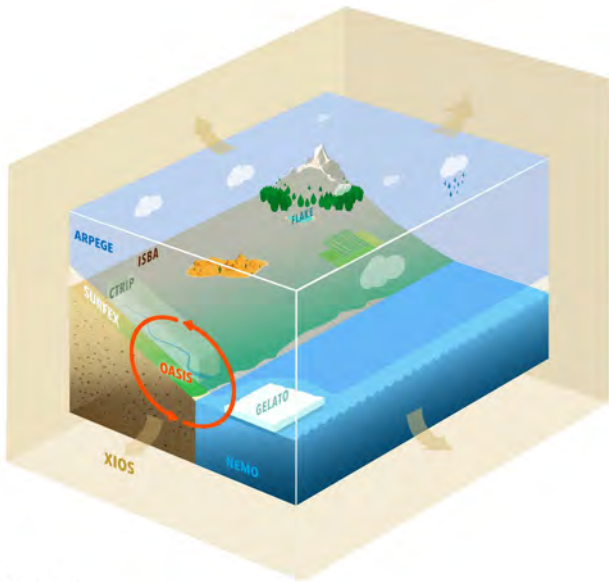
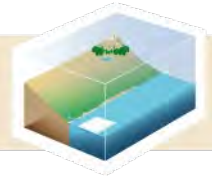


Modèles climatiques globaux : comment les améliorer ?



Aurore Voldoire, aurore.voldoire@meteo.fr
CNRM, Météo-France/CNRS, Toulouse

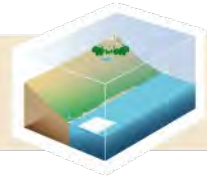




1. Le modèle de climat CNRM-CM : un système complexe
2. Comprendre les propriétés émergentes d'un modèle de climat
 - 1) Comment développe-t-on un modèle ?
 - 2) Décomposer un modèle
 - 3) Simplifier le modèle
3. Comment lever les verrous?

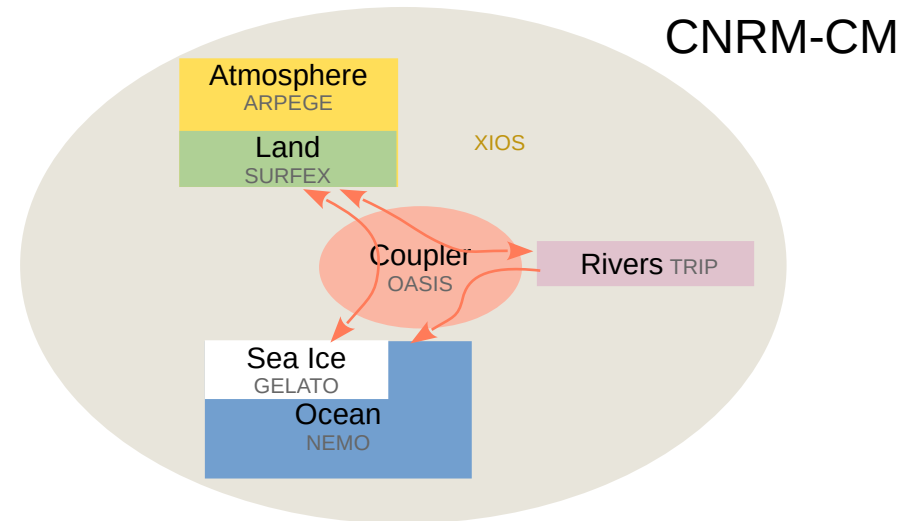
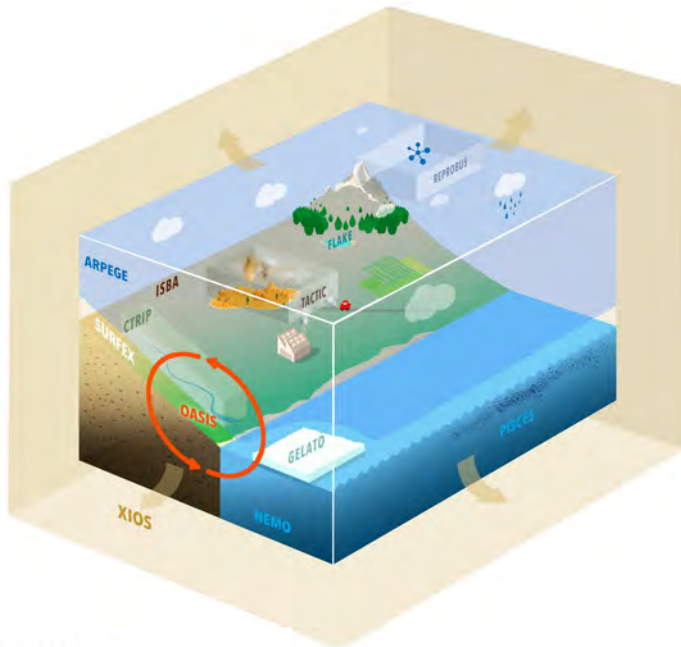
Le modèle de climat CNRM-CM

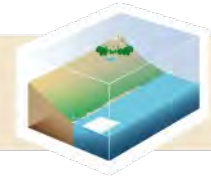
CNRM
CM



Assemblage de composantes développées dans des laboratoires différents (cohérence ?)

- avoir de l'**expertise** sur chacune des composantes
- adapter certaines composantes pour l'étude des **échelles climatiques**
- développer des **interfaces cohérentes**
- viser un niveau de **complexité homogène** dans toutes les composantes





Pourquoi développer un modèle de climat global au CNRM-Cerfacs ?

- Comprendre le système climatique = laboratoire numérique
- Réaliser des projections futures (et prévisions saisonnières)
 - ▶ Des données d'entrée pour les études d'impact
 - ▶ Un outil pour évaluer les politiques d'adaptation et d'atténuation

Cadrage scientifique

- Échelles de temps de la saison au siècle
- Un outil commun pour divers intérêts scientifiques :
 - ▶ Coeur physique : CNRM-CM
 - ▶ Modèle de système Terre : CNRM-ESM

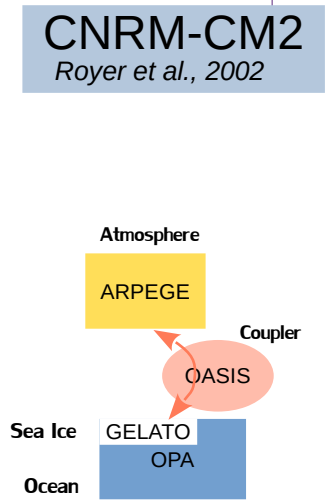
Contexte international

- CMIP : Coupled Model Intercomparison Project

CMIP Phases



CNRM-CM development history

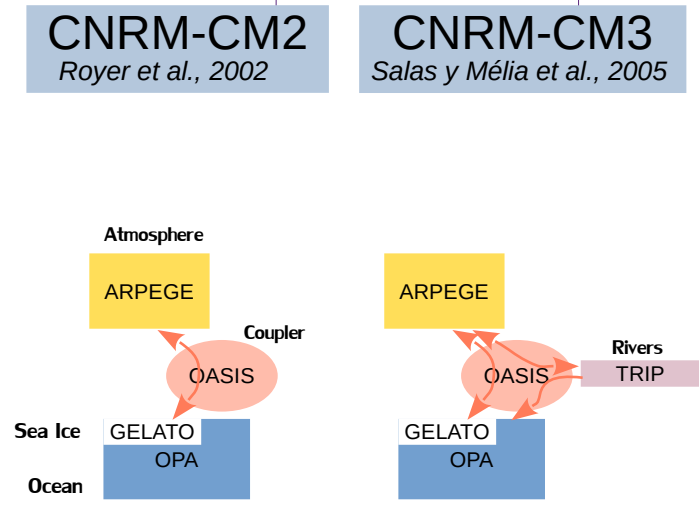


CNRM-CM2
Royer et al., 2002

CMIP Phases



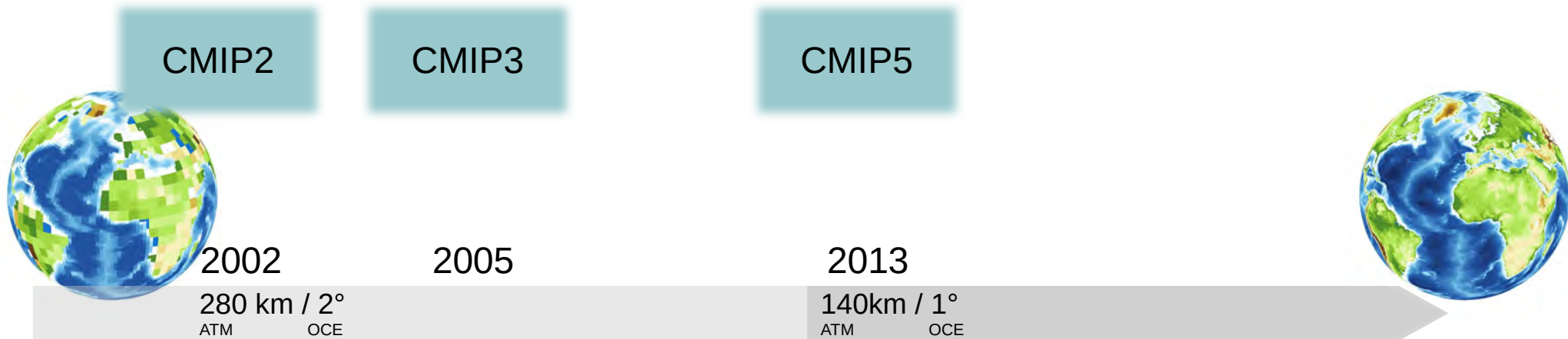
CNRM-CM development history



CNRM-CM2
Royer et al., 2002

CNRM-CM3
Salas y Mélia et al., 2005

CMIP Phases

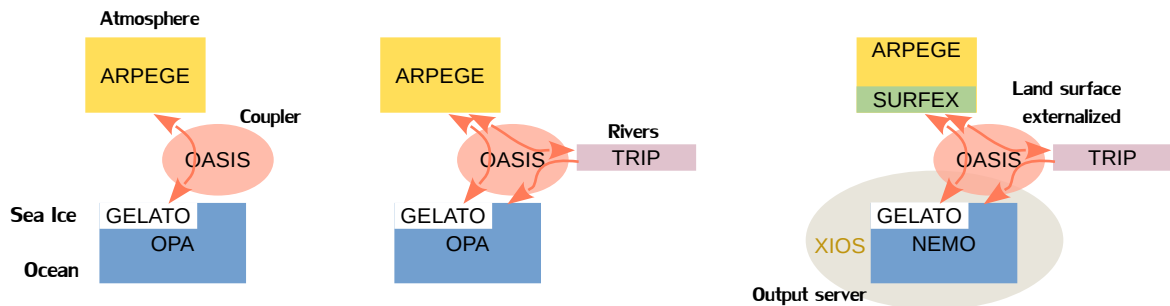


CNRM-CM2
Royer et al., 2002

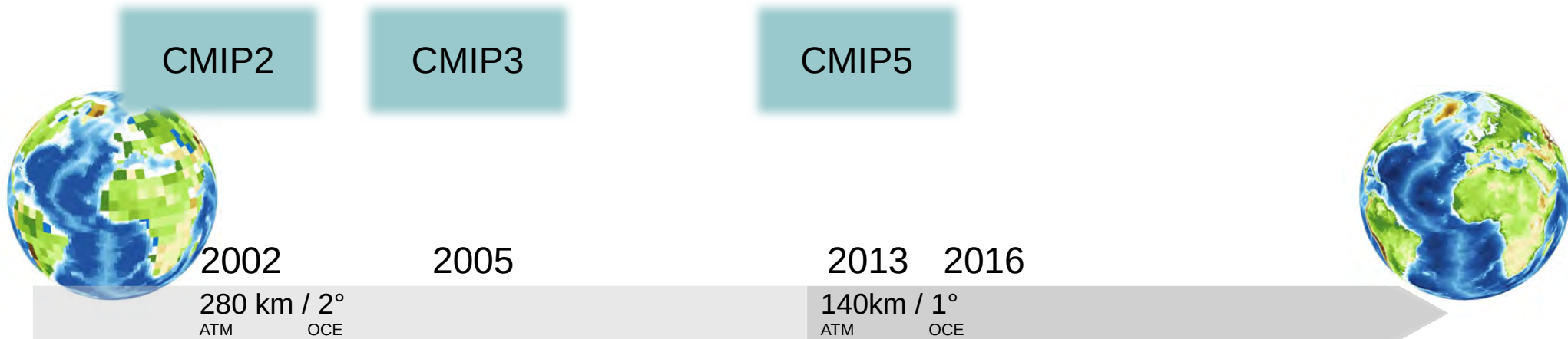
CNRM-CM3
Salas y Mélia et al., 2005

CNRM-CM5.1
Voltaire et al., 2013

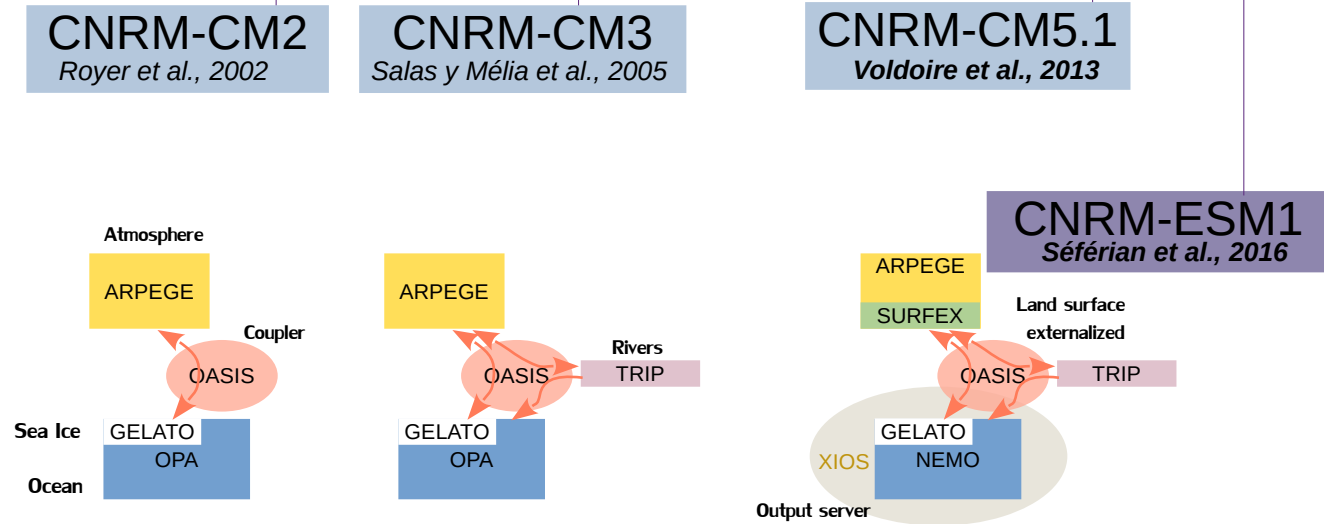
CNRM-CM development history



CMIP Phases



CNRM-CM development history



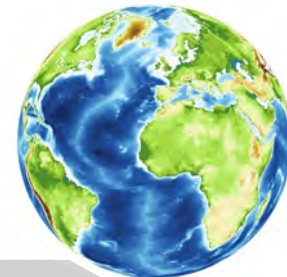
CMIP Phases

CMIP2

CMIP3

CMIP5

CMIP6



2002

2005

2013

2016

2019

280 km / 2°
ATM OCE

140km / 1°
ATM OCE

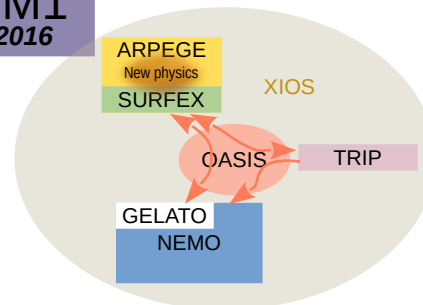
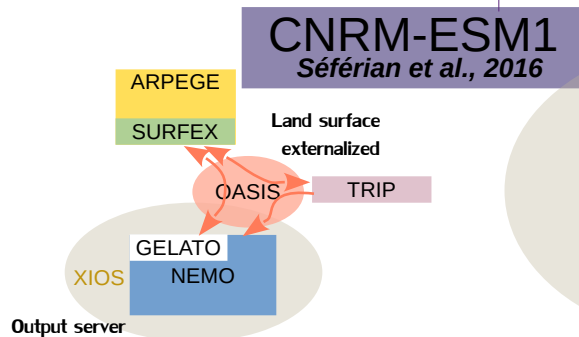
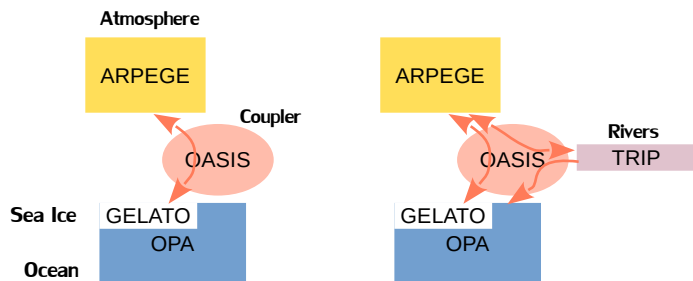
CNRM-CM2
Royer et al., 2002

CNRM-CM3
Salas y Méliá et al., 2005

CNRM-CM5.1
Voltaire et al., 2013

CNRM-CM6-1
Voltaire et al., 2019

CNRM-CM development history



CMIP Phases

CMIP2

CMIP3

CMIP5

CMIP6



2002

2005

2013

2016

2019

280 km / 2°
ATM OCE

140km / 1°
ATM OCE

50km / 0,25°

CNRM-CM2
Royer et al., 2002

CNRM-CM3
Salas y Mélia et al., 2005

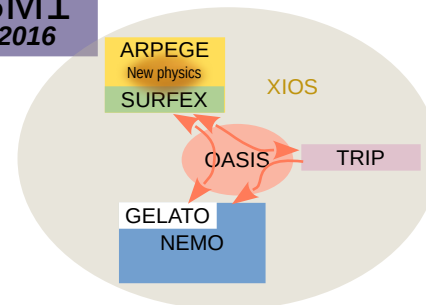
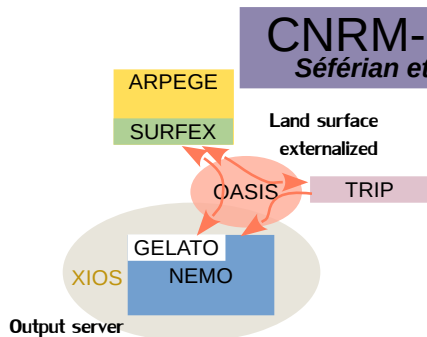
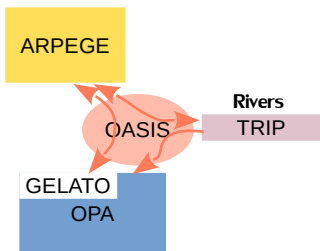
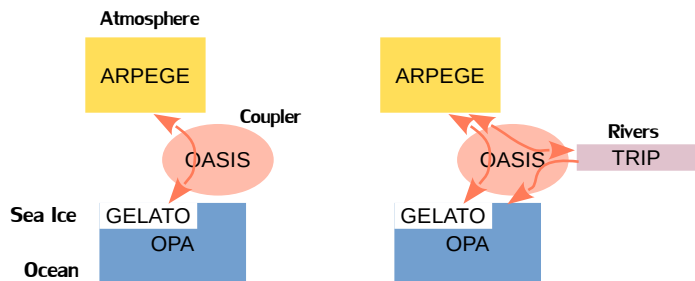
CNRM-CM5.1
Voltaire et al., 2013

CNRM-CM6-1
Voltaire et al., 2019

CNRM-CM6-1-HR
Saint-Martin et al., 2020

CNRM-ESM2-1
Séférian et al., 2019

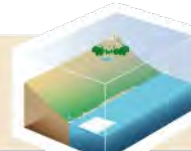
CNRM-ESM1
Séférian et al., 2016



CNRM-CM development history

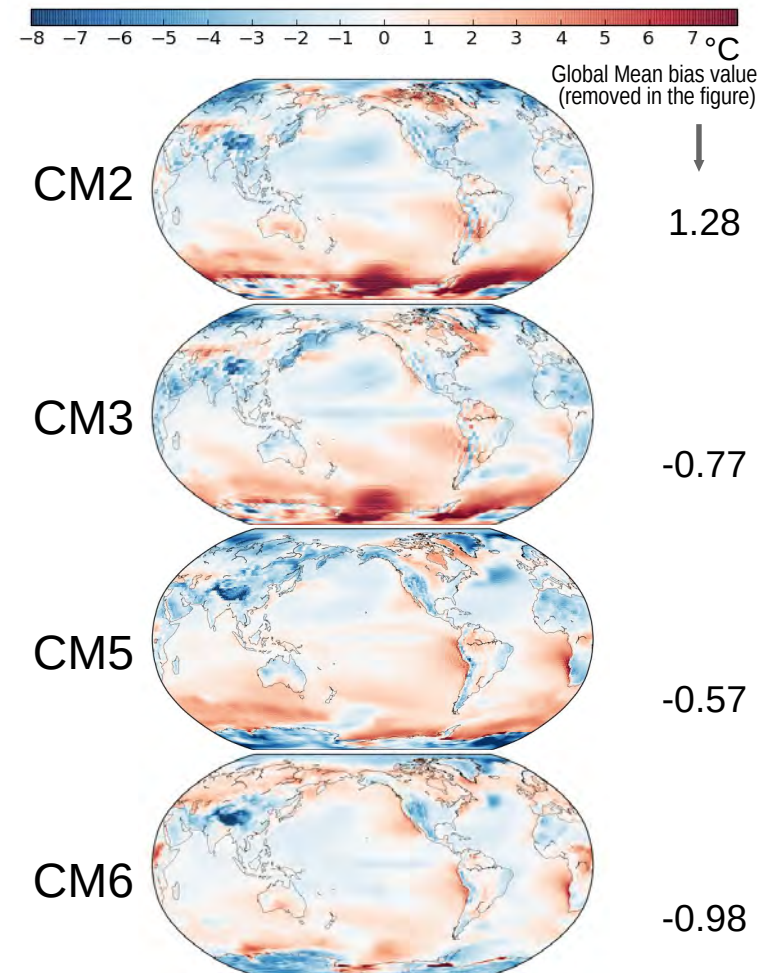
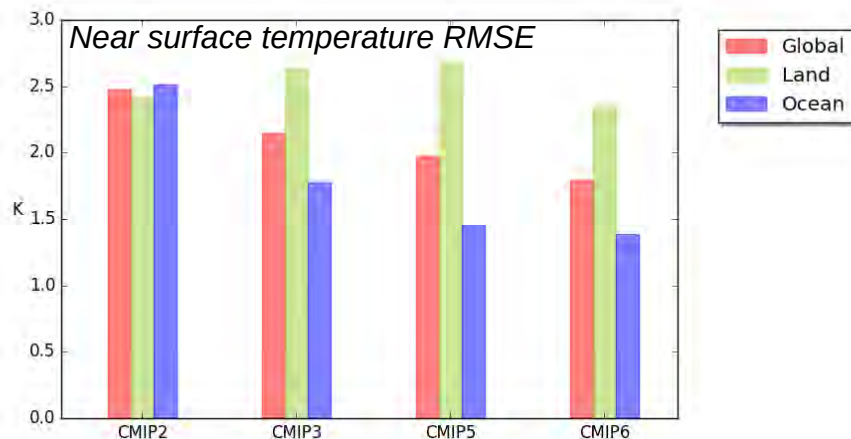
Évaluation du modèle sur ~20 ans

CNRM
CM



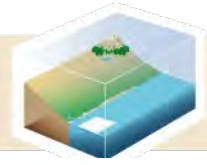
Evolution du biais de température de surface

- La calibration permet de limiter le biais moyen global (donc proche de 0 par construction et retiré sur les figures)
- Au fil des versions, **réduction progressive** du RMSE mais moins systématique sur continent.



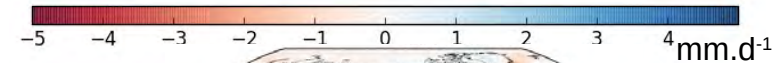
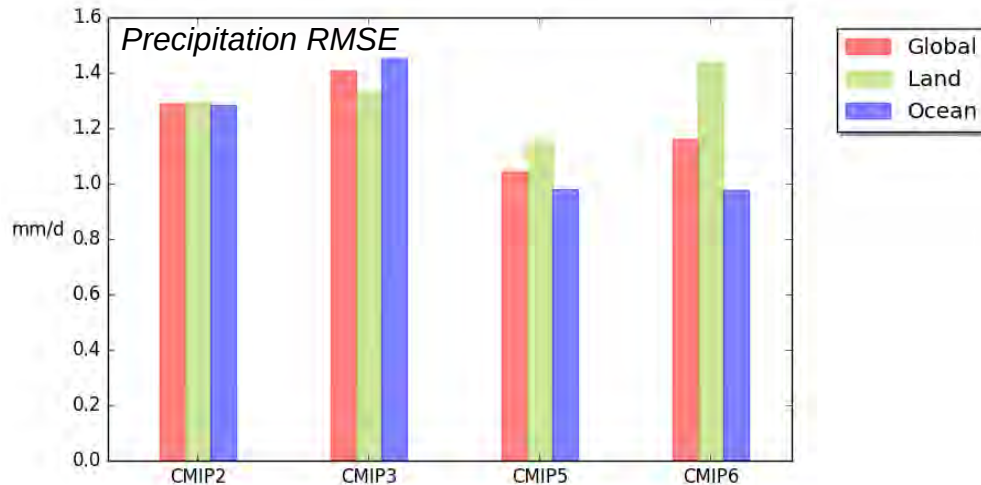
Évaluation du modèle sur ~20 ans

CNRM
CM

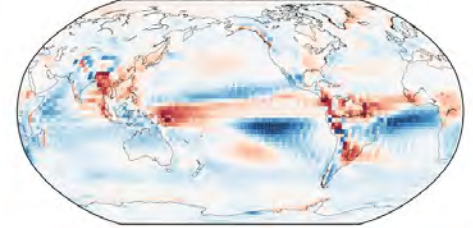


Evolution du biais de **précipitation**

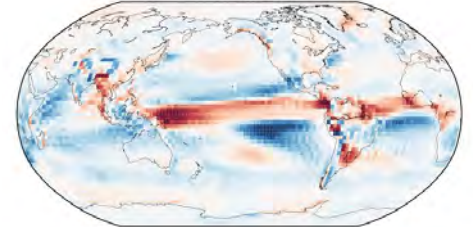
- Paramètre moins bien observé
- Evolution du RMSE moins claire, améliorations dans certaines régions, tandis que d'autres se dégradent
- Comment **conserver le bénéfice d'améliorations** antérieures ?



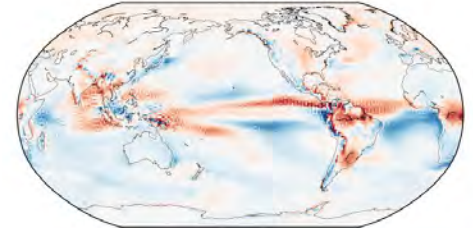
CM2



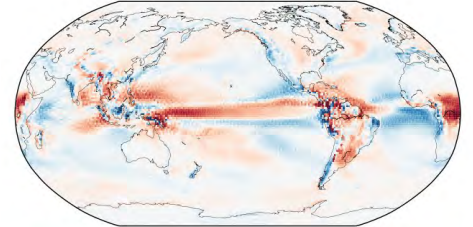
CM3

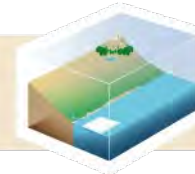


CM5

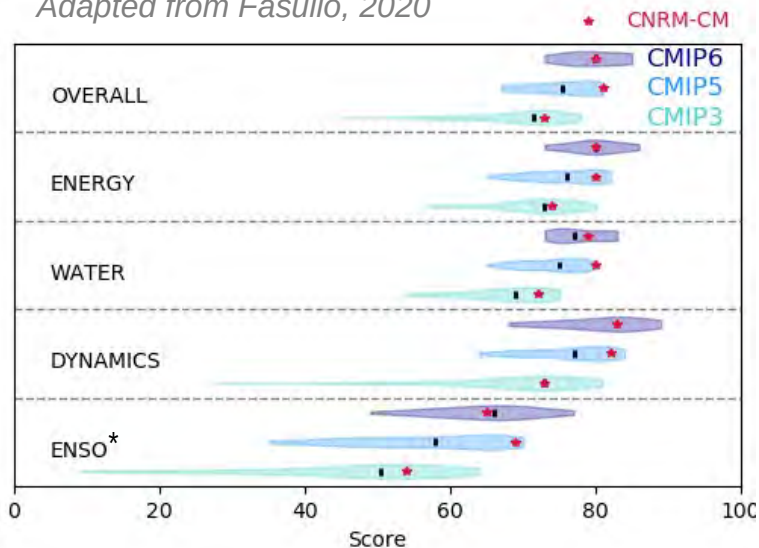


CM6



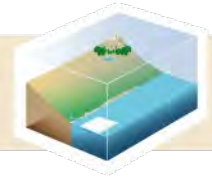


Adapted from Fasullo, 2020

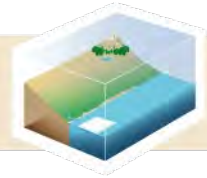


*ENSO : El Nino Southern Oscillation

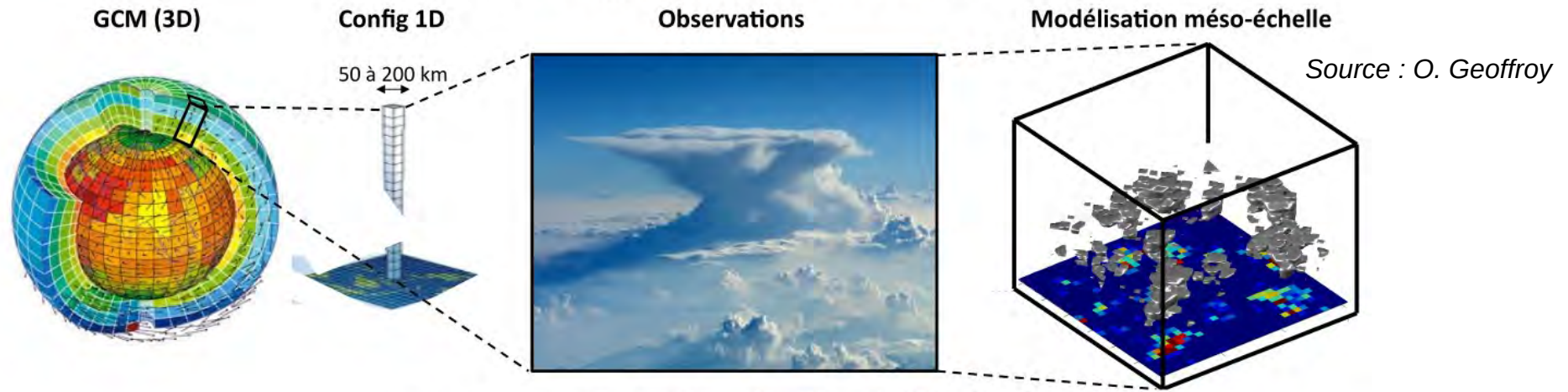
- Ensemble CMIP
 - ▶ Amélioration progressive des meilleurs modèles de CMIP3 à CMIP6
 - ▶ Réduction de l'écart de performance entre les modèles.
- Cas de CNRM-CM
 - ▶ Une amélioration générale de CM3 à CM5 : correspond à une phase de longue calibration plutôt qu'à des développements majeurs.
 - ▶ Peu d'amélioration de CM5 à CM6 : correspond à une refonte profonde de la physique atmosphérique et des surfaces continentales.
- En comparaison au multi-modèle, CNRM-CM6 semble moins performant
 - ▶ Besoin de plus de temps pour adapter le nouveau set de paramétrisations ?
 - ▶ La calibration était-elle suffisante ?



1. Le modèle de climat CNRM-CM : un système complexe
2. Comprendre les propriétés émergentes d'un modèle de climat
 - 1) Comment développe-t-on un modèle ?
 - 2) Décomposer un modèle
 - 3) Simplifier le modèle
3. Comment lever des verrous?



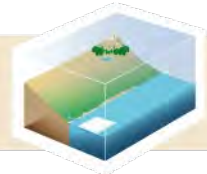
Développement des paramétrisations



Les paramétrisations sont généralement développées en configuration 1D (uni-colonne) dans le cadre de « cas d'études »

- nécessite des observations dédiées (+ des LES)
- permet de :
 - ▶ développer les paramétrisations
 - ▶ réduire l'espace des paramètres libres des paramétrisations

→ **Que se passe-t-il une fois intégrées dans un modèle 3D ?**



Exemple : amélioration de la paramétrisation de la **convection peu profonde** impacte :

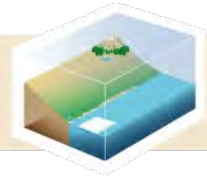
- la couverture nuageuse basse → les flux radiatifs → le bilan radiatif / bilan d'énergie (perturbe un équilibre « fragile »)
- la température de surface → **rétroagit sur le système climatique moyen et sa variabilité.**



Implique une re-calibration des paramètres des autres processus (illustré dans Hourdin et al., 2013)

- **Calibrer** est une longue étape qui nécessite :
 - ▶ un haut niveau d'**expertise**
 - ▶ De **nombreux essais** (simulations)
 - ▶ Évaluer de **nombreuses caractéristiques** (métriques)
- Il est difficile de calibrer à chaque changement de paramétrisation individuellement
- En général, la calibration n'est vraiment effectuée qu'à l'occasion d'une nouvelle version incluant de nombreux changements.
- Propriétés émergentes d'un modèle sont ainsi dues à :
 - ▶ Des changements de paramétrisations
 - ▶ Des changements de calibration

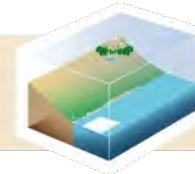
Comment séparer les différentes causes ?



1. Le modèle de climat CNRM-CM : un système complexe
2. Comprendre les propriétés émergentes d'un modèle de climat
 - 1) Comment développe-t-on un modèle ?
 - 2) Décomposer un modèle
 - 3) Simplifier le modèle
3. Comment lever les verrous?

Pourquoi ENSO est-il moins réaliste dans CM6?

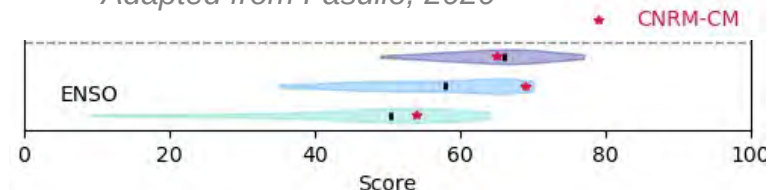
CNRM
CM



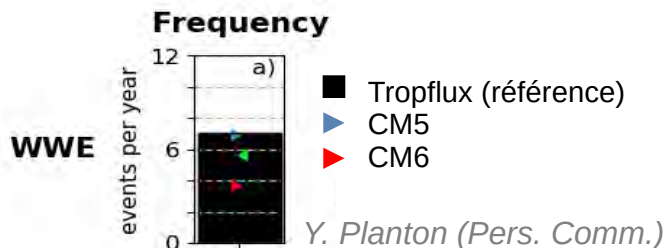
Dans CNRM-CM, la simulation d'ENSO

- ▶ A été dégradée entre CM5 et CM6
- ▶ Ne suit pas l'amélioration générale des autres modèles

Adapted from Fasullo, 2020



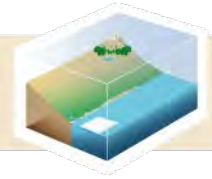
CNRM-CM5 remarquable : représentation très réaliste des coups de vents d'ouest (fréquence, saisonnalité, localisation) cf Puy et al., 2017



- ▶ Coups de vent d'ouest simulés trop rarement avec CM6 alors que la fréquence était comparable aux observation dans CM5.

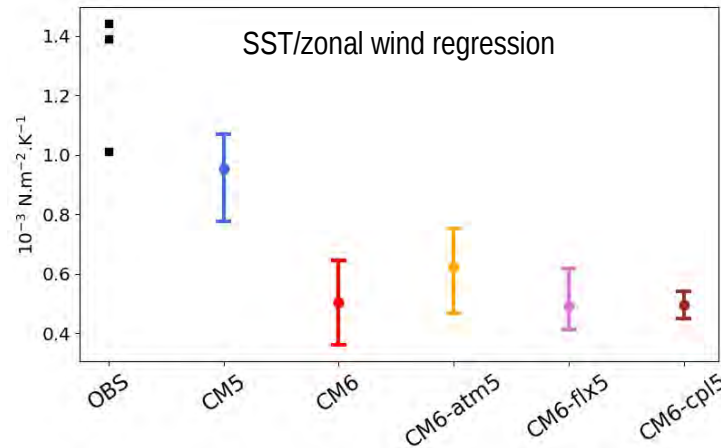
➡ Pourquoi une telle dégradation entre CM5 et CM6?

Comment comprendre la dégradation?



Méthode :

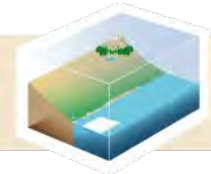
- Décomposer les changements entre les 2 versions :
 - ▶ Tester l'ancien jeu de **paramétrisations dans l'atmosphère**
 - ▶ Tester l'ancienne paramétrisation des **flux à l'interface océan-atmosphère**
 - ▶ Tester le changement de **fréquence de couplage** (1 heure → 1 jour)



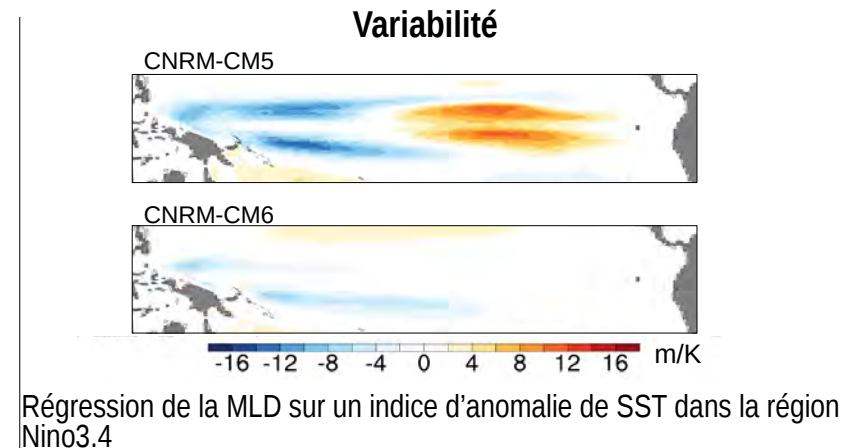
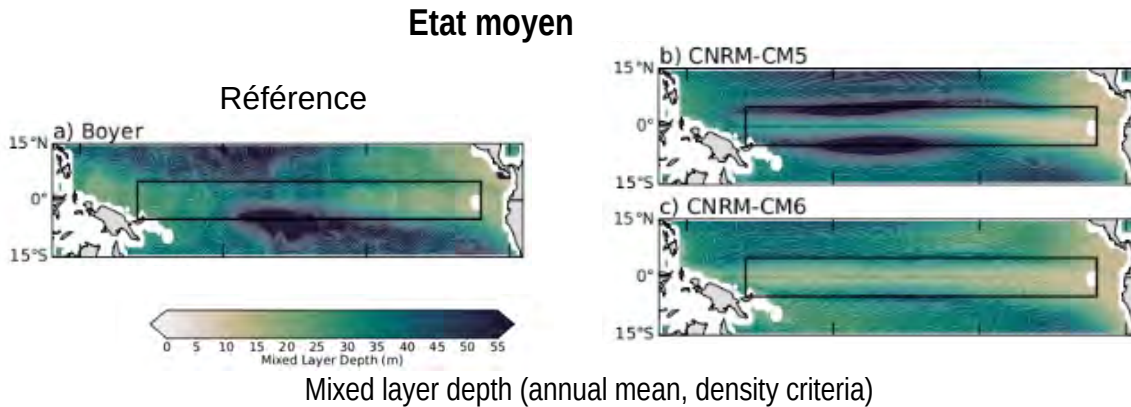
- ⊗ Le changement de relation SST/vent ne semble pas lié aux modifications liées au couplage ou à l'atmosphère :
 - Est-ce dû à la composante océanique ?

stage M2 T. Manni, co-encadré avec G. Bellon, 2021, ANR ARISE

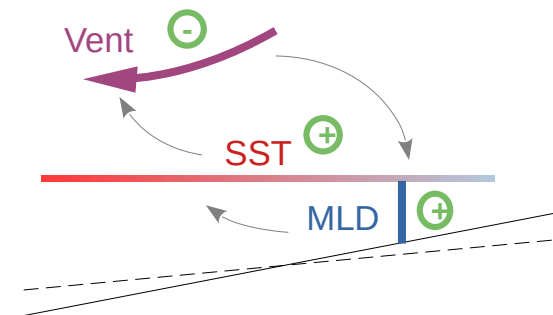
De CM5 à CM6 : rôle de l'océan ?



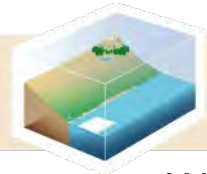
- Comparaison des propriétés émergentes de l'océan dans les 2 versions du modèle :
 - ▶ Modification de l'état moyen de la profondeur de couche de mélange (MLD) : gradients zonaux et méridiens fortement réduits dans le Pacifique équatorial
 - ▶ Réduction des anomalies de profondeur de couche de mélange lors des événements ENSO



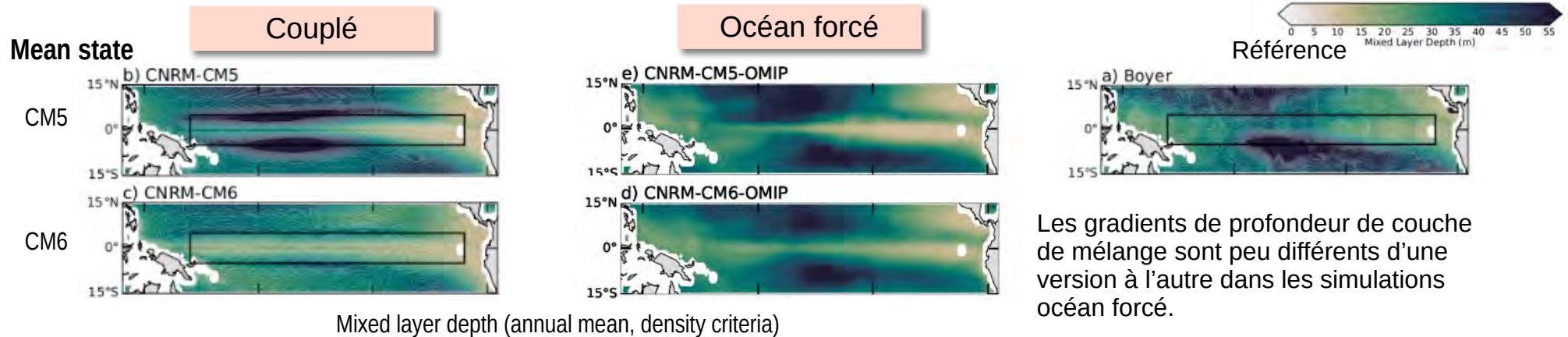
➔ Pourquoi la rétroaction de Bjerknes est-elle moins intense dans CM6 ?



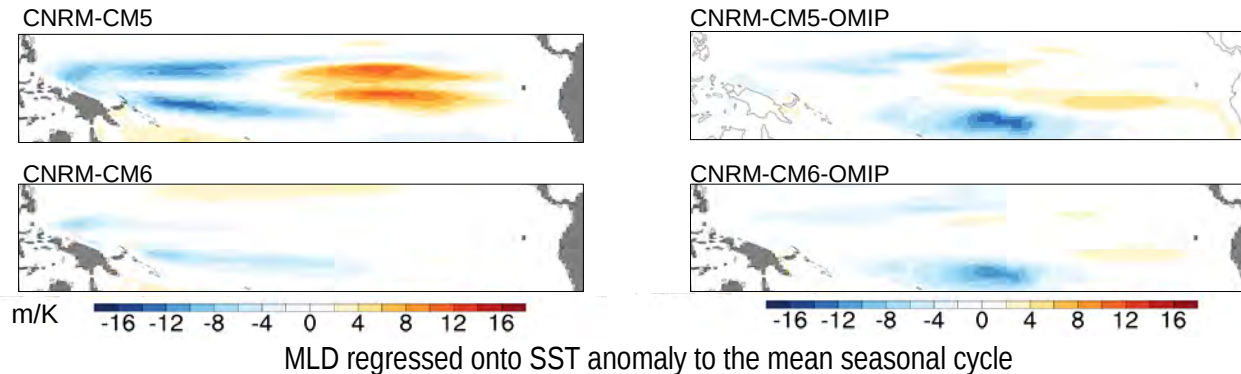
De CM5 à CM6 : rôle de l'océan ?



- Découpler le modèle → simulations océan découplées (ie forcées)



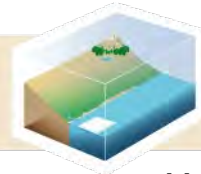
Variability



La régression avec un indice ENSO est plus faible dans CM6
→ dégradation : un problème intrinsèque à la version du modèle ?

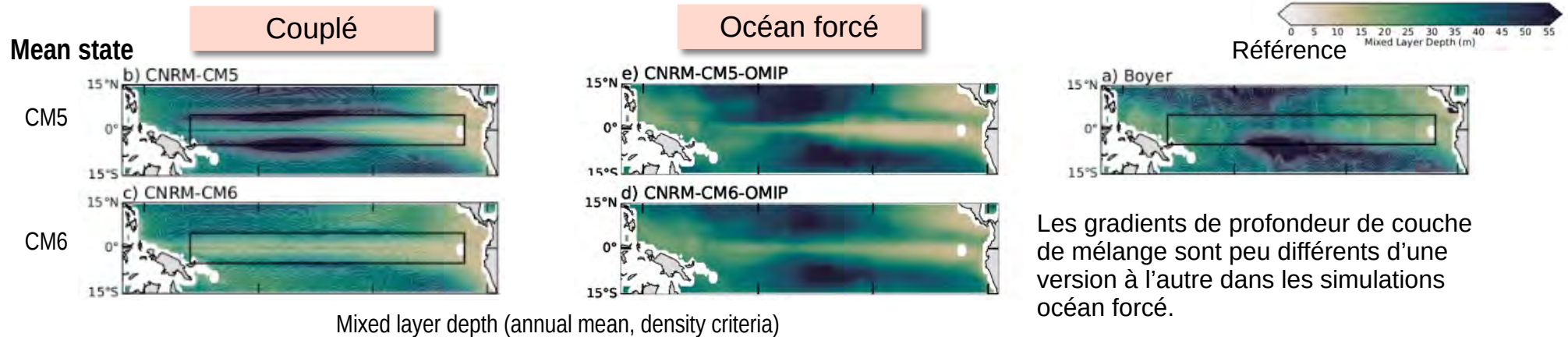
De CM5 à CM6 : rôle de l'océan ?

CNRM
CM



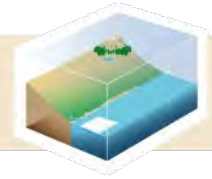
ANR ARISE

- Découpler le modèle → simulations océan découplées (ie forcées)

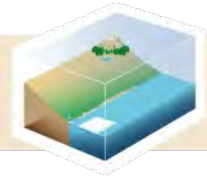


Enquête à poursuivre mais déjà quelques conclusions :

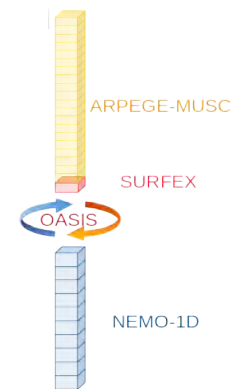
- Les simulations **océan forcé** ne sont pas toujours **informatives** sur les propriétés émergentes de l'océan dans un système couplé.
- Il est difficile de **déconvoluer** l'effet direct d'un changement dans une composante vs le changement d'état moyen induit par les rétroactions.
- Intérêt de développer des **configurations intermédiaires** plus contraintes pour analyser les effets dans un cadre simplifié (rappel dans certaines composantes, utilisation d'une atmosphère simplifiée « Simplified Atmospheric Boundary Layer » sur océan (ABL1D, Lemarié et al., 2021), etc...)



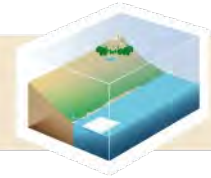
1. Le modèle de climat CNRM-CM : un système complexe
2. Comprendre les propriétés émergentes d'un modèle de climat
 - 1) Comment développe-t-on un modèle ?
 - 2) Décomposer un modèle
 - 3) Simplifier le modèle
3. Comment lever les verrous?



- Développement d'une **version unicolonne** (1D) de CNRM-CM (Voldoire et al., 2022, GMD)
 - ▶ Versions 1D des composantes atmosphérique et surface continentale largement utilisées pour le développement des paramétrisations.
 - ▶ Disponible aussi pour la composante océanique
 - ▶ Implémentation **en couplé** basée sur les mêmes versions que le modèle 3D
 - Conserve la même technique de couplage (via OASIS)
 - ▶ Un outil efficace pour travailler sur le couplage océan-atmosphère
 - Évaluer la paramétrisation des **flux océan-atmosphère**
 - Analyser le couplage entre les **couches limites** océaniques et atmosphériques
 - Adapter l'**algorithme** de couplage temporel

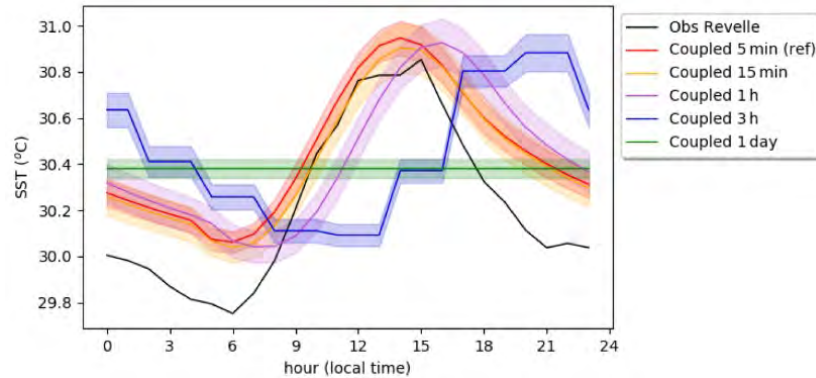


Utilisation du modèle simplifié

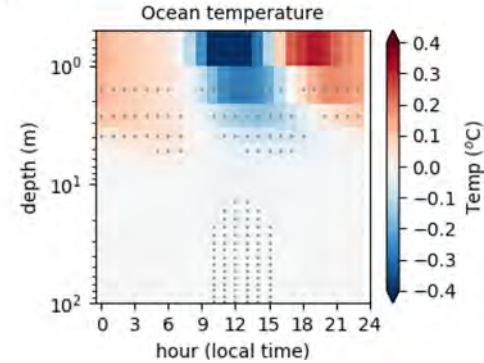


Analyse de l'impact de la **fréquence de couplage** sur les couches limites atmosphérique et océanique

Cas Cindy-Dynamo (ANR COCOA)

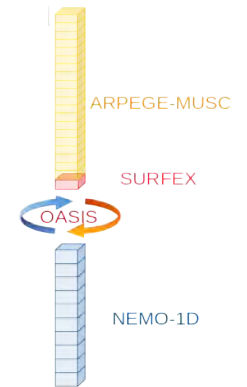


Mean Sea Surface temperature diurnal cycle

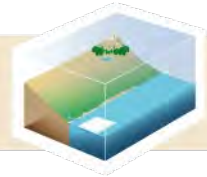


Diurnal cycle mean change in ocean temperature between 5min coupling time-step and 3h coupling time-step

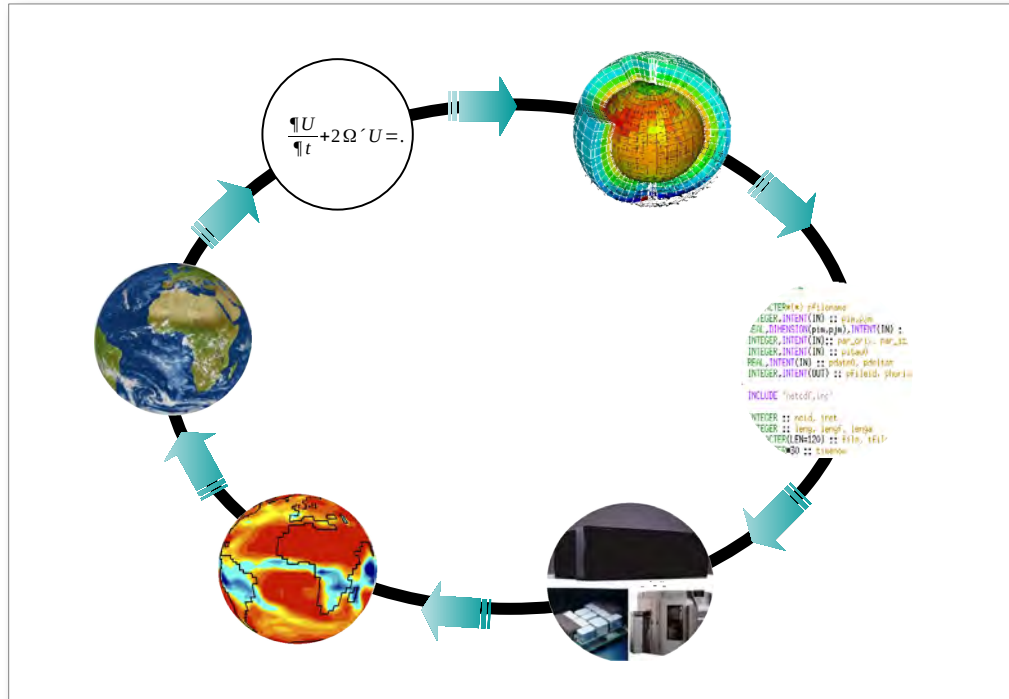
Voldoire et al., 2022, GMD



- Importance de l'utilisation d'une fréquence ≤ 1 h
- Impact sur le calage du cycle diurne jusqu'à 5 m dans l'océan, 900hPa dans l'atmosphère
- Utilisé également pour tester d'autres algorithmes temporels de couplage (méthode de Schwarz, Marti et al., 2021)



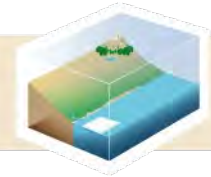
Est-ce que le cercle vertueux de la modélisation est une réalité ?



Il y a des points de **blocage** :

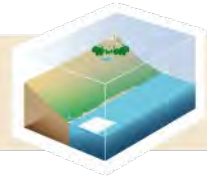
- Il est difficile de relier **les défauts du modèle** directement au contenu des **paramétrisations** : décortiquer le modèle complet demande un effort important, sans gage de réussite.
- La nécessité de **calibration** :
 - ▶ un processus long
 - ▶ qui complique l'analyse à posteriori

Comment lever les verrous ?



- **Faciliter** l'analyse des défauts du modèle :
 - ▶ Poursuivre et maintenir la **modularité** dans les composantes et dans le modèle couplé afin de permettre de découpler les processus
 - ▶ Mettre en place des configurations **intermédiaires** pour la compréhension :
 - Couplé 1D : développement d'**autres cas d'étude** ?
 - Transpose-AMIP (Brient et al., 2019, JAMES), Transpose-CMIP (Voldoire et al., 2019, Clim. Dyn.) : analyse de la dérive initiale
 - Simplified Atmospheric Boundary Layer (Lemarié et al., 2021, GMD) sur océan
 - Nudging, Correction de flux, ...
 - Version basse résolution « rapide et sobre »

Comment lever les verrous ?



- **Faciliter** l'analyse des défauts du modèle
- **Optimiser** la procédure de **calibration** (TRACCS-QUINTET)
 - ▶ Utilisation d'une méthode objective et semi-automatique (Couvreux et al., 2021)
 - Basée sur la méthode « History Matching » (Williamson et al., 2017)
 - ▶ Intérêts
 - Formaliser les **métriques** sur lesquelles portent la calibration
 - Éviter le sur-ajustement
 - Accélérer la phase de calibration
 - Qualifier les **erreurs structurelles** des modèles
 - ▶ Mais
 - Repose sur un grand nombre de simulations (mieux choisies)
 - Méthode utilisée pour les modèles atmosphériques (Hourdin et al., 2023, Sci. Adv.)
 - ▶ **Comment l'adapter pour le système couplé?** (métriques, échelles de temps différentes)

