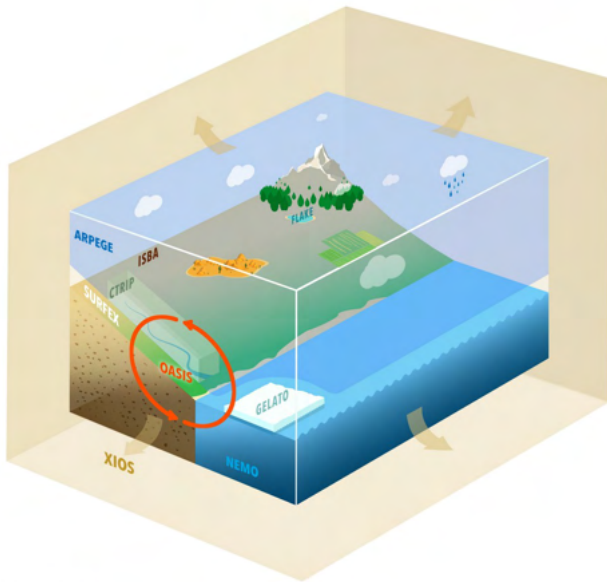
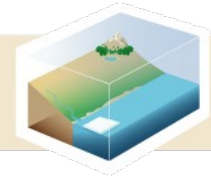


Modèles climatiques globaux : comment les améliorer ?

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

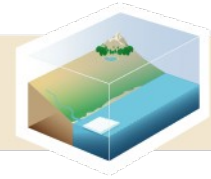




1. Le modèle de climat CNRM-CM : un système complexe
2. Comprendre les propriétés émergentes d'un modèle de climat
 - 1) Comment développe-t-on un modèle ?
 - 2) Décomposer un modèle
 - 3) Simplifier le modèle
3. Comment lever les verrous?

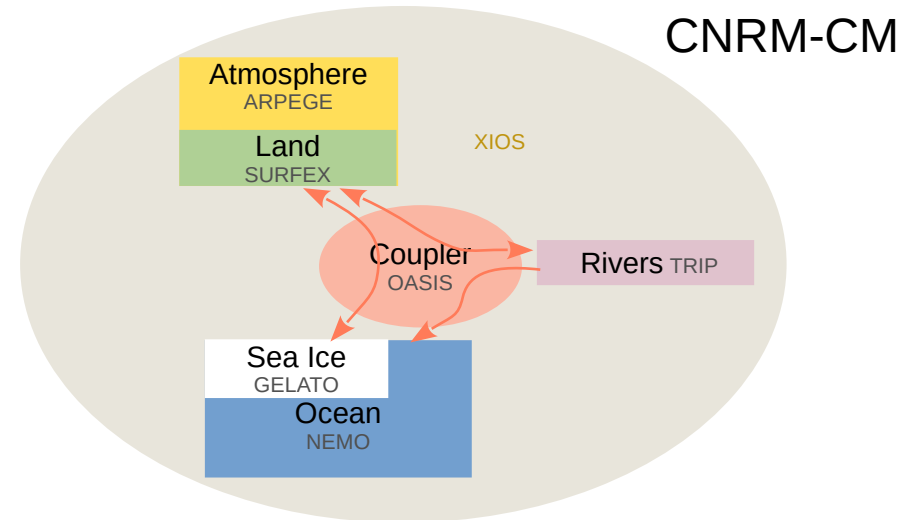
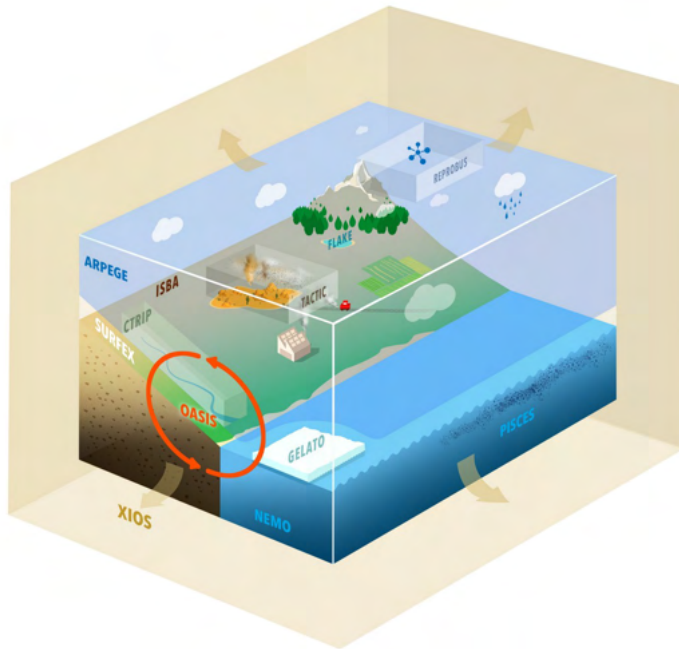
Le modèle de climat CNRM-CM

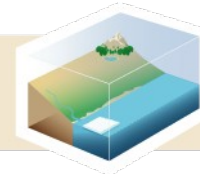
CNRM
CM



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

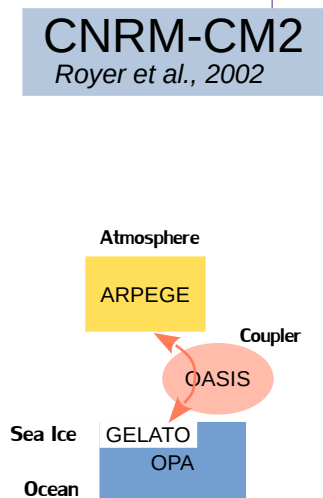
Contexte international

- CMIP : Coupled Model Intercomparison Project

CMIP Phases



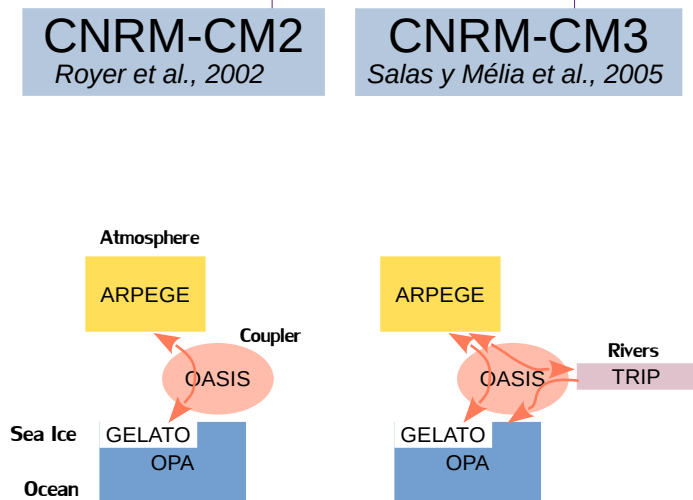
CNRM-CM development history



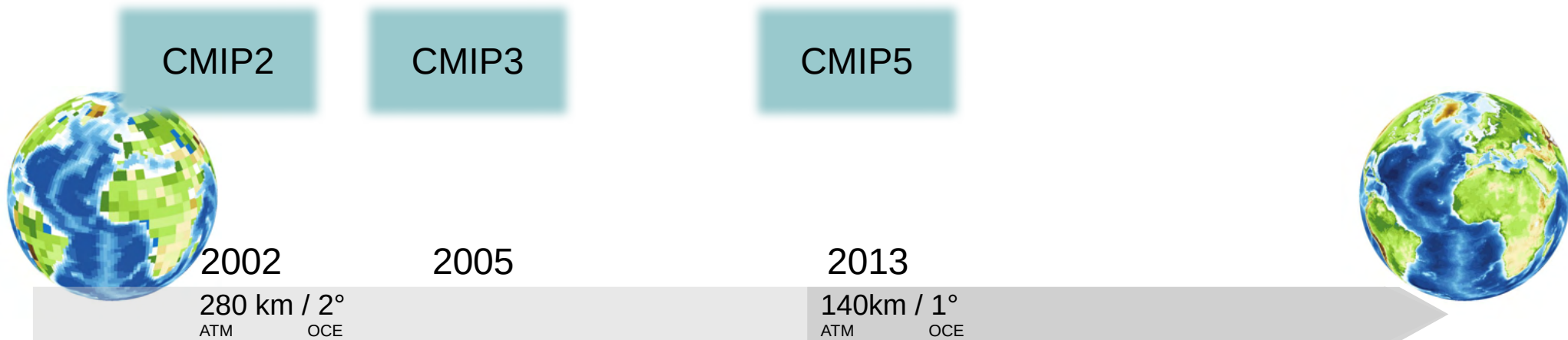
CMIP Phases



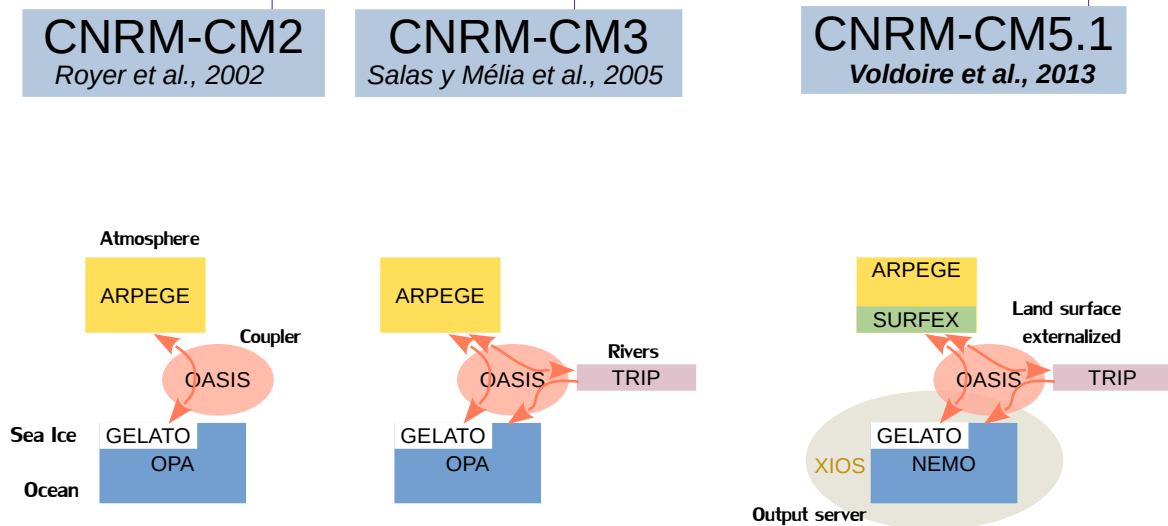
CNRM-CM development history

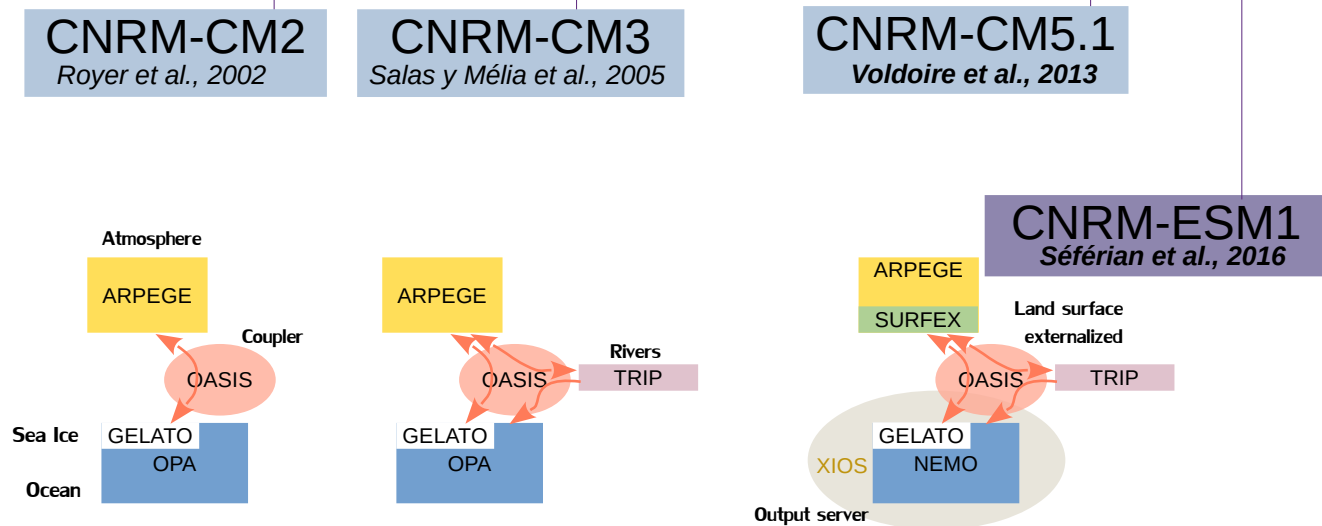
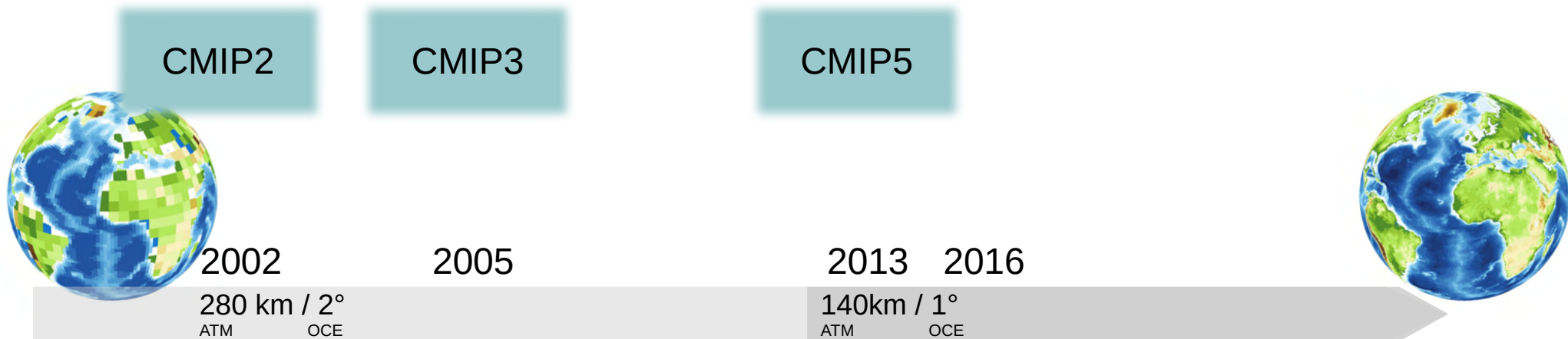


CMIP Phases

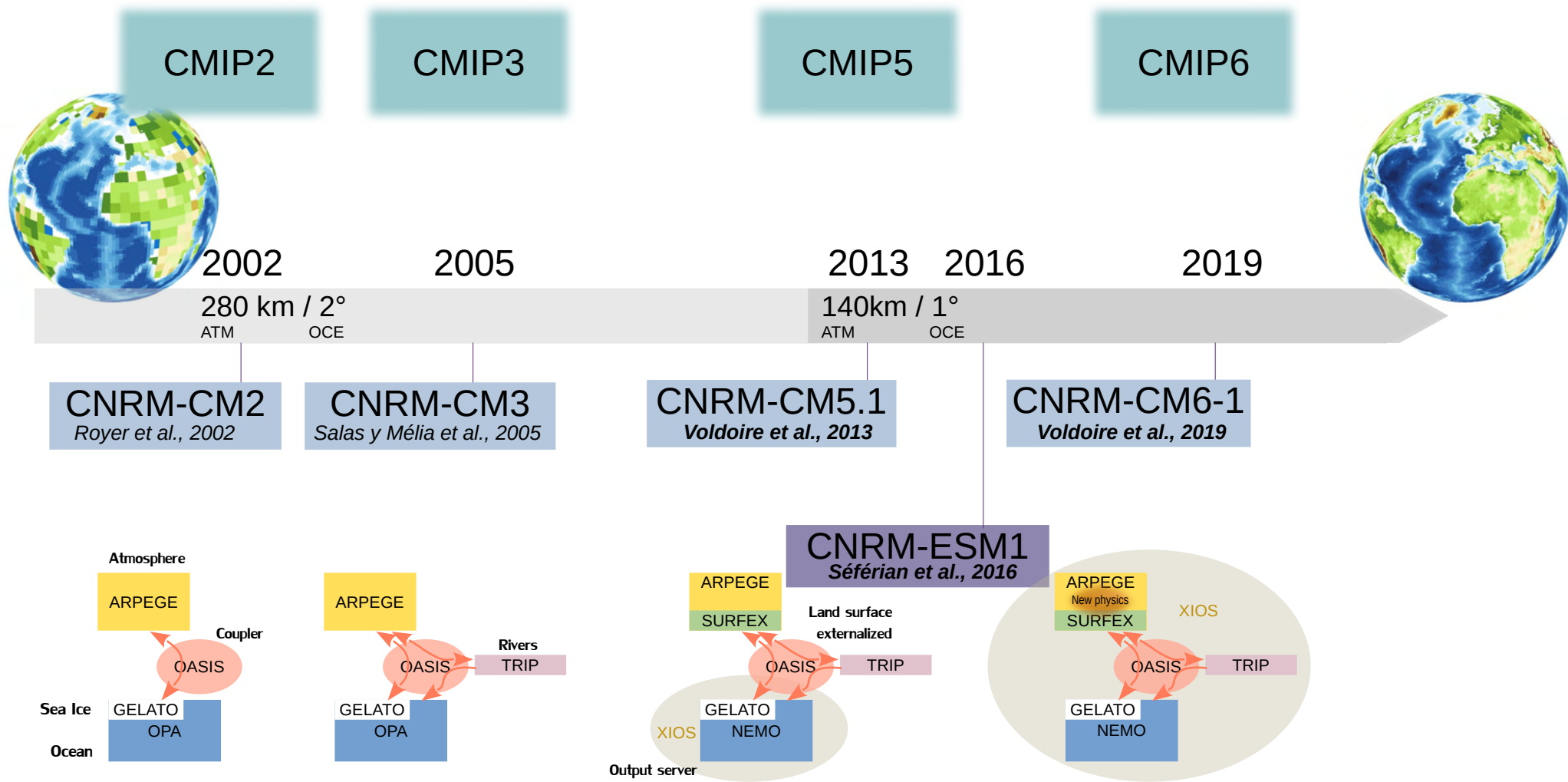


CNRM-CM development history





CNRM-CM development history



CMIP2

CMIP3

CMIP5

CMIP6



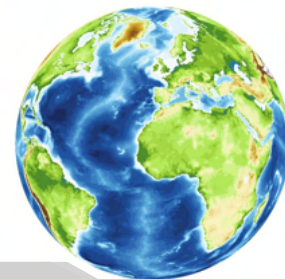
2002

2005

2013

2016

2019

280 km / 2°
ATM OCE140km / 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

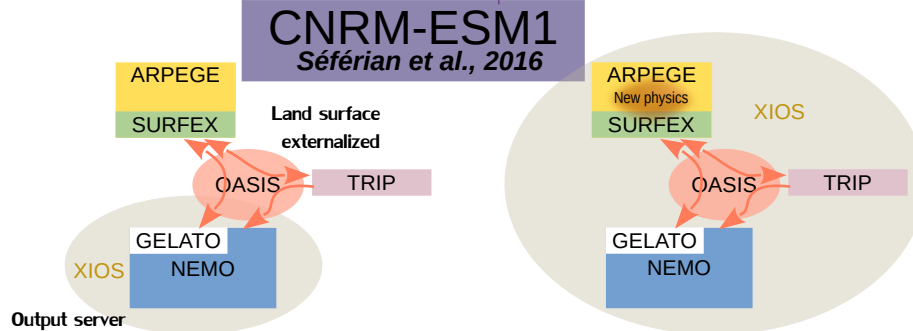
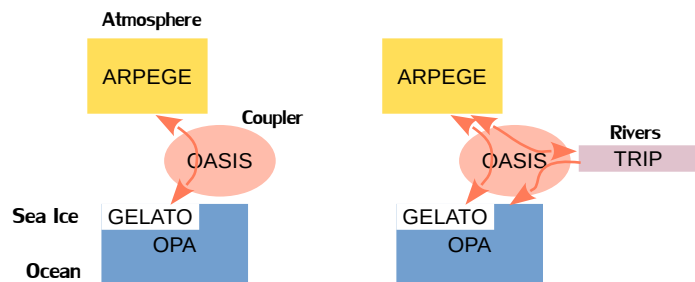
CNRM-CM6-1-HR

Saint-Martin et al., 2020

CNRM-ESM2-1

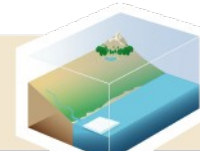
Séférian et al., 2019

CNRM-ESM1

Séférian et al., 2016

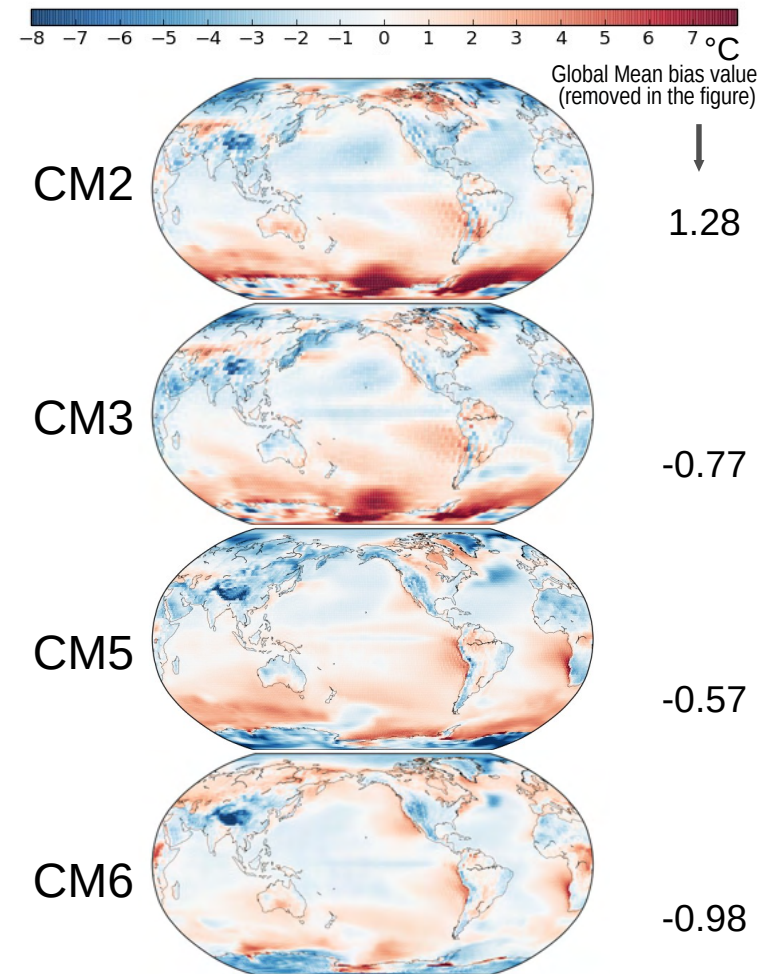
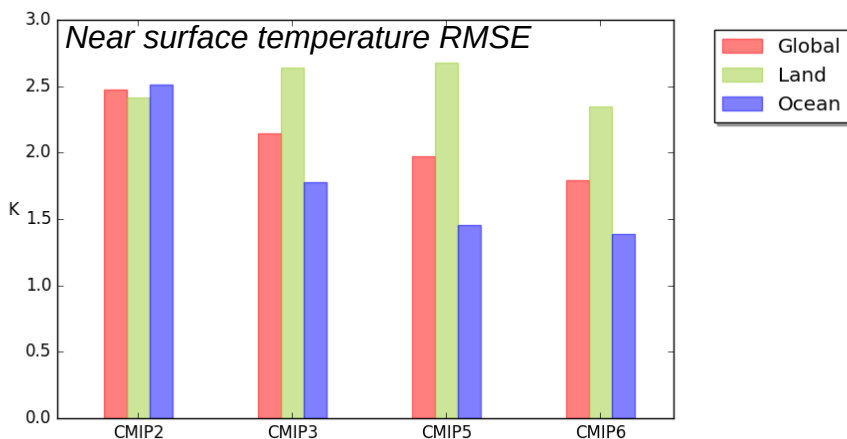
Évaluation du modèle sur ~20 ans

CNRM
CM



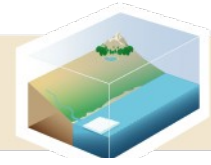
Evolution du biais de température de surface

- 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.



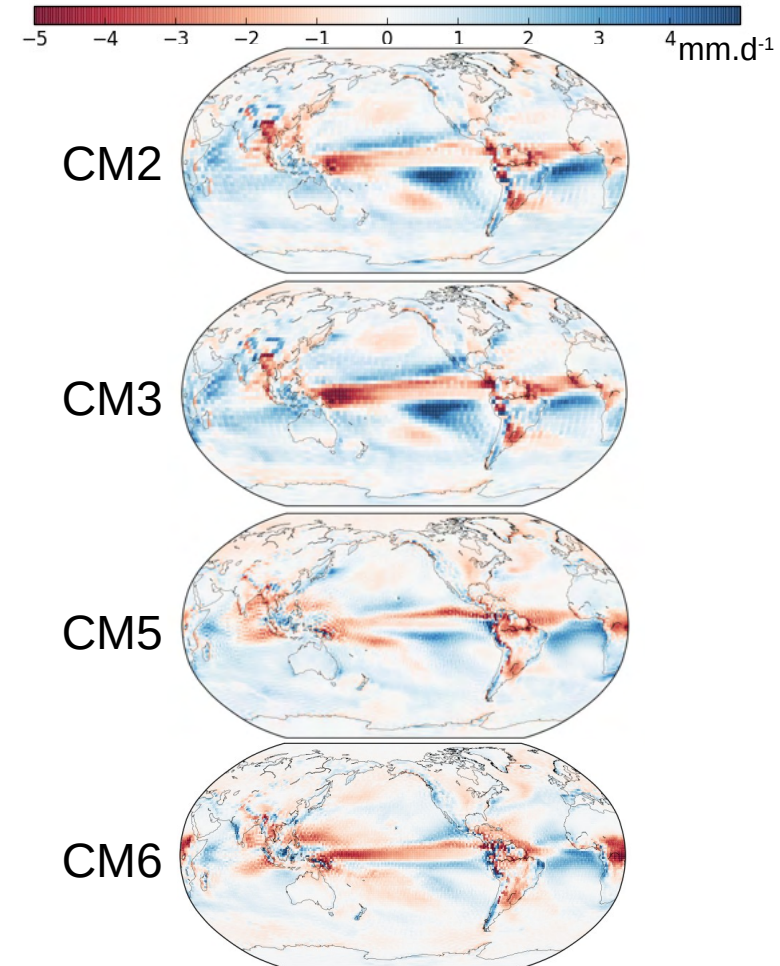
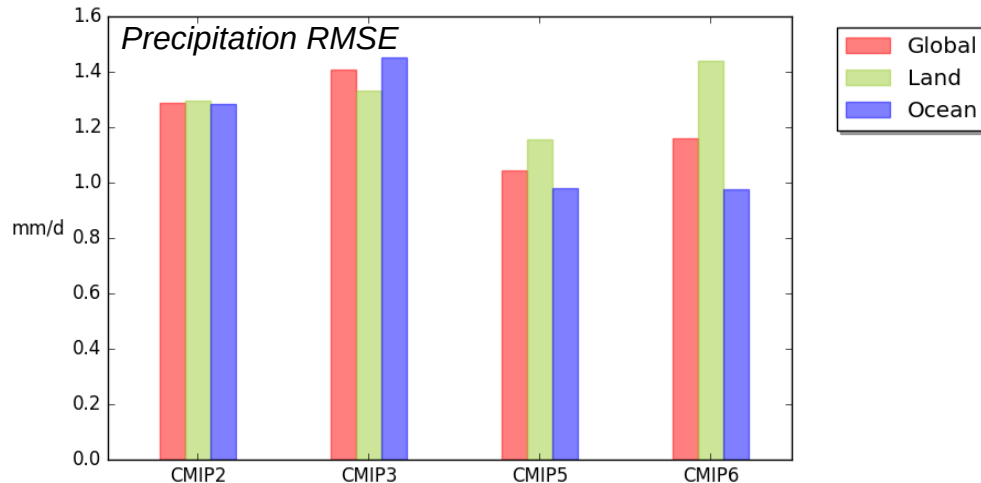
Évaluation du modèle sur ~20 ans

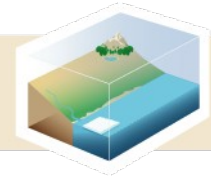
CNRM
CM



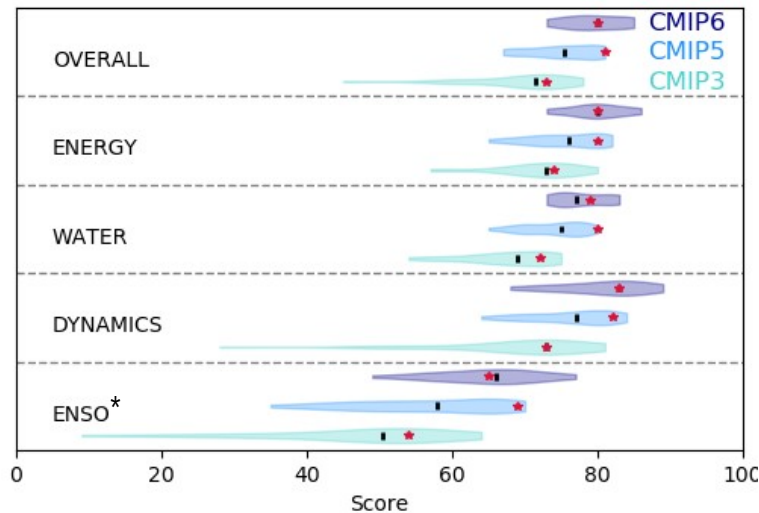
Evolution du biais de **précipitation**

- 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 ?



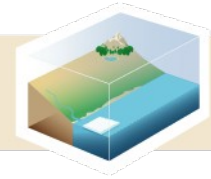


Adapted from Fasullo, 2020



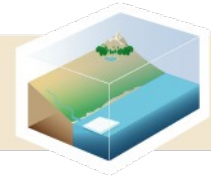
*ENSO : El Nino Southern Oscillation

- 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 ?

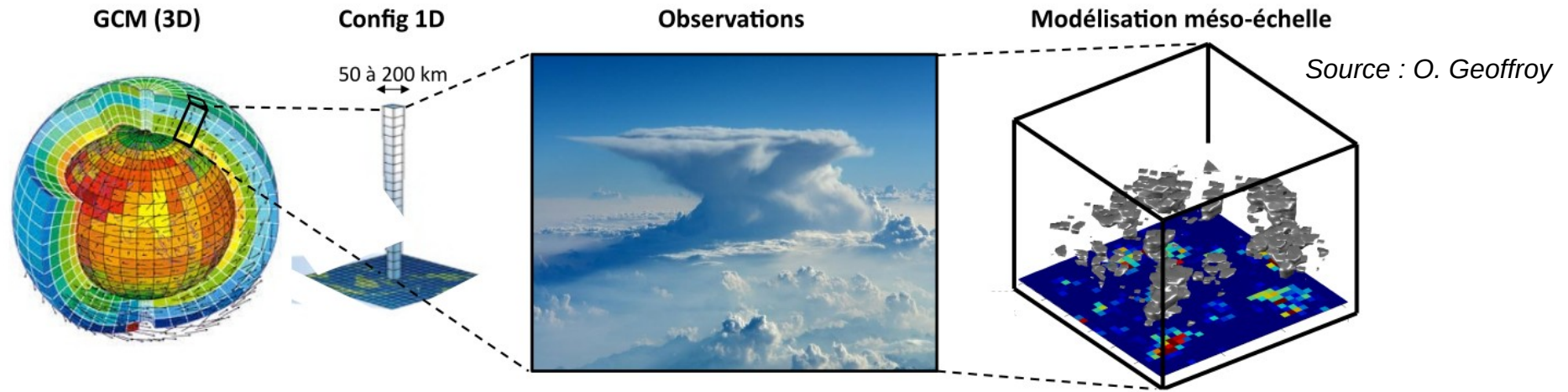


1. Le modèle de climat CNRM-CM : un système complexe
2. Comprendre les propriétés émergentes d'un modèle de climat
 - 1) Comment développe-t-on un modèle ?
 - 2) Décomposer un modèle
 - 3) Simplifier le modèle
3. Comment lever des verrous?

Comment développe-t-on un modèle ?



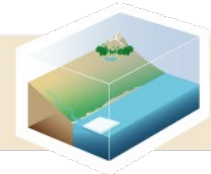
Développement des paramétrisations



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.**

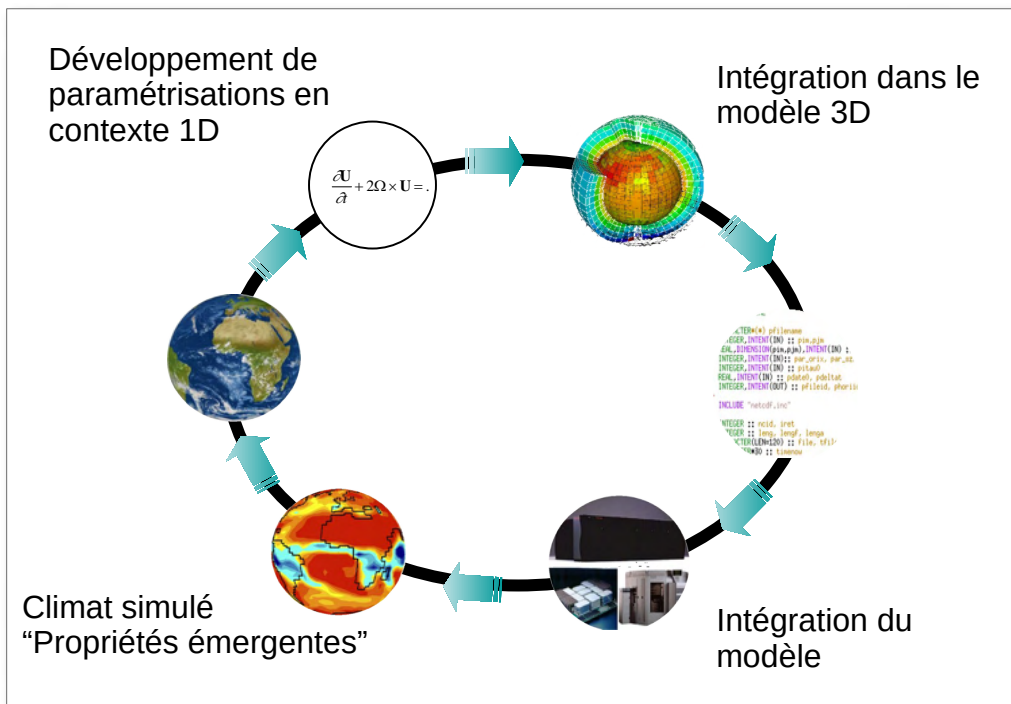
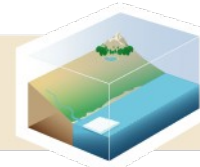


Implique une re-calibration des paramètres des autres processus (illustré dans Hourdin et al., 2013)

- **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 ?

Le cercle vertueux de la modélisation

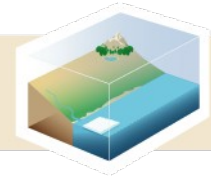


- Les étapes du développement d'un modèle :

- ▶ **Développer** les paramétrisations dans les composantes
 - ▶ **Assembler** les composantes
 - ▶ **Intégrer** le modèle → « découvrir les propriétés émergentes », ie comment le climat est simulé
 - Climat moyen : circulations de Walker/Hadley transport d'énergie équateur-Pôles, ...
 - Variabilité climatique : ENSO, moussons, NAO , extrêmes,...
- Pour le modélisateur :
 - ▶ Un nombre infini (?) de propriétés à évaluer
 - ▶ Comment peut-on relier les propriétés émergentes aux paramétrisations ?

Méthodologies proposées (« top-down »):

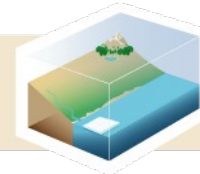
- **Décomposer** les effets a posteriori
- Utiliser des **versions simplifiées**



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?

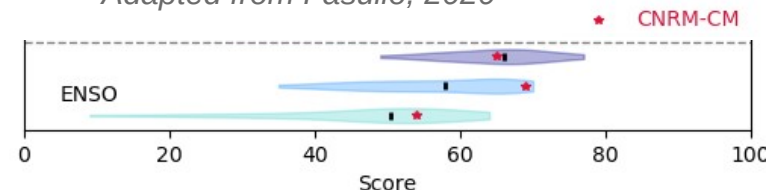
CNRM
CM



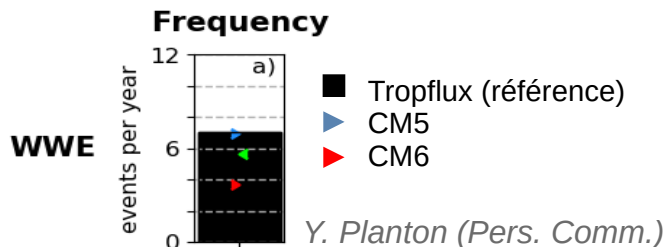
Dans CNRM-CM, la simulation d'ENSO

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

Adapted from Fasullo, 2020



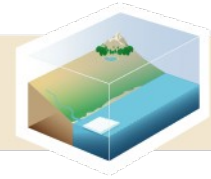
CNRM-CM5 remarquable : représentation très réaliste des coups de vents d'ouest (fréquence, saisonnalité, localisation) cf Puy et al., 2017



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

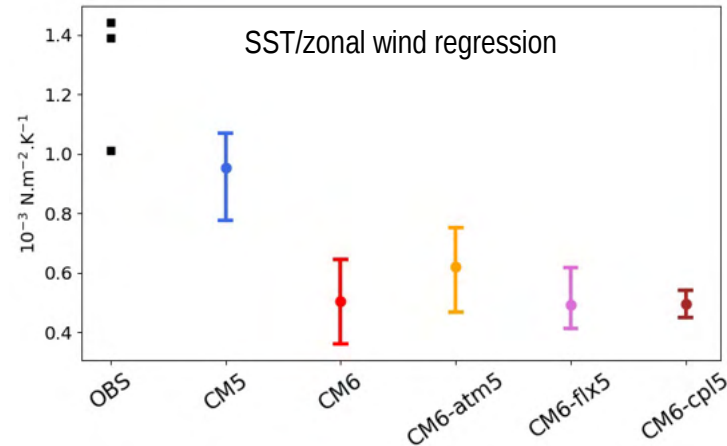
➡ Pourquoi une telle dégradation entre CM5 et CM6?

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)

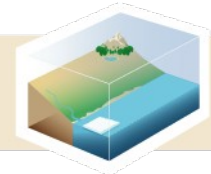


❌ Le changement de relation SST/vent ne semble pas lié aux modifications liées au couplage ou à l'atmosphère :
→ Est-ce dû à la composante océanique ?

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

De CM5 à CM6 : rôle de l'océan ?

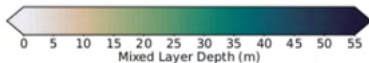
CNRM
CM



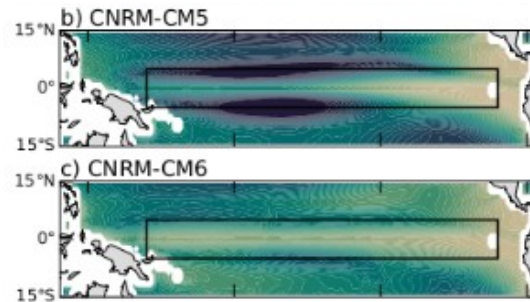
- Comparaison des propriétés émergentes de l'océan dans les 2 versions du modèle :
 - ▶ Modification de l'état moyen de la profondeur de couche de mélange (MLD) : gradients zonaux et méridiens fortement réduits dans le Pacifique équatorial
 - ▶ Réduction des anomalies de profondeur de couche de mélange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

Etat moyen

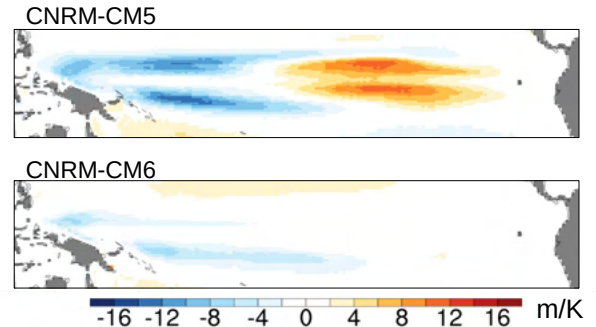
Référence



Mixed layer depth (annual mean, density criteria)

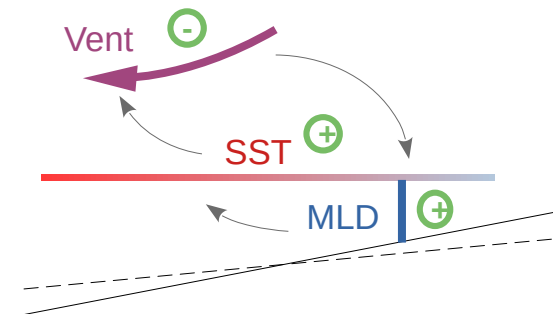


Variabilité



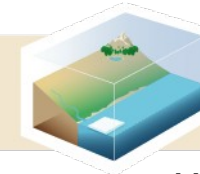
Régression de la MLD sur un indice d'anomalie de SST dans la région Nino3.4

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



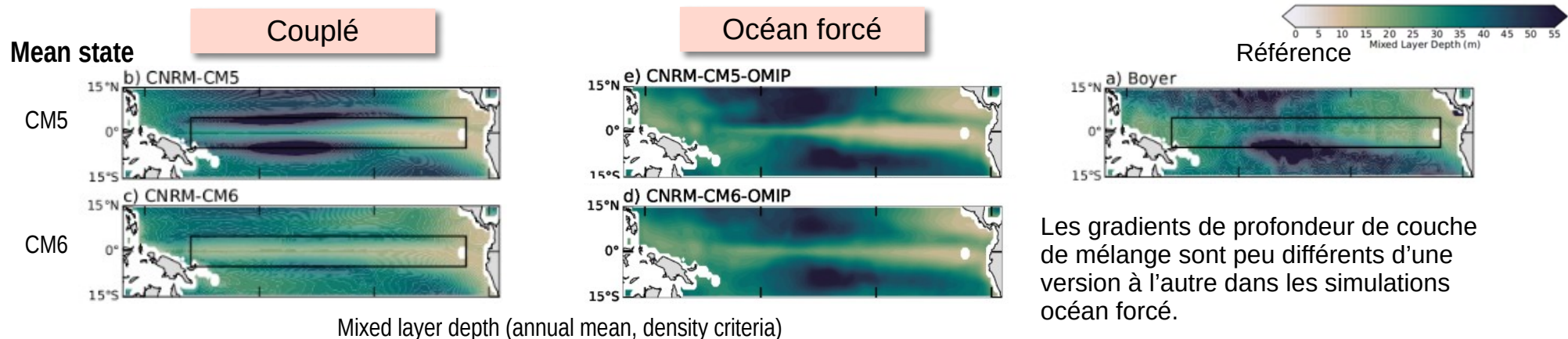
De CM5 à CM6 : rôle de l'océan ?

CNRM
CM

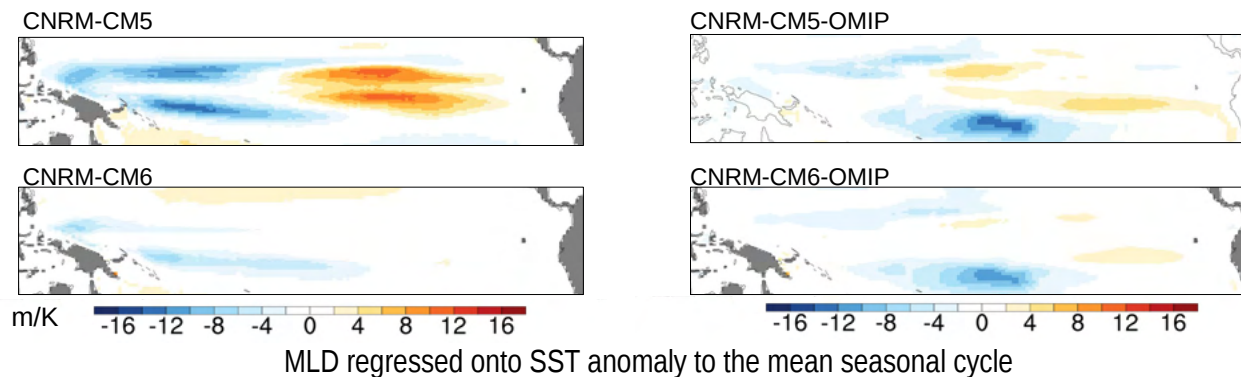


ANR ARISE

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



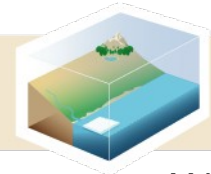
Variability



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



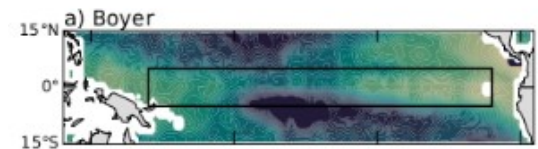
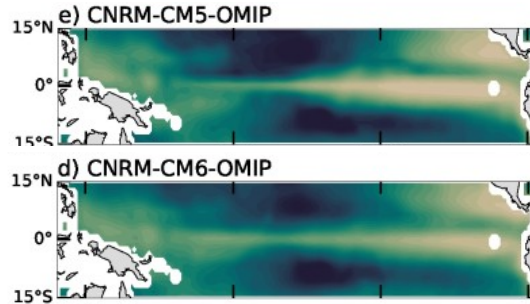
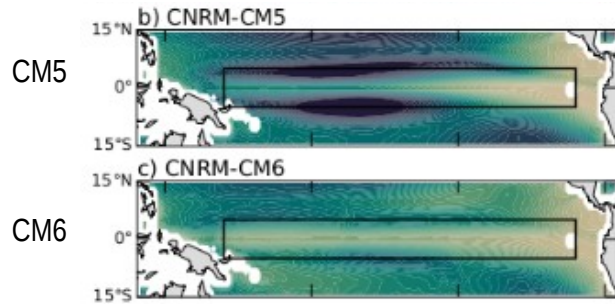
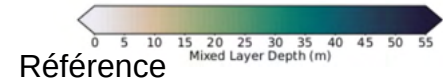
ANR ARISE

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

Mean state

Couplé

Océan forcé

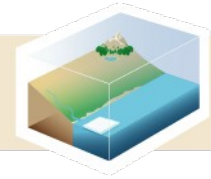


Mixed layer depth (annual mean, density criteria)

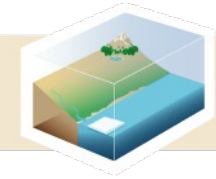
Les gradients de profondeur de couche de mélange sont peu différents d'une version à l'autre dans les simulations océan forcé.

Enquête à poursuivre mais déjà quelques conclusions :

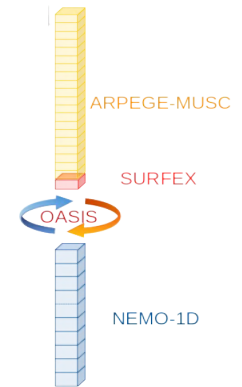
- Les simulations **océan forcé** ne sont pas toujours **informatives** sur les propriétés émergentes de l'océan dans un système couplé.
- Il est difficile de **déconvoluer** l'effet direct d'un changement dans une composante vs le changement d'état moyen induit par les rétroactions.
- Intérêt de développer 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...

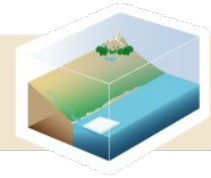


1. Le modèle de climat CNRM-CM : un système complexe
2. Comprendre les propriétés émergentes d'un modèle de climat
 - 1) Comment développe-t-on un modèle ?
 - 2) Décomposer un modèle
 - 3) Simplifier le modèle
3. Comment lever les verrous?



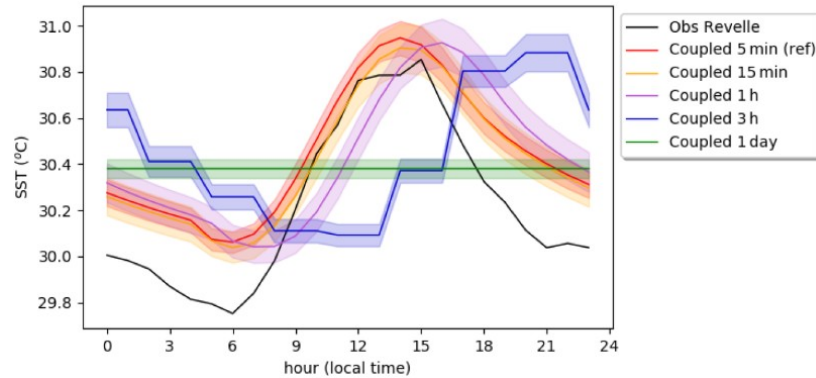
- Développement d'une **version unicolonne** (1D) de CNRM-CM (Voldoire et al., 2022, GMD)
 - ▶ Versions 1D des composantes atmosphérique et surface continentale largement utilisées pour le développement des paramétrisations.
 - ▶ Disponible aussi pour la composante océanique
 - ▶ Implémentation **en 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



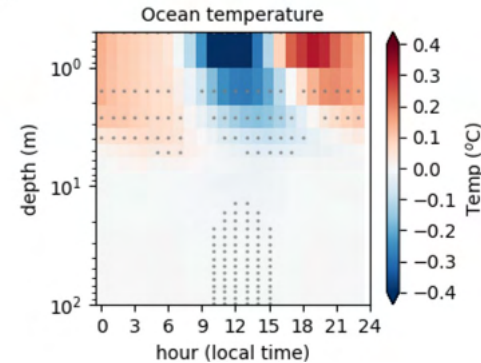


Analyse de l'impact de la **fréquence de couplage** sur les couches limites atmosphérique et océanique

Cas Cindy-Dynamo (ANR COCOA)

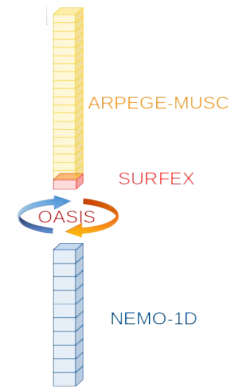


Mean Sea Surface temperature diurnal cycle

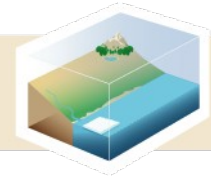


Diurnal cycle mean change in ocean temperature between 5min coupling time-step and 3h coupling time-step

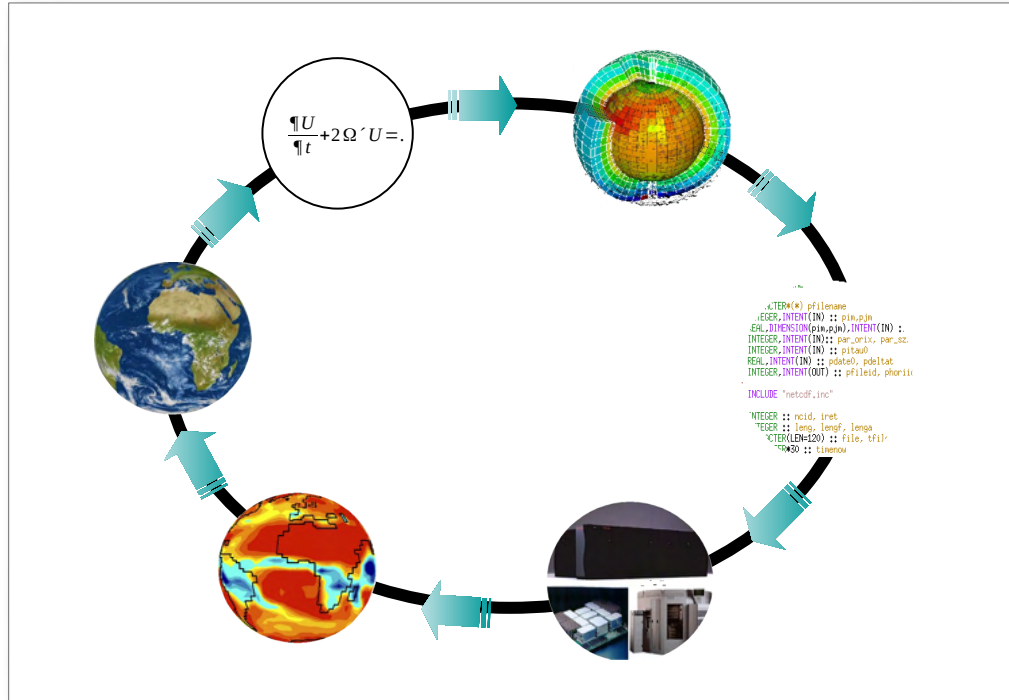
Voldoire et al., 2022, GMD



- 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)



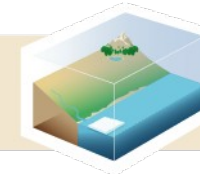
Est-ce que le cercle vertueux de la modélisation est une réalité ?



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

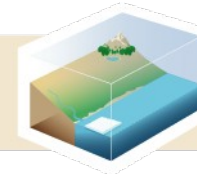
- Il est difficile de relier **les défauts du modèle** directement au contenu des **paramétrisations** : décortiquer le modèle complet demande un effort important, sans gage de réussite.
- La nécessité de **calibration** :
 - ▶ un processus long
 - ▶ qui complique l'analyse à posteriori

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 (Couvreur 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)

