCC. A 'Clear all' link is visible in the top right corner of the filter dropdown.



Météo-France Seasonal Forecast Bulletin

SEPTEMBER - OCTOBER - NOVEMBER 2023

Sommaire

Introduction

I- Pourquoi ça peut marcher : les sources de prévisibilité

II- De quelles informations le modèle dispose-t-il ? : l'initialisation des prévisions

III- Les modèles profitent-ils des sources de prévisibilité ?

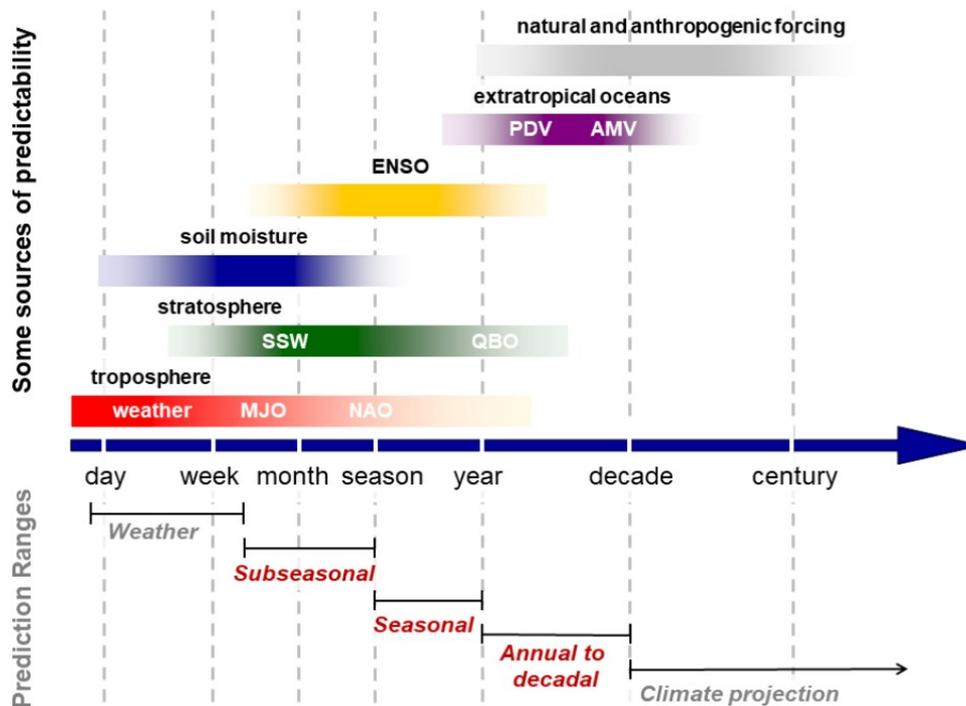
IV- Vers le temps réel : quand avoir confiance dans la prévision ?

Nos perspectives

Pourquoi ça peut marcher

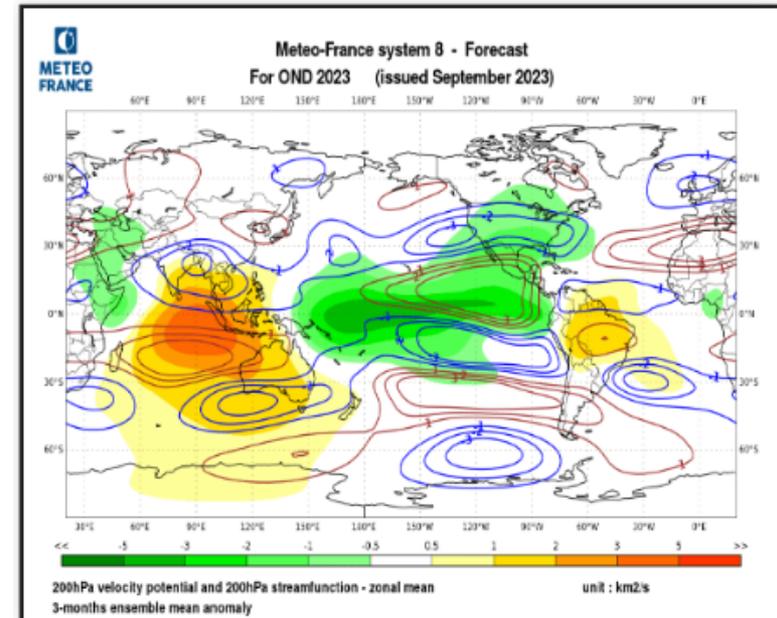
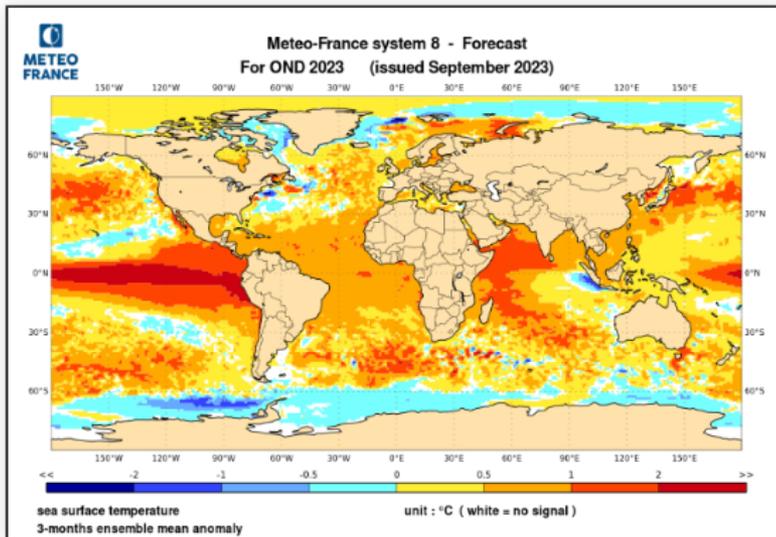
...malgré le chaos atmosphérique

- Atmosphère contrainte par ses **conditions aux limites**, qui **varient plus lentement** qu'elle : océan, glace de mer, couverture neigeuse, humidité des sols
- Certaines **évolutions prévisibles** au-delà de quelques jours : phénomènes propagatifs, état de la stratosphère
- Pas tout le temps, pas partout



Températures de surface de l'océan

- Condition limite contraignant le climat, localement ou via des téléconnexions, à échelle de temps de plusieurs mois

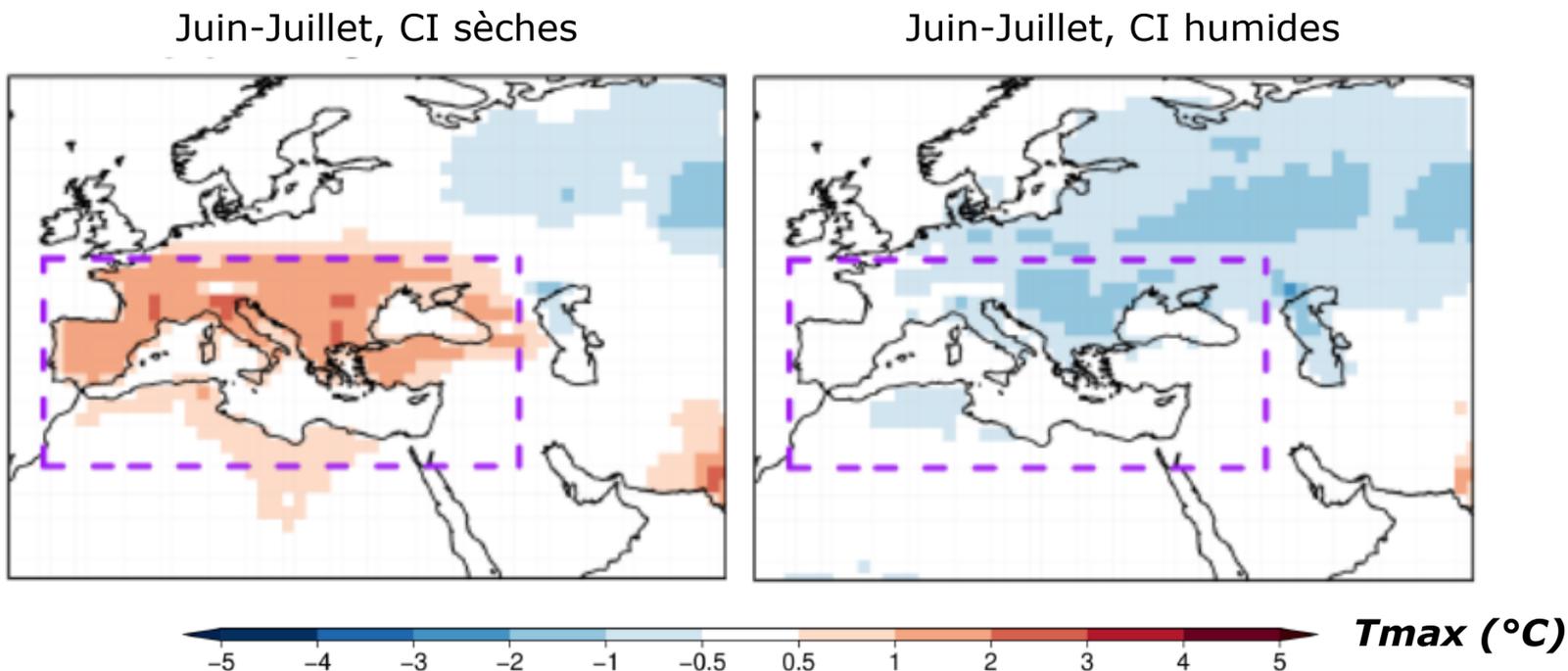


*Anomalies de température de surface de l'océan prévues pour OND 2023
→ Anomalies chaudes El Niño au centre et à l'est du Pacifique équatorial*

*Anomalies de potentiel de vitesse et de fonction de courant à 200 hPa prévues pour OND 2023
→ Ascendance et subsidence liées à El Niño*

Conditions d'humidité des sols

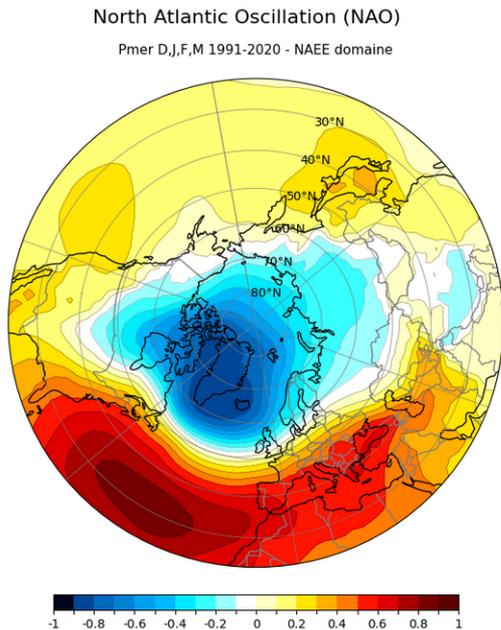
- Condition limite variant lentement contraignant le climat local sur plusieurs semaines à 2-3 mois



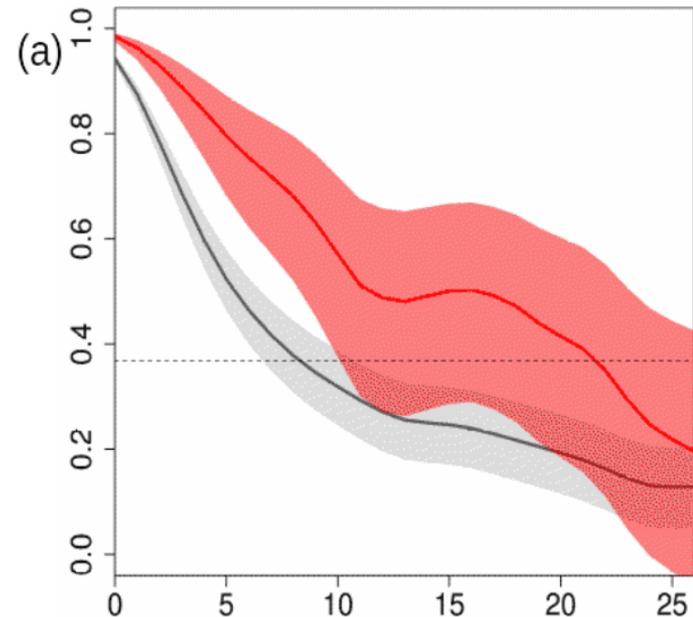
Thèse C. Ardilouze (2019) : Anomalies de température maximale journalière (Tmax, °C) en Juin-Juillet pour des simulations initialisées au 1^{er} mai avec des conditions initiales sèches (à gauche) et humides (à droite)

Régimes de circulation persistants

- Les circulations de type Oscillation Nord-Atlantique positive (NAO+) ou négative (NAO-) marquée ont tendance à persister plusieurs semaines



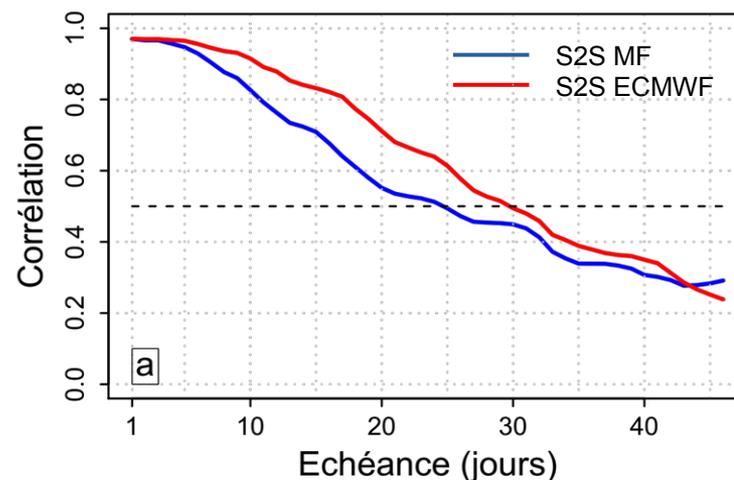
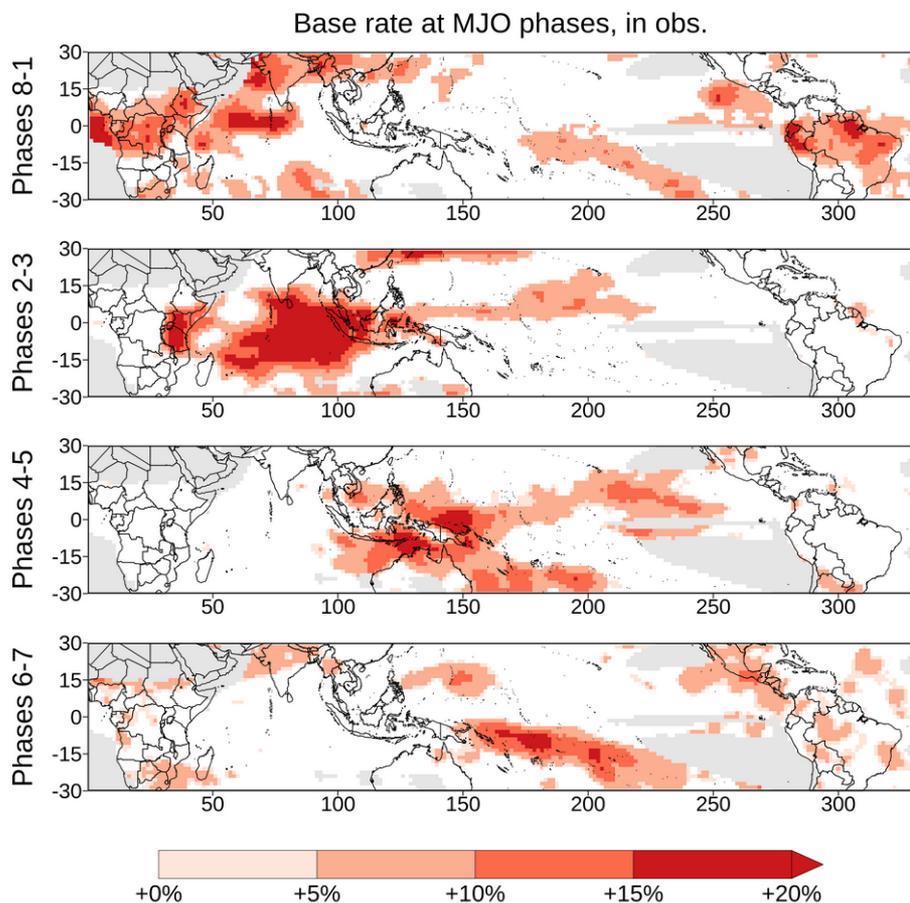
Pattern d'anomalie de pression de surface liée à la phase positive de la NAO



Ardilouze et al (2021) : Autocorrélation entre l'indice NAO à $t=0$ et à échéance t , dans le cas où la NAO à $t=0$ est intense (rouge) et sur l'ensemble des cas (gris)

Oscillation de Madden-Julian

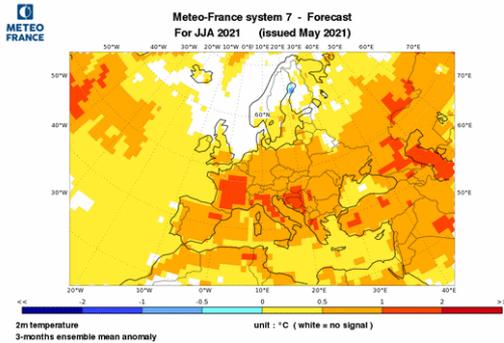
- Phénomène propagatif autour du globe entre 30 et 90 jours, module la convection
- Phénomène intermittent



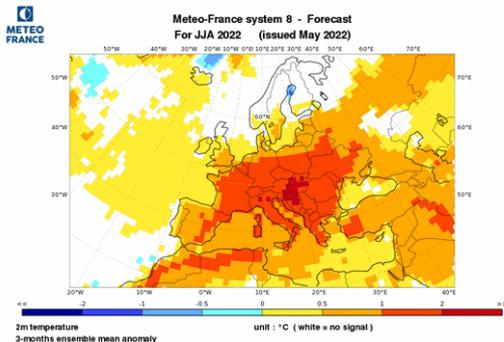
▲ Capacité des modèles S2S à prévoir la MJO selon l'échéance (corrélacion bivariee des indices RMM)

◀ Modulation de l'occurrence de fortes précipitations hebdomadaires (> 80ème percentile) avec la propagation de l'oscillation de Madden-Julian

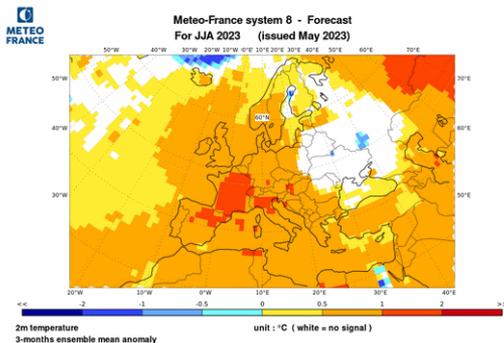
Et la tendance climatique au réchauffement ?



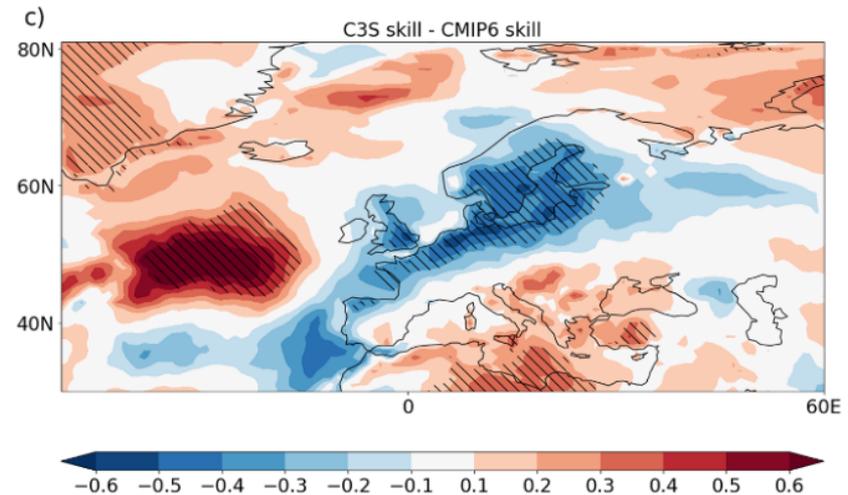
Prévision
JJA 2021



Prévision
JJA 2022



Prévision
JJA 2023



Patterson et al (2022) : Différence de corrélation avec les observations de température pour JJA entre des prévisions saisonnières (C3S) et des projections climatiques (CMIP)

→ Nécessité de **quantifier la contribution du changement climatique** dans la prévision



Sommaire

Introduction

I- Pourquoi ça peut marcher : les sources de prévisibilité

**II- De quelles informations le modèle dispose-t-il ? :
l'initialisation des prévisions**

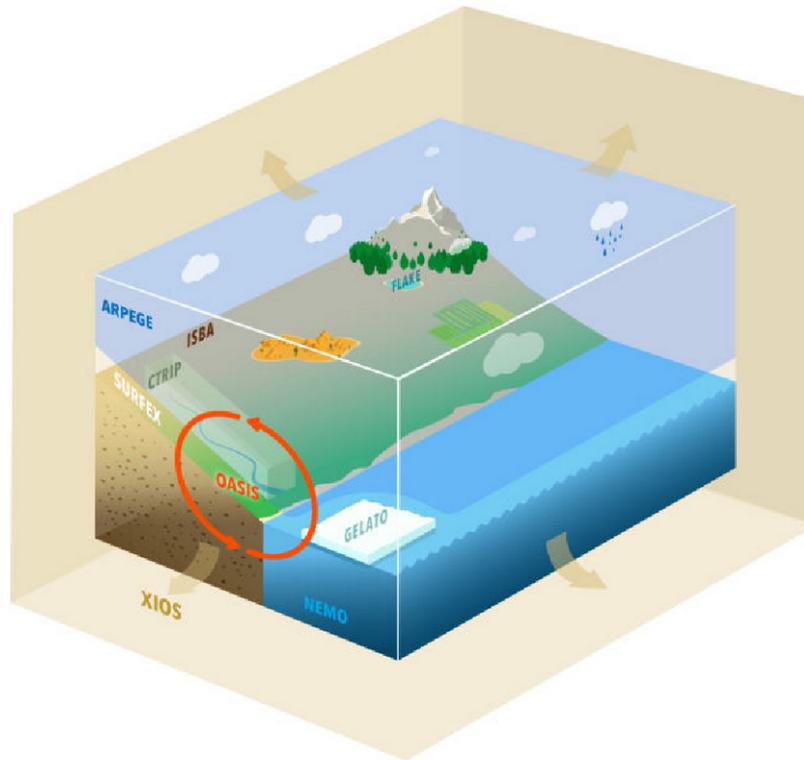
III- Les modèles profitent-ils des sources de prévisibilité ?

IV- Vers le temps réel : quand avoir confiance dans la prévision ?

Nos perspectives

Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Pas de système d'assimilation de données → Utilisation de données disponibles en temps réel

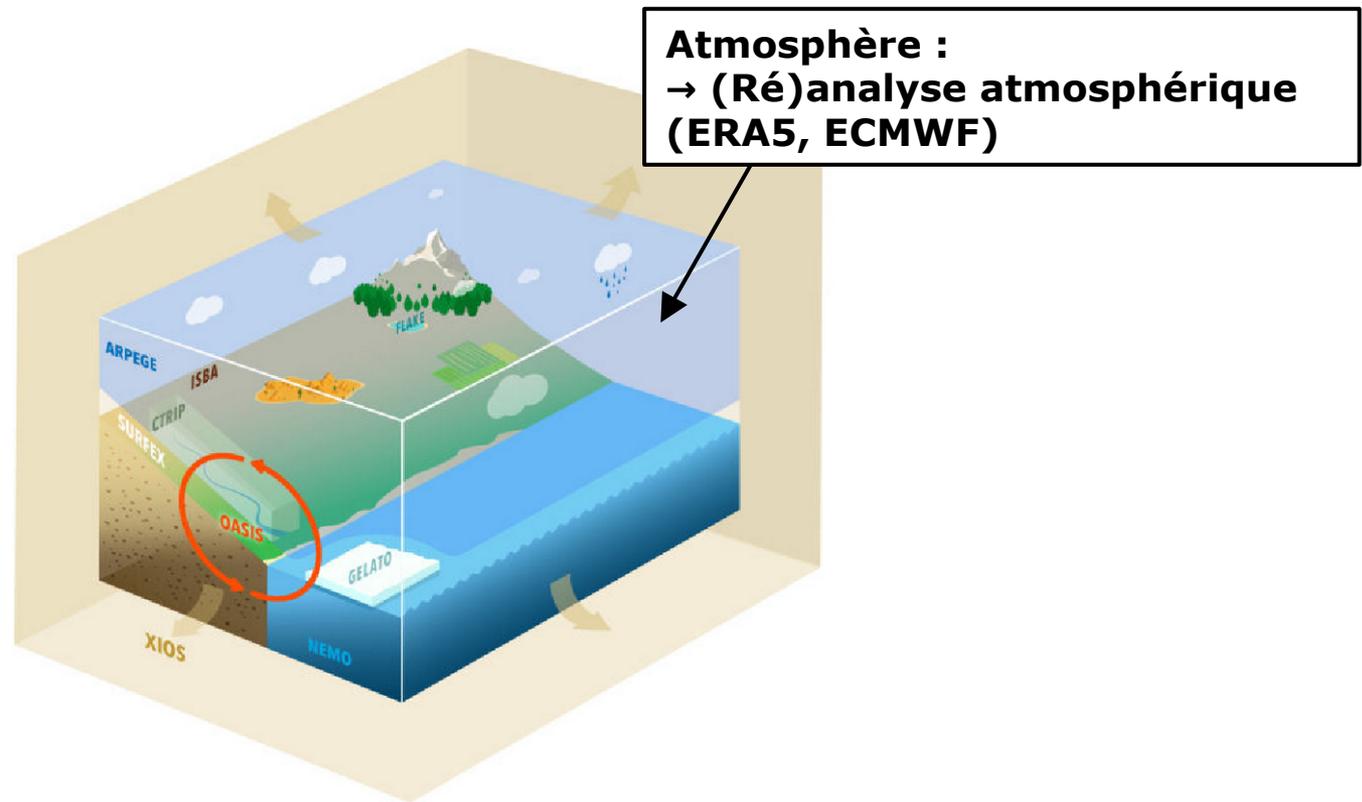


CNRM-CM

Voldoire et al (2019)

Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Pas de système d'assimilation de données → Utilisation de données disponibles en temps réel



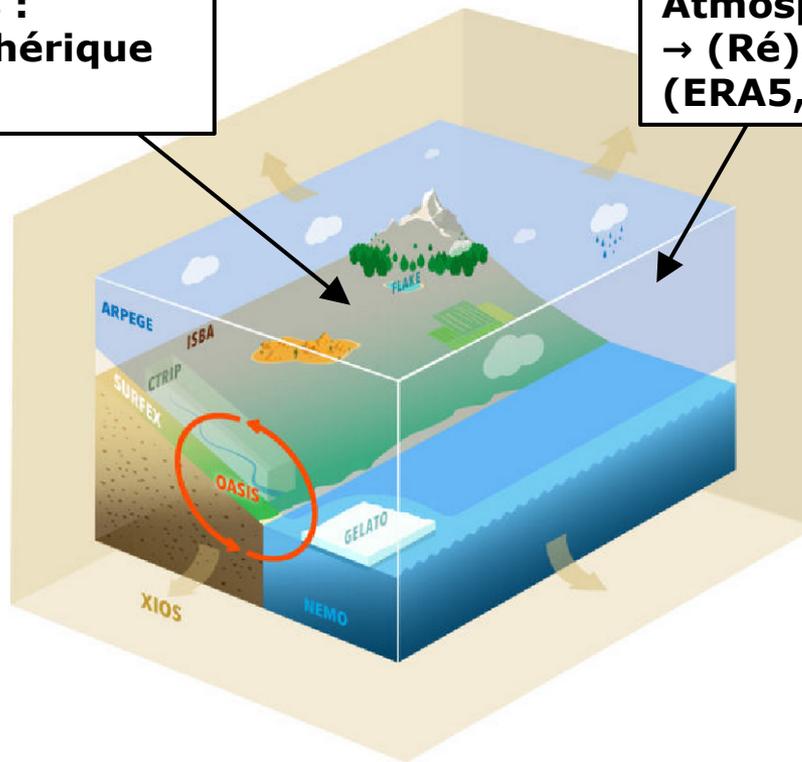
CNRM-CM

Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Pas de système d'assimilation de données → Utilisation de données disponibles en temps réel

Surfaces continentales :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)

Atmosphère :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)



CNRM-CM

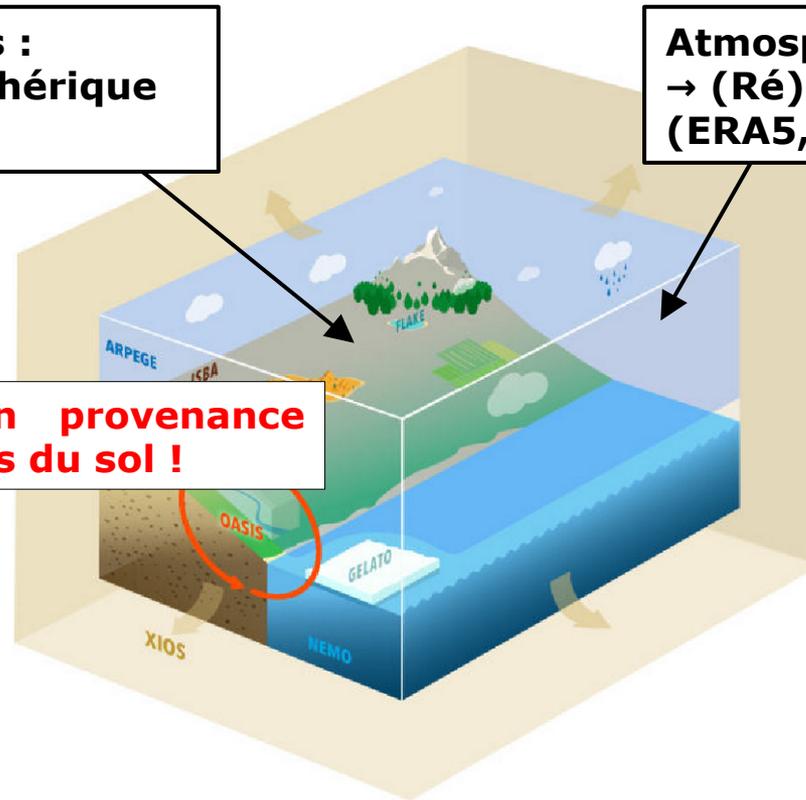
Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Pas de système d'assimilation de données → Utilisation de données disponibles en temps réel

Surfaces continentales :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)

Atmosphère :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)

**Pas d'information en provenance
d'observations directes du sol !**



CNRM-CM

CNRM-CM en mode « prévision » : initialisation

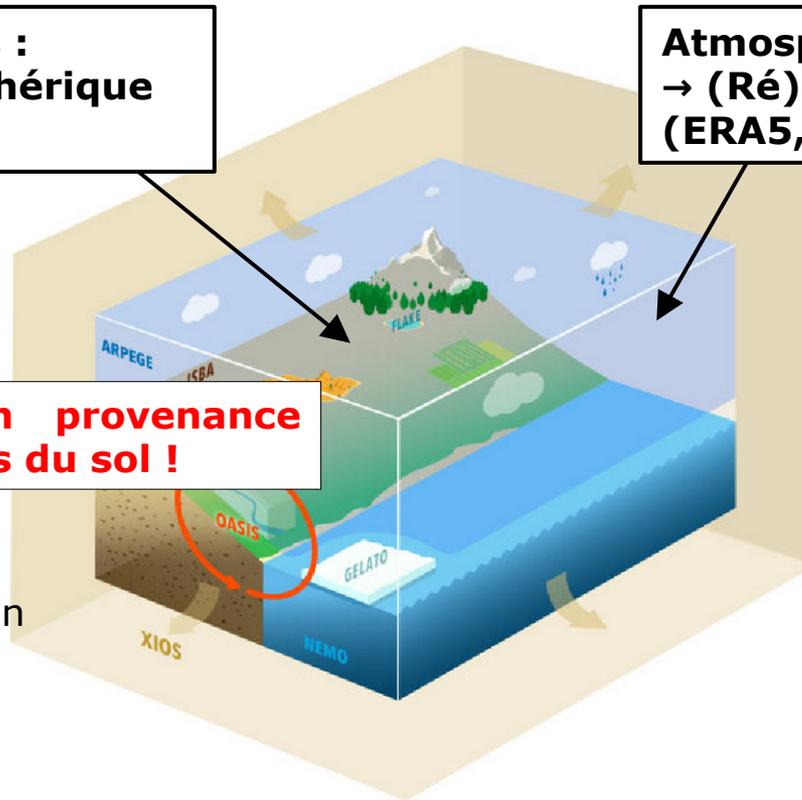
➤ Pas de système d'assimilation de données → Utilisation de données disponibles en temps réel

Surfaces continentales :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)

Atmosphère :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)

**Pas d'information en provenance
d'observations directes du sol !**

Projet CERISE : utilisation
d'une réanalyse de sol
plus réaliste



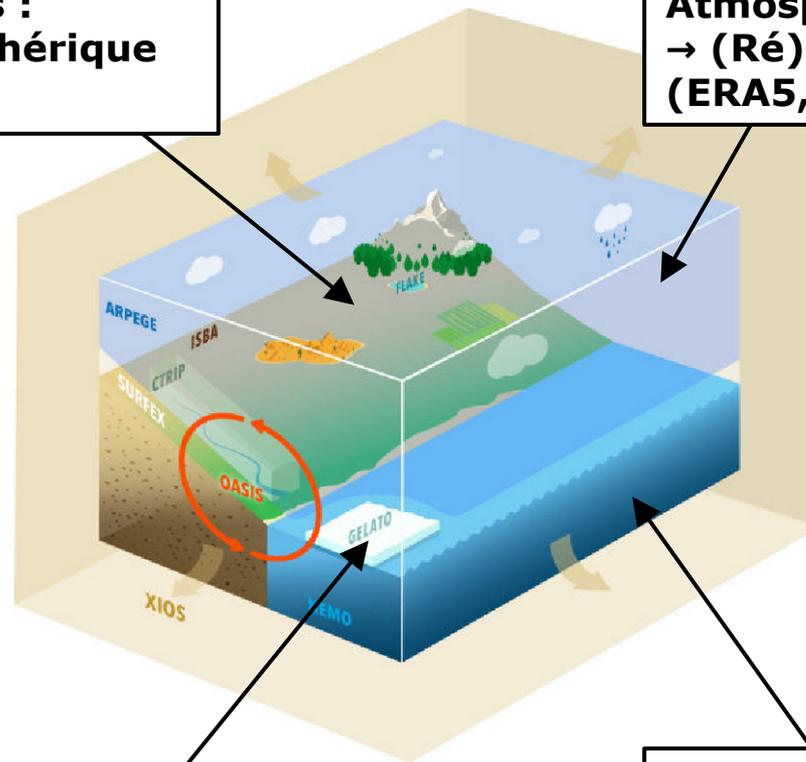
CNRM-CM

Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Pas de système d'assimilation de données → Utilisation de données disponibles en temps réel

Surfaces continentales :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)

Atmosphère :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)



CNRM-CM

Glace de mer

Océan liquide :
→ (Ré)analyse océanique
(Mercator Océan International)

Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Pas de système d'assimilation de données → Utilisation de données disponibles en temps réel

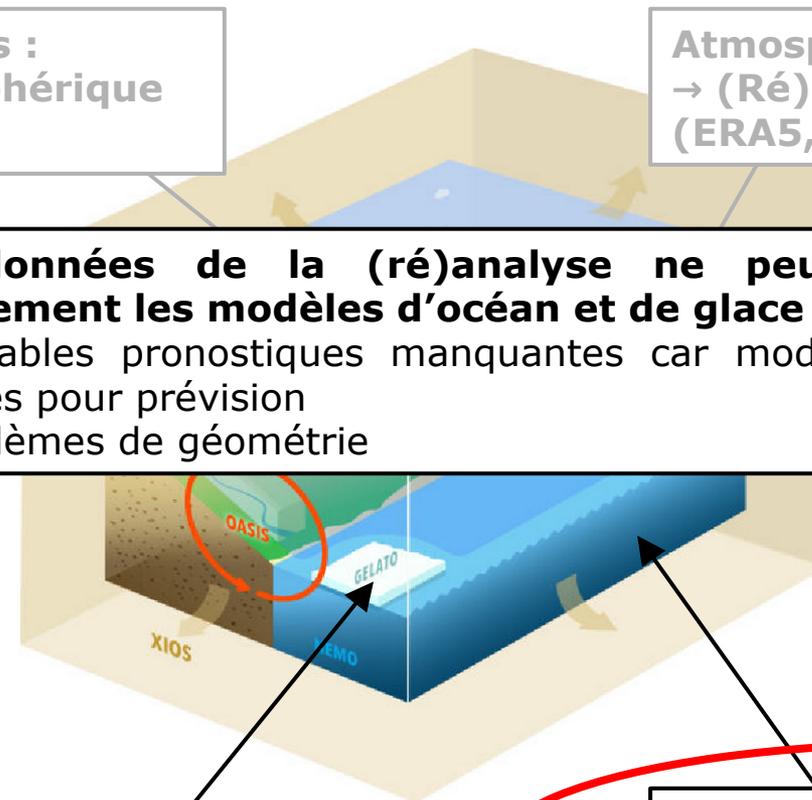
Surfaces continentales :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)

Atmosphère :
→ (Ré)analyse atmosphérique
(ERA5, ECMWF)



Les données de la (ré)analyse ne peuvent pas initialiser directement les modèles d'océan et de glace :

- Variables pronostiques manquantes car modèles pour réanalyse ≠ modèles pour prévision
- Problèmes de géométrie



CNRM-CM

Glace de mer

Océan liquide :
→ (Ré)analyse océanique
(Mercator Océan International)

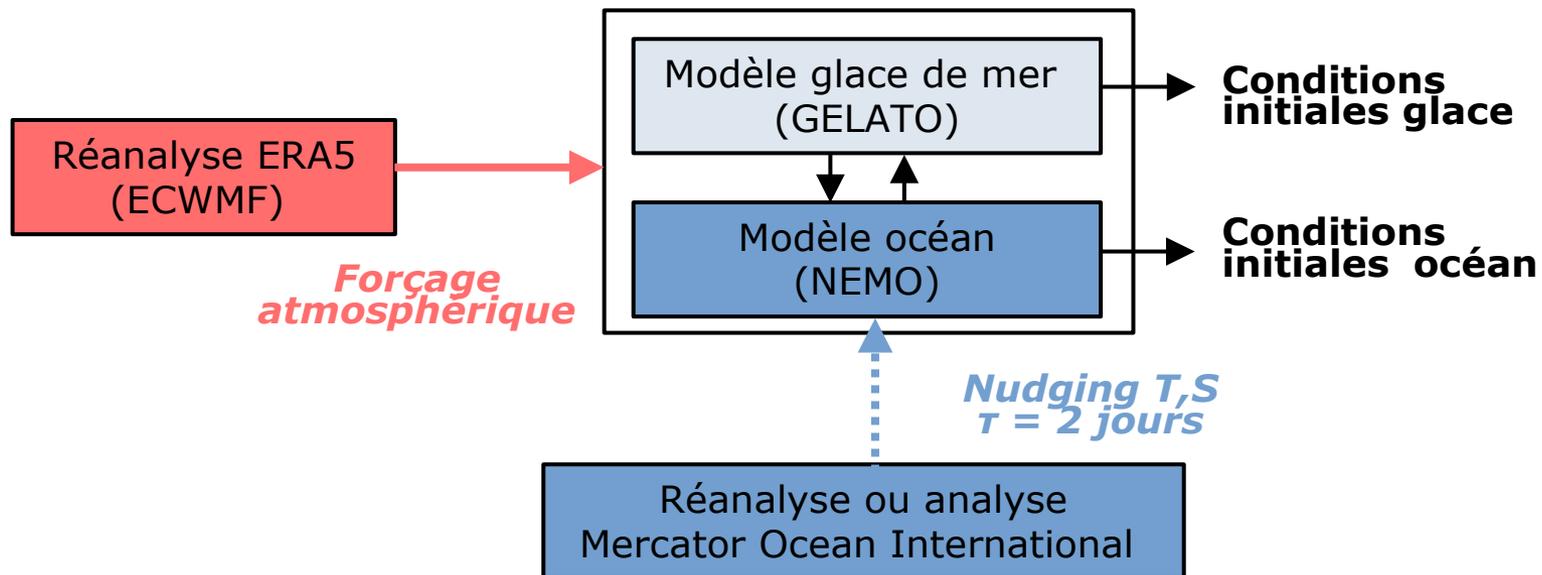
Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Utilisation d'une **simulation préparatoire** = intégration continue d'un modèle qui fournit des états initiaux cohérents
- « Assimilation de données du pauvre »

Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Utilisation d'une **simulation préparatoire** = intégration continue d'un modèle qui fournit des états initiaux cohérents
- « Assimilation de données du pauvre »

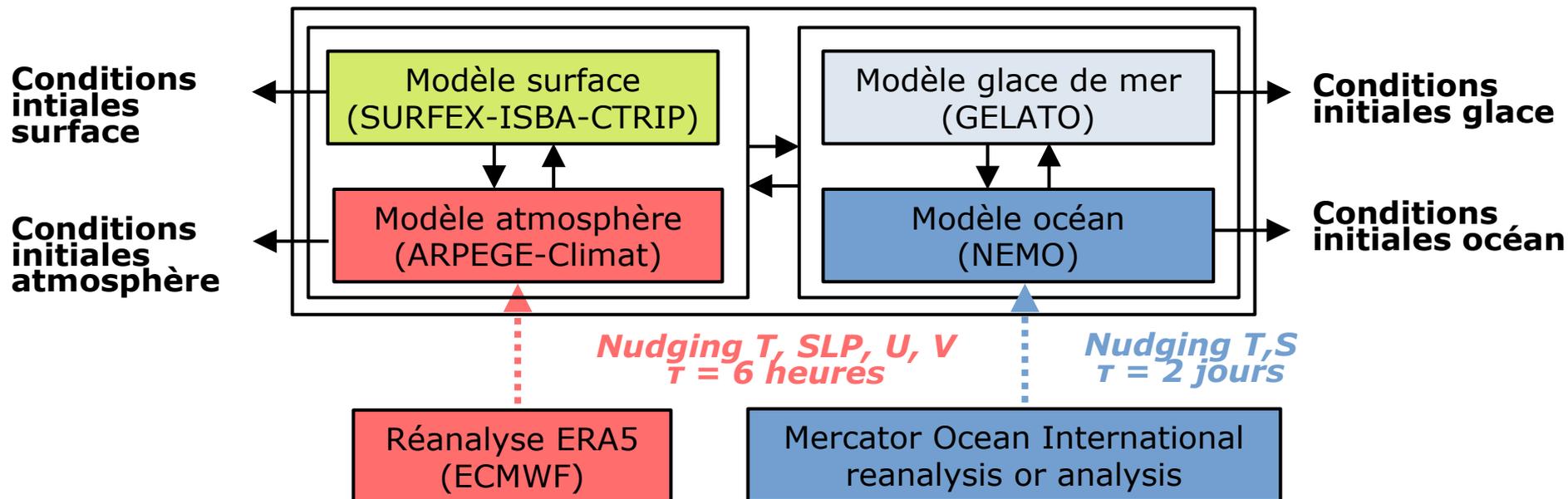
Option 1 : Le run océanique « forcé » et « nudgé »



Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Utilisation d'une **simulation préparatoire** = intégration continue d'un modèle qui fournit des états initiaux cohérents
- « Assimilation de données du pauvre »

Option 2 : Le run CNRM-CM « couplé » et « nudgé »

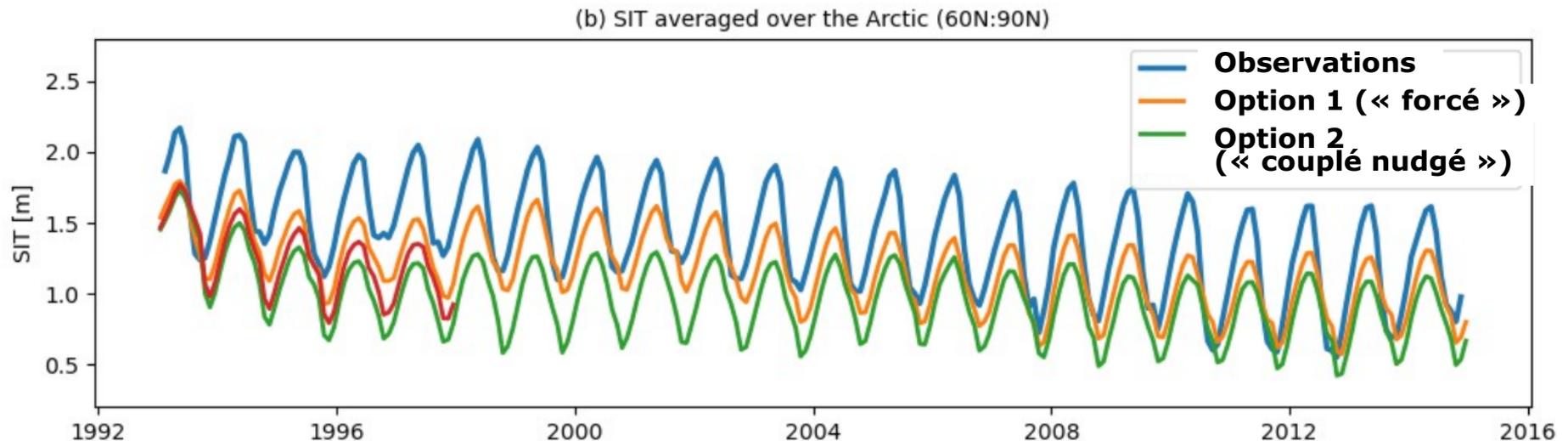


Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Initialisation océan et glace → **2 options** de simulation préparatoire
- Option 1 (« forcé » et « nudgé ») plus simple
- Option 2 (run « couplé nudgé ») plus satisfaisante sur le papier
- **Mais avec l'option 2...**

Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Initialisation océan et glace → **2 options** de simulation préparatoire
- Option 1 (« forcé » et « nudgé ») plus simple
- Option 2 (run « couplé nudgé ») plus satisfaisante sur le papier
- **Mais avec l'option 2...**
- **...états initiaux de glace moins réalistes que l'option 1**

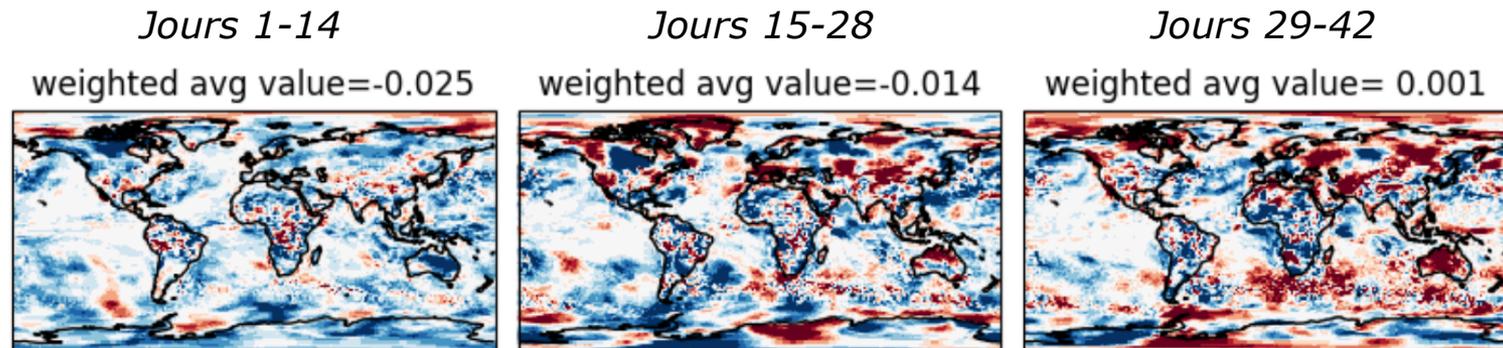


Evolution de l'épaisseur de glace de mer moyennée sur l'Arctique entre 1993 et 2015 dans les observations et dans les deux simulations préparatoires

Initialiser CNRM-CM en mode « prévision »

- Initialisation océan et glace → **2 options** de simulation préparatoire
- Option 1 (« forcé » et « nudgé ») plus simple
- Option 2 (run « couplé nudgé ») plus satisfaisante sur le papier
- **Mais avec l'option 2...**
- **...bénéfices incertains sur les premières semaines d'échéance (S2S)**

Scores de corrélation : Option 2 – Option 1



C. Ardilouze : Différences de scores de corrélation de prévisions initialisées. T2m en été (JJA).

Initialiser CNRM-CM en mode « prévision » : bilan

- Initialisation **cruciale pour notre capacité prédictive**, pas seulement pour l'atmosphère mais aussi **pour les autres composantes qui vont la contraindre**
- CNRM-CM pas pensé pour cela initialement (pas de chaîne d'assimilation)
- Nécessite des solutions alternatives pour **préparer des états initiaux cohérents entre les composantes**
- La solution **la plus satisfaisante théoriquement peut s'avérer moins performante** et/ou moins pratique à mettre en œuvre
- Problématiques et solutions assez similaires (run préliminaire, nudging) pour la **génération d'un ensemble**

Sommaire

Introduction

I- Pourquoi ça peut marcher : les sources de prévisibilité

II- De quelles informations le modèle dispose-t-il ? : l'initialisation des prévisions

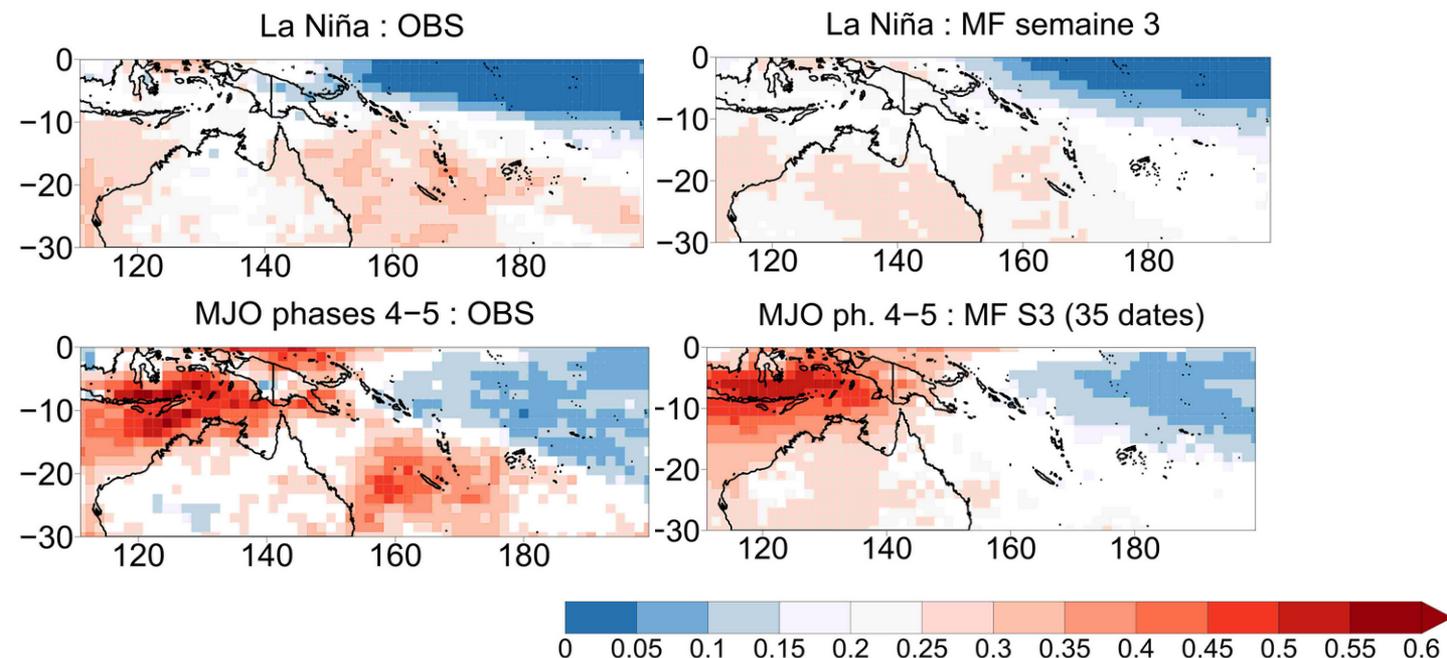
III- Les modèles profitent-ils des sources de prévisibilité ?

IV- Vers le temps réel : quand avoir confiance dans la prévision ?

Nos perspectives

Les modèles représentent-ils correctement les impacts des phénomènes prévisibles ?

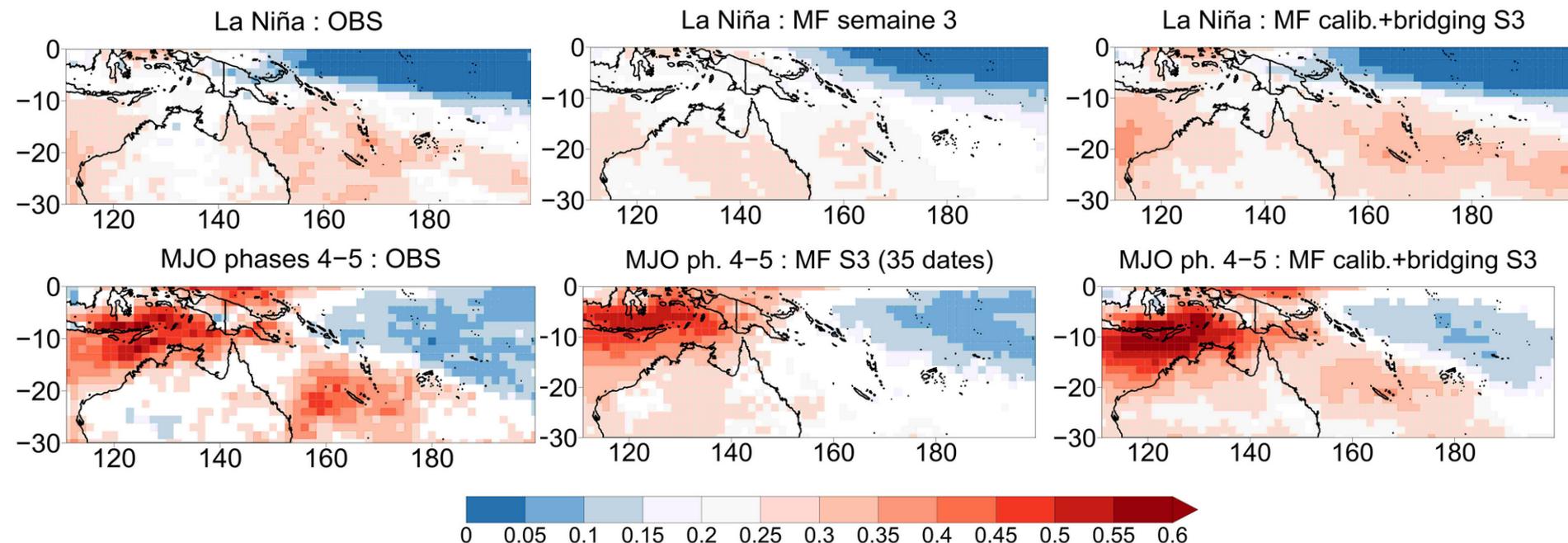
- Plus ou moins bien selon le phénomène, la variable cible, la région d'intérêt, etc.



Thèse D. Specq (2020) : Fréquence d'occurrence du quintile supérieur des précipitations hebdomadaires dans les observations (GPCP) et dans les prévisions S2S de Météo-France en semaine 3, associée au phénomène La Nina (en haut) et aux phases 4-5 de la MJO.

Les modèles représentent-ils correctement les impacts des phénomènes prévisibles ?

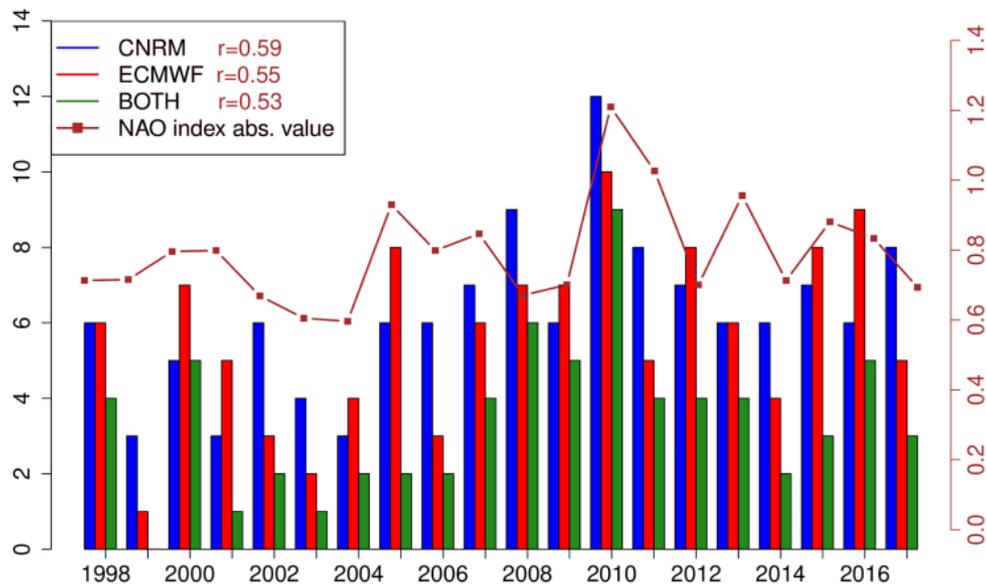
- Plus ou moins bien selon le phénomène, la variable cible, la région d'intérêt, etc.
- Un post-traitement peut les aider à être plus cohérent avec les impacts observés



Thèse D. Specq (2020) : Fréquence d'occurrence du quintile supérieur des précipitations hebdomadaires dans les observations (GPCP) et dans les prévisions S2S de Météo-France en semaine 3, associée au phénomène La Nina (en haut) et aux phases 4-5 de la MJO.

Un précurseur favorable entraîne-t-il de meilleures prévisions ?

➤ Exemple 1 : oscillation Nord-Atlantique et températures sur l'Europe aux échéances infra-saisonniers



Liens entre nombre de prévisions réussies (pattern T2m Europe, semaine 3) et intensité de la NAO à l'initialisation. Ardilouze et al (2021)

Un précurseur favorable entraîne-t-il de meilleures prévisions ?

➤ Exemple 2 : oscillation de Madden-Julian et fortes précipitations tropicales, un équilibre entre événements détectés et fausses alertes

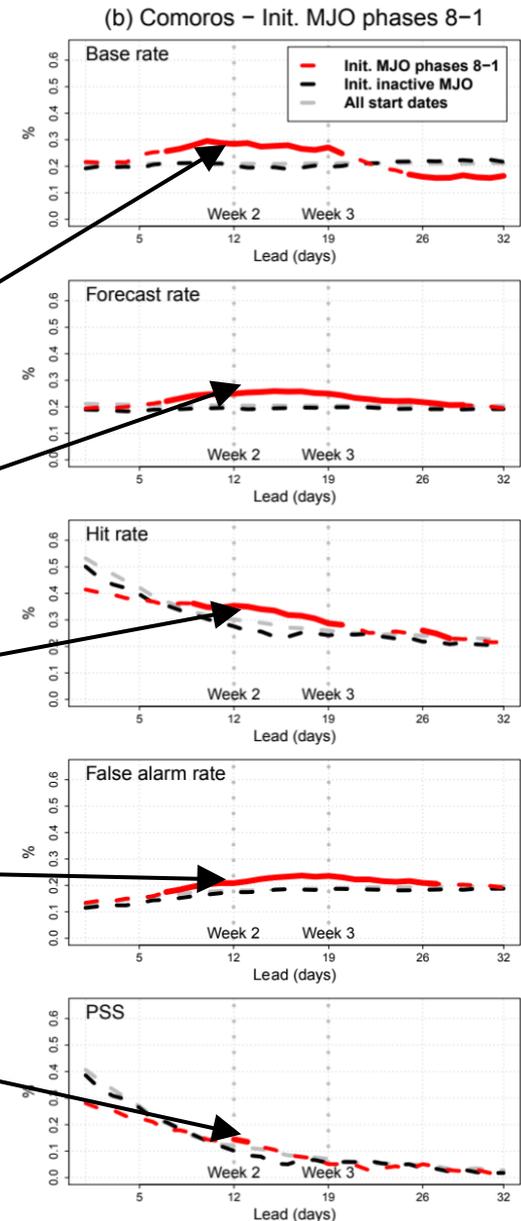
Augmentation des fortes précipitations sur les Comores deux semaines après les phases MJO 8-1

Assez bien représentée dans les prévisions S2S (ECMWF)

Plus d'événements détectés en semaine 2 qu'en MJO inactive

Mais plus de fausses alertes aussi !

Le score résultant n'est pas plus élevé qu'en l'absence de signal



Les modèles profitent-ils des sources de prévisibilité ?

- Oui, mais **de manière très imparfaite**
- Possibilités d'exploiter davantage les sources de prévisibilité en complétant avec un modèle statistique « en bout de chaîne »
- Les bénéfices dépendent aussi des **choix de vérification** (événement visé, domaine d'étude, score considéré, etc.)
- Le plus important est de pouvoir invoquer ces sources de prévisibilité **en temps réel**

Sommaire

Introduction

I- Pourquoi ça peut marcher : les sources de prévisibilité

II- De quelles informations le modèle dispose-t-il ? : l'initialisation des prévisions

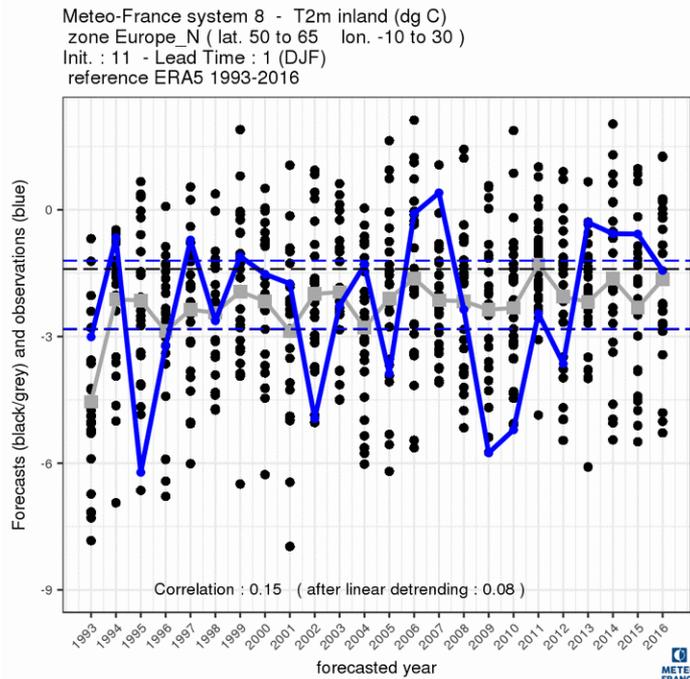
III- Les modèles profitent-ils des sources de prévisibilité ?

IV- Vers le temps réel : quand avoir confiance dans la prévision ?

Nos perspectives

Une qualité intermittente

- Performances moyennes des prévisions infra-saisonnnières ou saisonnières relativement modestes...
- ...mais des situations avec signal prévisible à longue échéance → « **fenêtres d'opportunité** » (Mariotti et al. 2020)
- Nécessité de dire *a priori* **la confiance** que l'on a dans la prévision quand elle sort



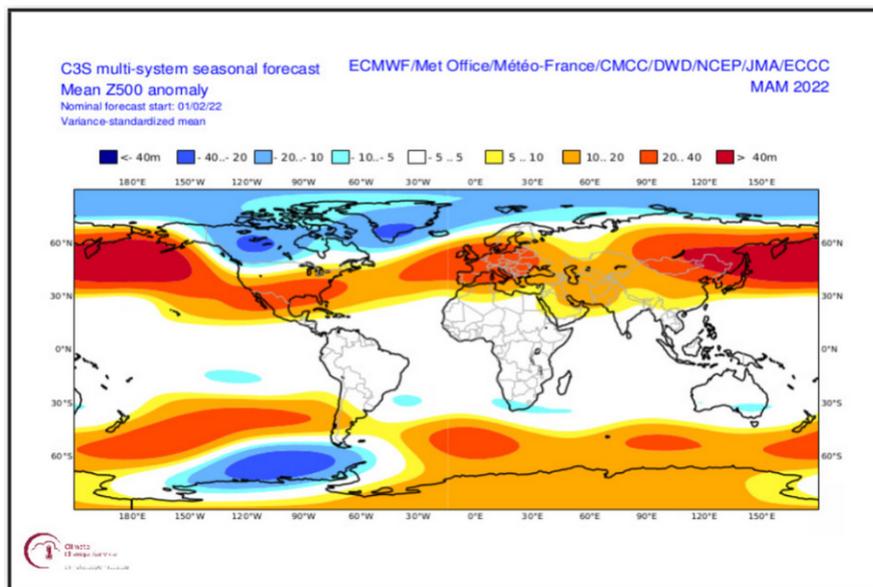
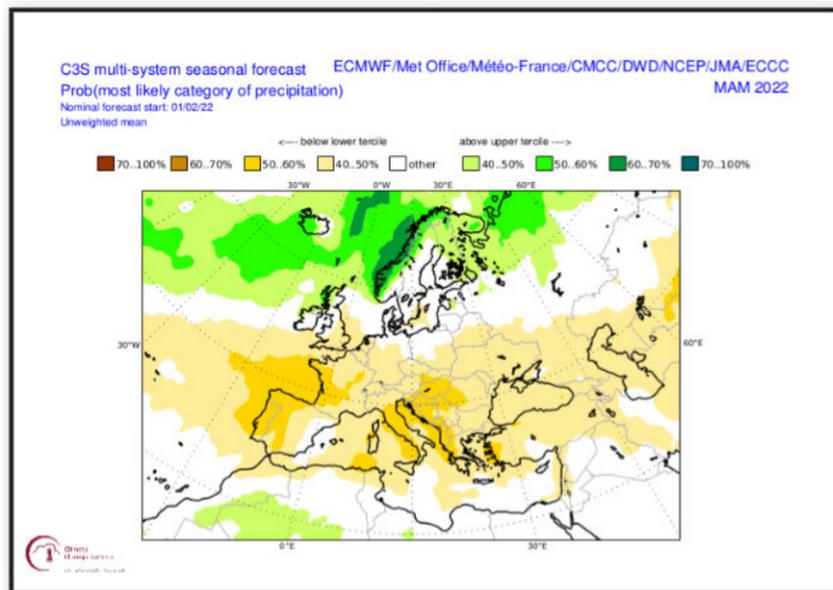
BAMS
Article

Windows of Opportunity for Skillful Forecasts Subseasonal to Seasonal and Beyond

Annarita Mariotti, Cory Baggett, Elizabeth A. Barnes, Emily Becker,
Amy Butler, Dan C. Collins, Paul A. Dirmeyer, Laura Ferranti, Nathaniel C. Johnson,
Jeanine Jones, Ben P. Kirtman, Andrea L. Lang, Andrea Molod, Matthew Newman,
Andrew W. Robertson, Siegfried Schubert, Duane E. Waliser, and John Albers

Quand avoir confiance dans la prévision ?

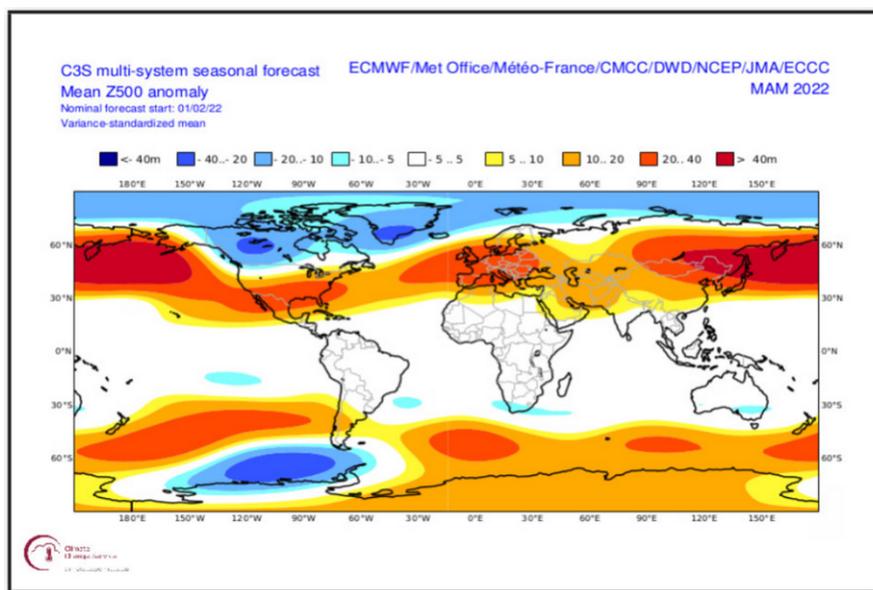
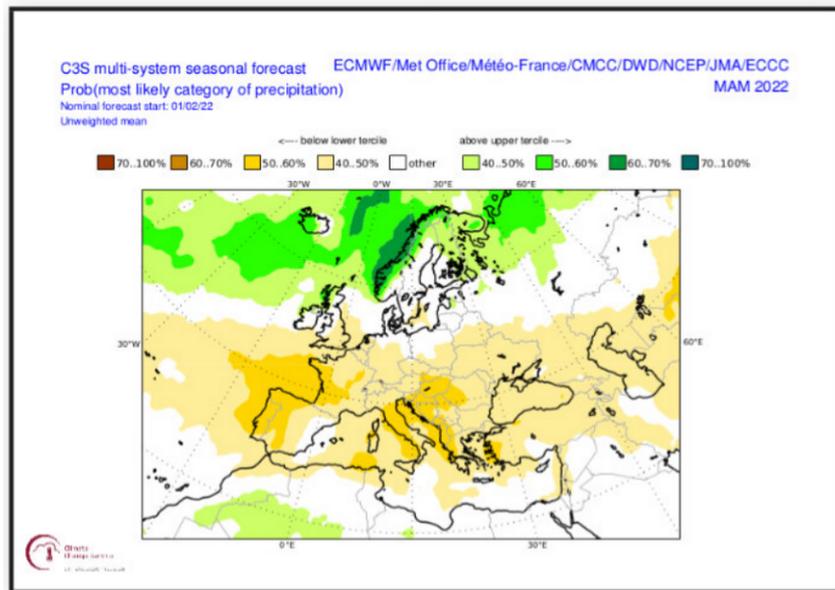
- **Approche 1** : Lorsqu'elle prévoit un **signal fort** en s'écartant significativement de sa climatologie



Anomalies de précipitations et de Z500 prévues par le multi-modèle C3S pour MAM 2022 (initialisation Février 2022). Signal sec visible sur une grande partie de l'Europe.

Quand avoir confiance dans la prévision ?

- **Approche 1** : Lorsqu'elle prévoit un **signal fort** en s'écartant significativement de sa climatologie

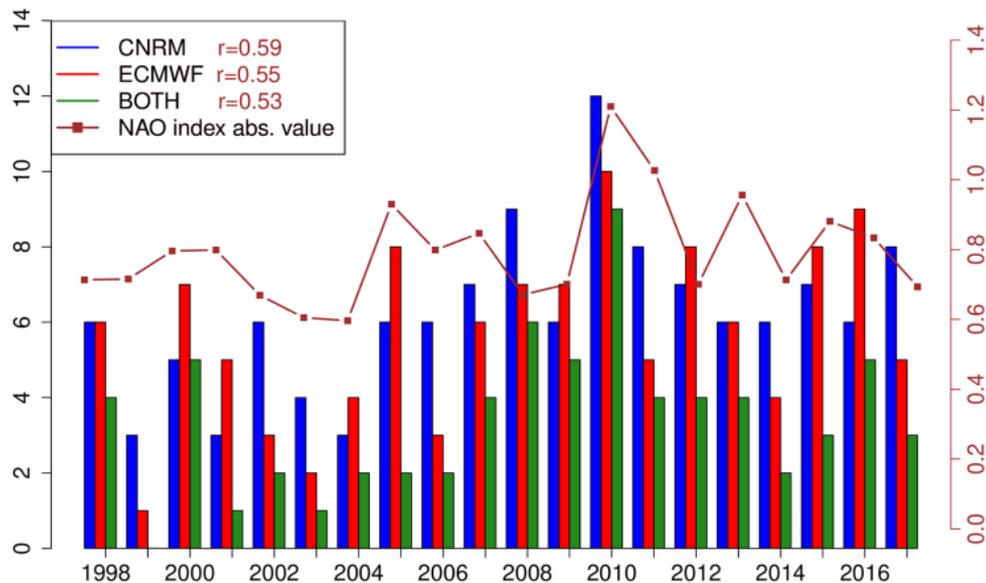


Anomalies de précipitations et de Z500 prévues par le multi-modèle C3S pour MAM 2022 (initialisation Février 2022). Signal sec visible sur une grande partie de l'Europe.

- **Limite** : la prévision peut être très « affirmative » et quand même se tromper !
→ Pouvoir **expliquer physiquement le signal** prévu pour faire confiance

Quand avoir confiance dans la prévision ?

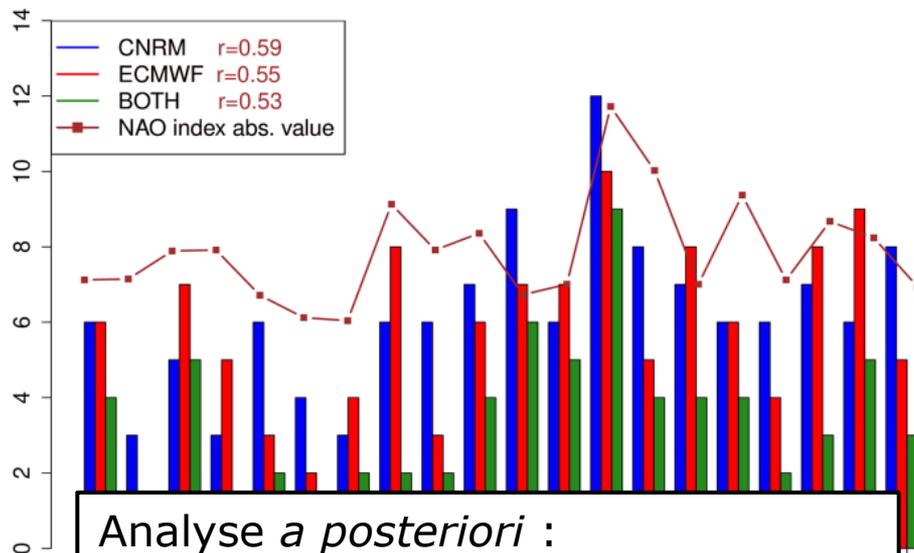
➤ **Approche 2** : Lorsqu'il y a un **précurseur physique** favorable à une « bonne » prévision



Liens entre nombre de prévisions réussies (pattern T2m Europe, semaine 3) et intensité de la NAO à l'initialisation. Ardilouze et al (2021)

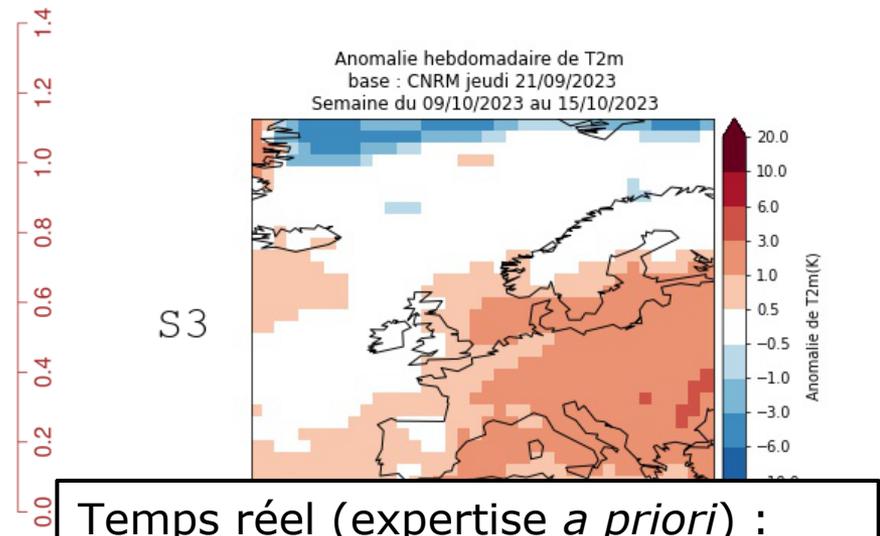
Quand avoir confiance dans la prévision ?

- **Approche 2** : Lorsqu'il y a un **précurseur physique** favorable à une « bonne » prévision



Analyse *a posteriori* :

- **Beaucoup de prévisions**
- **Une seule condition** (ex : NAO)



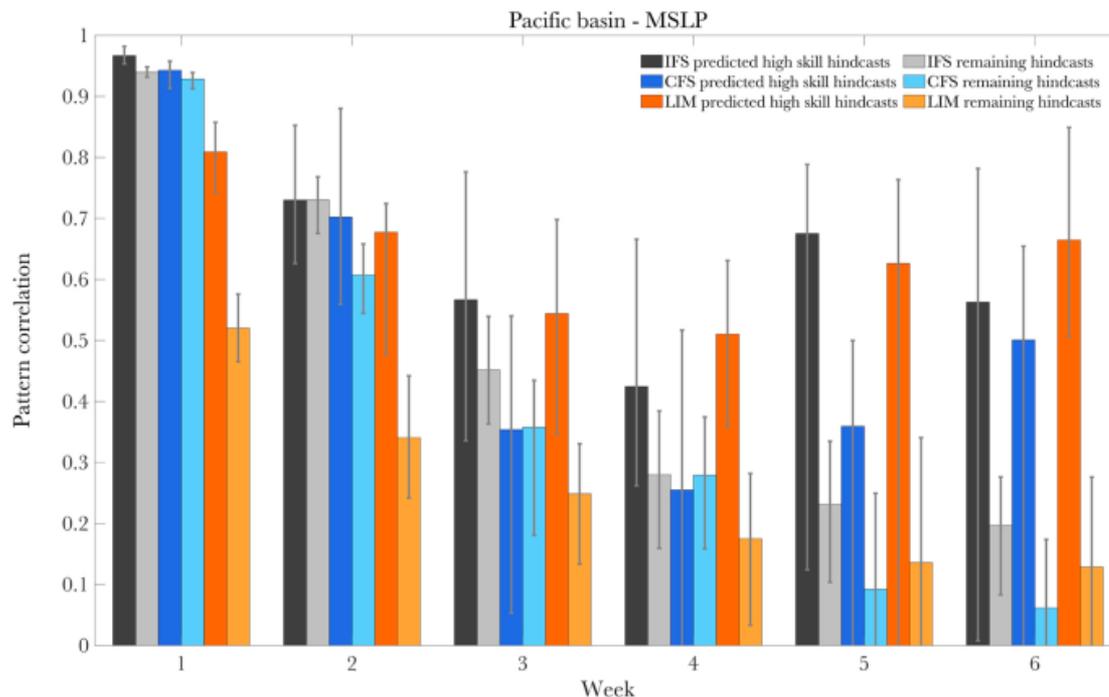
Temps réel (expertise *a priori*) :

- **Une seule prévision**
- **Beaucoup de conditions**

- **Limite** : résultats obtenus avec un positionnement assez différent du temps réel

Quand avoir confiance dans la prévision ?

- **Approche 3** : Lorsqu'un **modèle statistique** prévoit *a priori* la qualité de la prévision (« Forecasting forecast skill », Kalnay et Dalcher 1987)

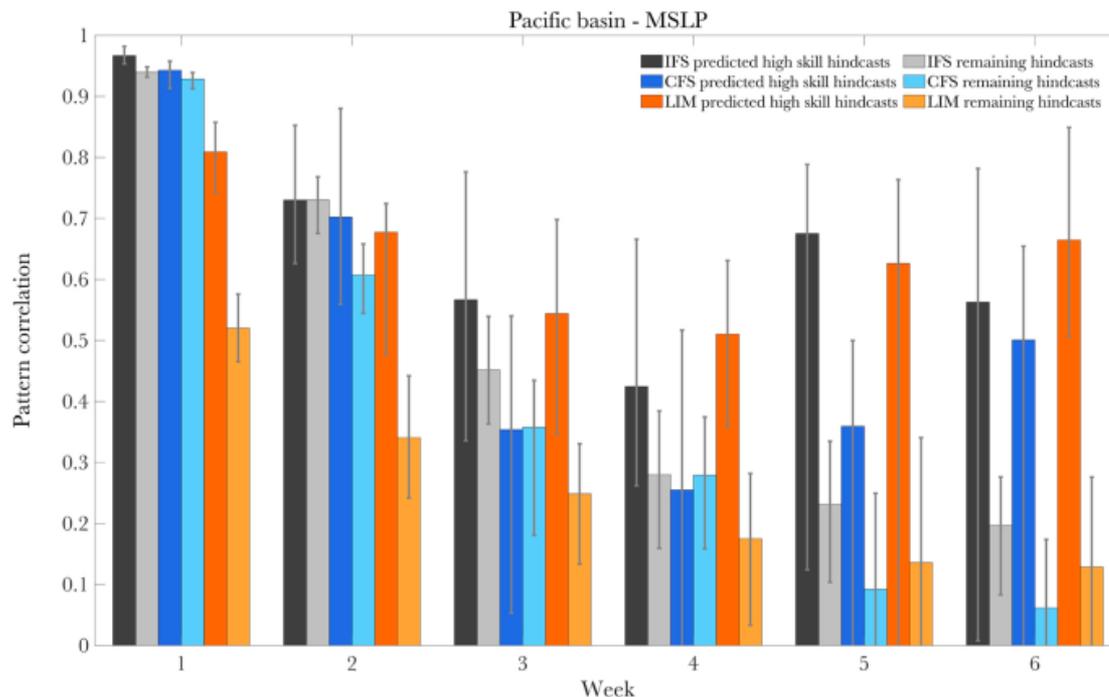


Albers et Newman (2019) : qualité des prévisions¹ des modèles numériques (ECMWF, CFS) selon la qualité attendue par un modèle statistique (LIM)

¹Corrélation spatiale avec les observations pour la SLP dans le bassin Pacifique

Quand avoir confiance dans la prévision ?

- **Approche 3** : Lorsqu'un **modèle statistique** prévoit *a priori* la qualité de la prévision (« Forecasting forecast skill », Kalnay et Dalcher 1987)



Albers et Newman (2019) : qualité des prévisions¹ des modèles numériques (ECMWF, CFS) selon la qualité attendue par un modèle statistique (LIM)

¹Corrélation spatiale avec les observations pour la SLP dans le bassin Pacifique

Limites :

- L'aptitude à prévoir la qualité de la prévision n'est pas elle-même parfaite
- Peut nécessiter de redévelopper un modèle statistique pour chaque application ciblée

Quand avoir confiance dans la prévision ? : Enjeux

- **Repérer en temps réel** les prévisions en lesquelles on peut avoir suffisamment confiance : plusieurs méthodes avec avantages et limites
- Savoir expliquer **pourquoi on a confiance** (mécanismes physiques)
- Détailler leur **plus-value par rapport à d'autres sources d'informations** déjà disponibles (climatologie, projection de changement climatique)

Sommaire

Introduction

I- Pourquoi ça peut marcher : les sources de prévisibilité

II- De quelles informations le modèle dispose-t-il ? : l'initialisation des prévisions

III- Les modèles profitent-ils des sources de prévisibilité ?

IV- Vers le temps réel : quand avoir confiance dans la prévision ?

Nos perspectives

Nos perspectives

- **Développement** du système de prévision avec CNRM-CM :
 - **Meilleure modélisation** des compartiments de base (océan, atmosphère, glace)
 - Incorporation de nouveaux processus dans le modèle
 - **Initialisation plus réaliste** (ex : pour les surfaces continentales, projet CERISE)
- **Interprétation** et **exploitation** des prévisions :
 - **Scénarios** dans la prévision d'ensemble pour détailler l'incertitude
 - **Indice de confiance** en prévision saisonnière
 - Expliciter ce qu'apportent les phénomènes sources de prévisibilité par des évaluations plus poussées
 - Préciser la **contribution du changement climatique**
- Détailler de **nouvelles sources de prévisibilité** (ex : couverture neigeuse, température du sol)



Merci pour votre attention
Question ?

Références

- Albers, J.R. et Newman, M. A Priori Identification of Skillful Extratropical Subseasonal Forecasts. *Geophysical Research Letters*, 46 (21) (2019)
- Ardilouze, C. Impact de l'humidité du sol sur la prévisibilité du climat estival aux moyennes latitudes. Thèse de doctorat (2019)
- Ardilouze, C. et al. Flow dependence of wintertime subseasonal prediction skill over Europe. *Weather and Climate Dynamics*, 2: 1033-1049 (2021)
- Mariotti, A. et al. Windows of opportunity for skillful forecasts subseasonal to seasonal and beyond. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 101, E608-E625 (2020)
- Merryfield, W.J. et al. Current and Emerging Developments in Subseasonal to Decadal Prediction. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 101 (6), E869-E896 (2020)
- Patterson, M. et al. The strong role of external forcing in seasonal forecasts of European summer temperature. *Environmental Research Letters*, 17, 104033. (2022)
- Specq, D. Prévisibilité des fortes précipitations aux échéances infra-saisonniers sur le Pacifique Sud-Ouest tropical. Thèse de doctorat (2020)
- Specq, D. et L. Batté. Do subseasonal forecasts take advantage of Madden-Julian oscillation windows of opportunity? *Atmospheric Science Letters*, e1078 (2022)
- Voltaire, A. et al. Evaluation of CMIP6 Deck Experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*, 11: 2177-2213 (2019)

CNRM-CM en mode « prévision » : génération d'un ensemble

- Échantillonner la distribution du climat (des prochaines semaines, de la prochaine saison, etc.) conditionnellement à l'état initial
- Génération d'ensemble par **perturbation aléatoire de la dynamique** (\neq perturbation des paramétrisations physiques)
- Méthode Batté et Déqué (2016) : « dynamique stochastique »

A chaque intégration
 $t \rightarrow t + \Delta t$,

$$\mathbf{X}(t + \Delta t) = \mathbf{X}(t) + \mathbf{M}(\mathbf{X}(t), t) + \delta\mathbf{X}_t$$

Variable pronostique

- Température
- Humidité spécifique
- Vorticité

Équation du modèle

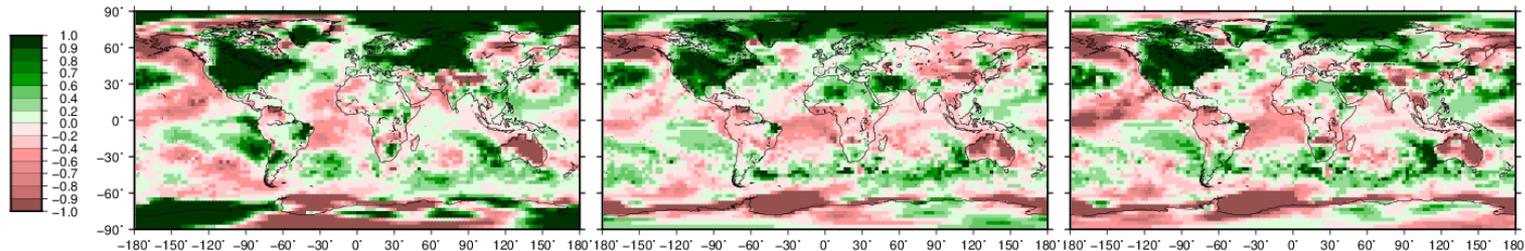
Perturbation aléatoire
= **erreur modèle** sur un
run préliminaire

- Initialement choisie pour ses bons résultats sur les scores de prévision aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord (Z500 notamment)

Faut-il ajouter de la complexité dans la modélisation ?

- Représentation de phénomènes supplémentaires : évolution de la végétation, évolution des aérosols
- Le gain sur les performances de prévision n'est pas toujours évident
- Nouvelle composante modèle = nouvelle problématique d'initialisation

Exemple des aérosols :
+40 % coût de calcul,
bénéfices intermittents



T2m ERA5 Avril 2012

*T2m prévue avec
aérosols clim.
Corrélation : 0.59*

*T2m prévue avec
aérosols modélisés
Corrélation : 0.72*