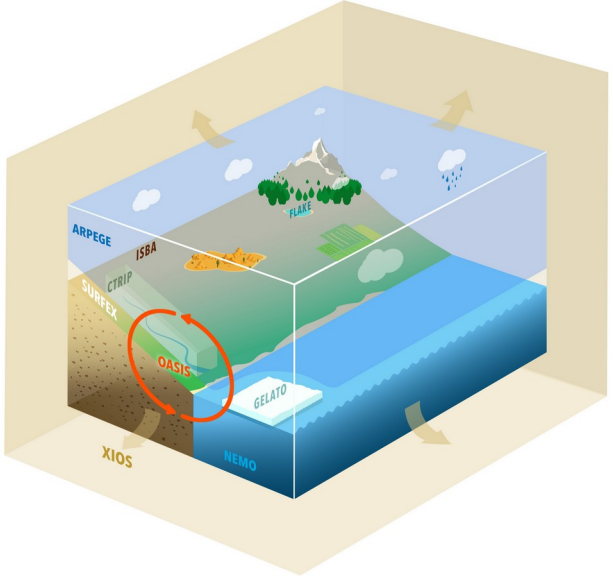
Habilitation à diriger les recherches

Couplage océan-atmosphère-continent dans le système climatique

Aurore Voldoire



Rapporteurs
- P. Braconnot, LSCE, IPSL
- J. Jouanno, LEGOS
- J. Mignot, LOCEAN, IPSL

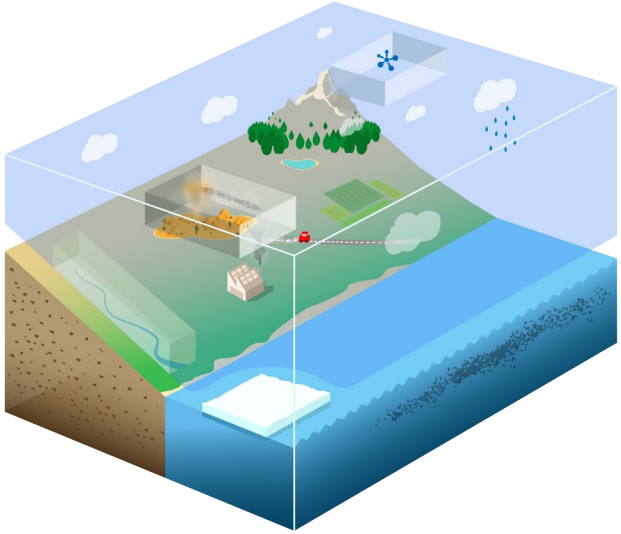
Examinateurs
- J.-L. Dufresne, LMD, IPSL
- G. de Coëtlogon, LATMOS, IPSL

Parrain
- H. Giordani, CNRM

Plan

1. Modélisation climatique
2. Construction du système couplé
3. Déconstruction du modèle pour mieux comprendre
4. Calibration des modèles

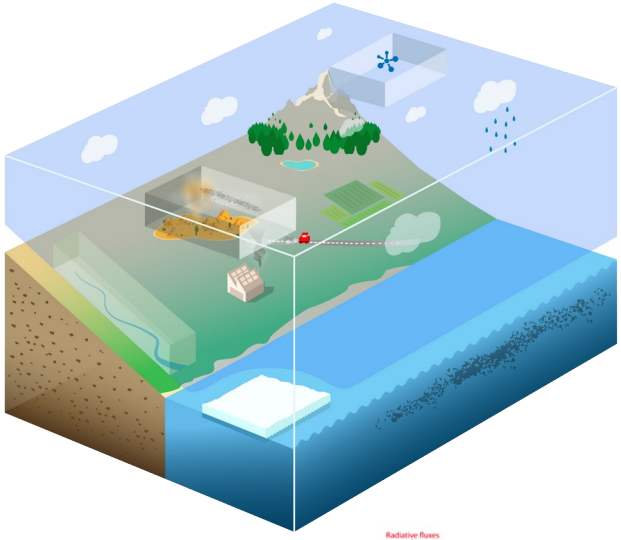
Modélisation climatique

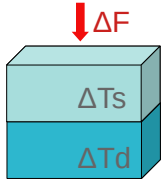


Le système climatique

- Des composantes :
  - Océan
  - Atmosphère
  - Cryosphère
  - Biosphère & hydrologie continentale
- Des flux entre les composantes:
  - Eau
  - Energie
  - ...
- Des interactions à de multiples échelles de temps et d'espace

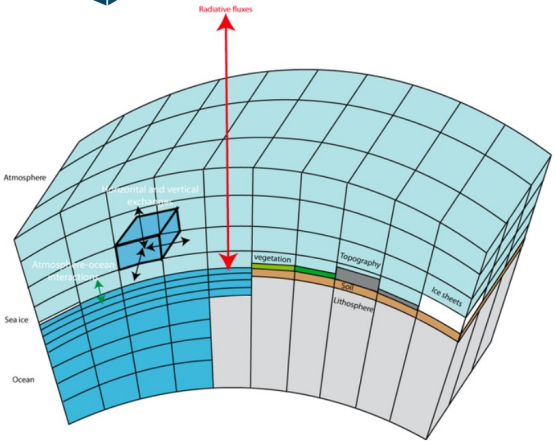
Modélisation climatique





Energy Balance Model (EBM)

Earth System Model (ESM)



Le système climatique

- Des composantes :
  - Océan
  - Atmosphère
  - Cryosphère
  - Biosphère & hydrologie continentale
- Des flux entre les composantes:
  - Eau
  - Energie
  - ...
- Des interactions à de multiples échelles de temps et d'espace

Modèles climatiques

- Une hiérarchie de possibilités (EBM → ESM)
- Adapter l'outil à la question scientifique

1 Modèle de climat au CNRM

Au CNRM-Cerfacs, un modèle de climat global pour quoi faire ?

- Comprendre le système climatique = un laboratoire numérique
- Produire des prévisions saisonnières
- Produire des « projections » futures
  - Une source d'information pour les études d'impact
  - Un outil pour évaluer l'impact de notre comportement sur les futurs possibles

Objectifs de développement commun :

- Echelle temporelle du mois à quelques centaines d'années
- Modèle utilisé pour des études scientifiques variées
  - Version coeur physique : CNRM-CM
  - Version système Terre : CNRM-ESM

Contexte international structurant :

- CMIP : Coupled model Intercomparison Project

CMIP Phases

CMIP2

2002

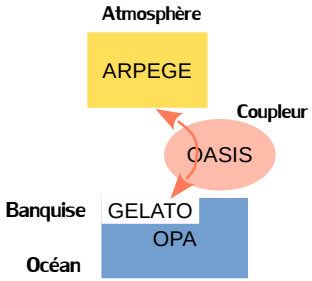
280 km / 2°

ATM OCE

CNRM-CM development history

CNRM-CM2

Royer et al., 2002



CMIP Phases

CMIP2

CMIP3

2002

2005

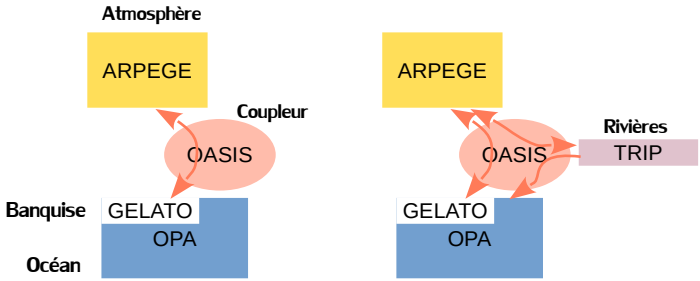
280 km / 2°

ATM OCE

CNRM-CM development history

CNRM-CM2
Royer et al., 2002

CNRM-CM3
Salas y Mélia et al., 2005



CMIP Phases

CMIP2

CMIP3

CMIP5

2002

2005

2013

280 km / 2°
ATM OCE

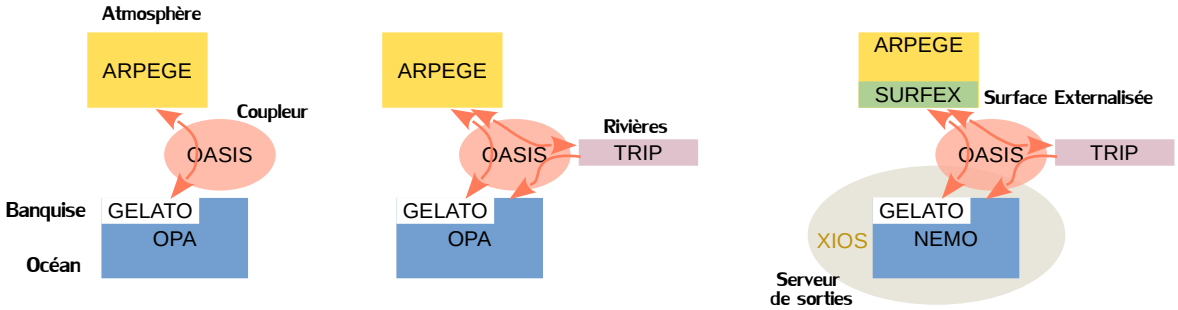
140km / 1°
ATM OCE

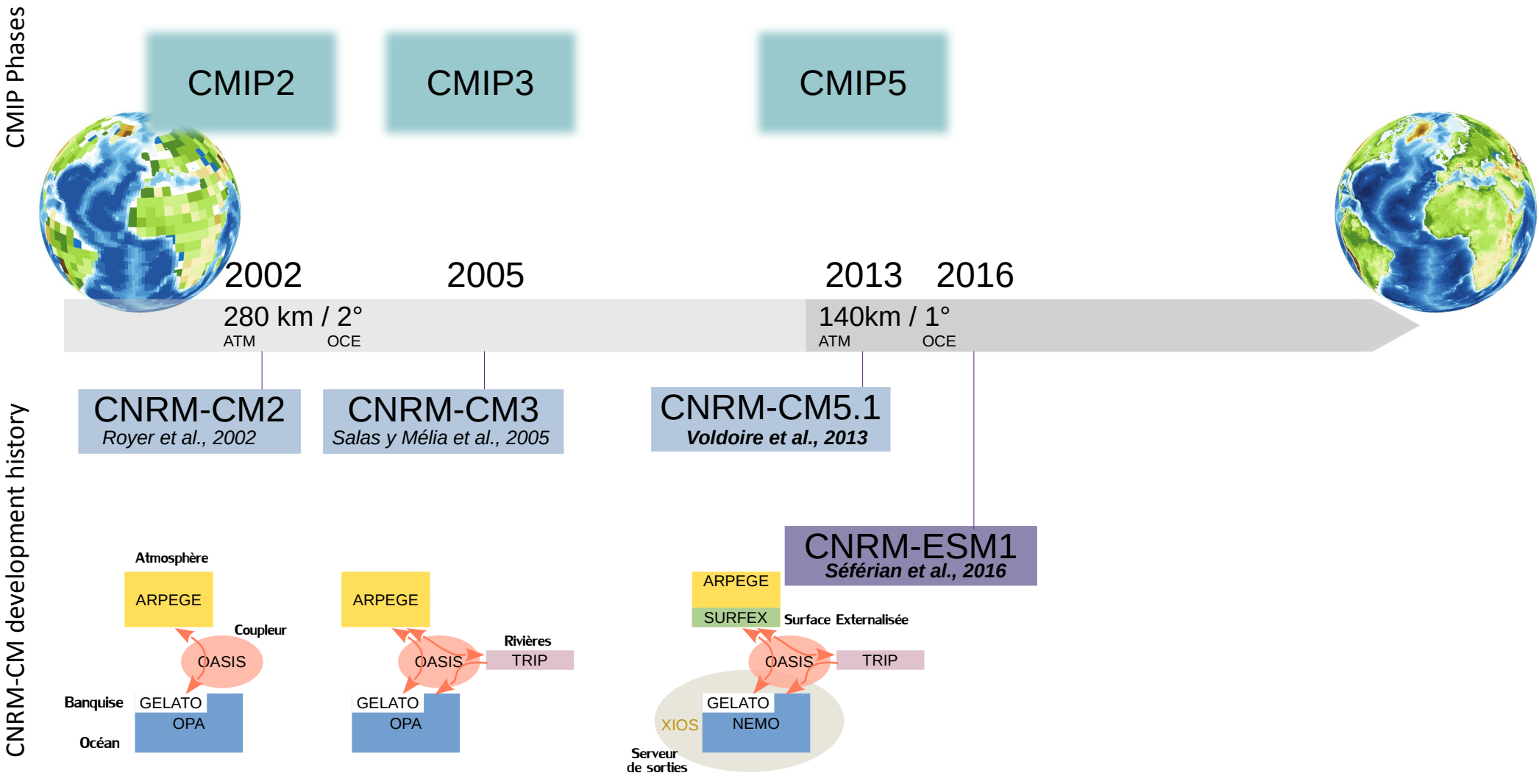
CNRM-CM development history

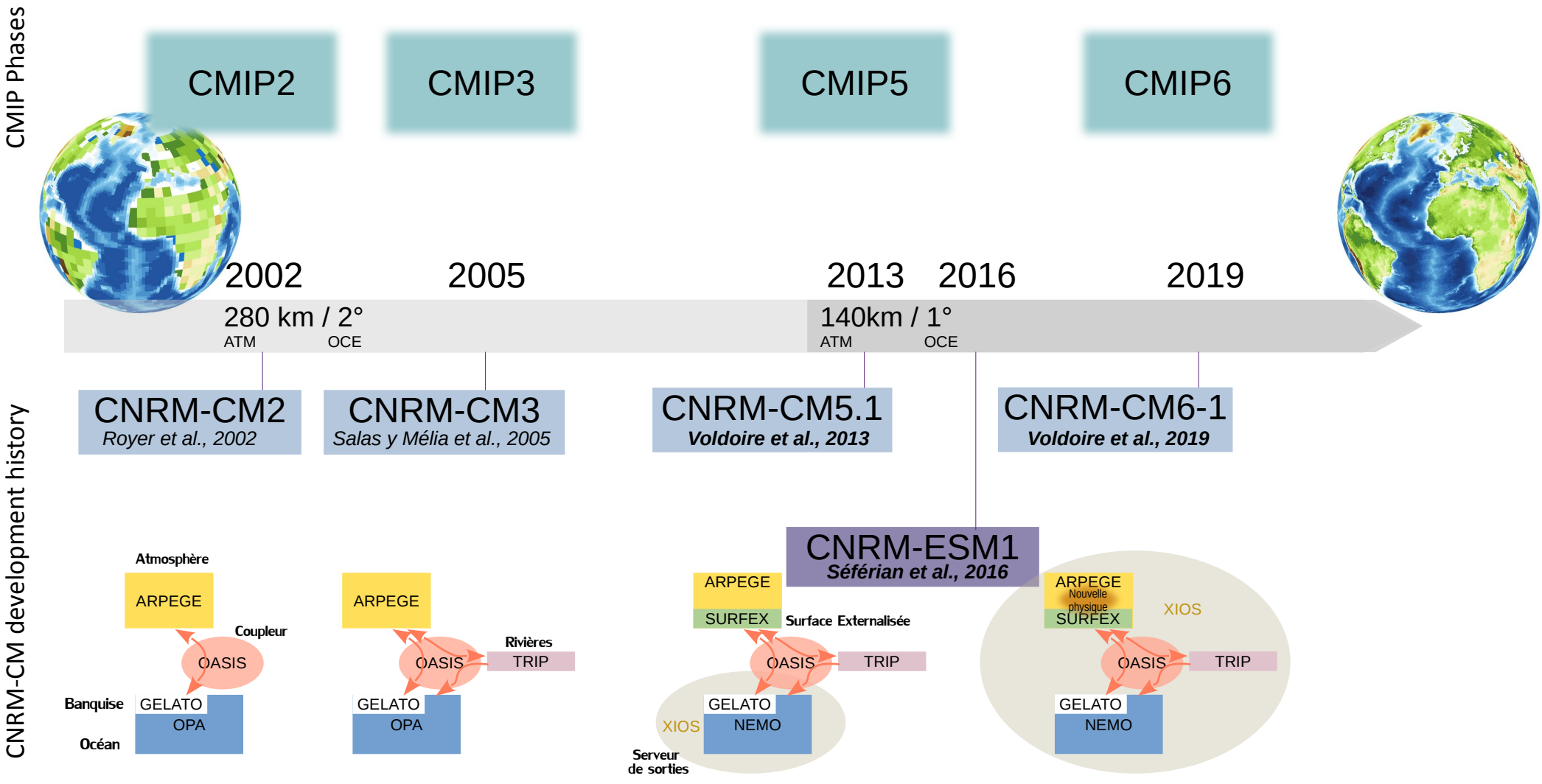
CNRM-CM2
Royer et al., 2002

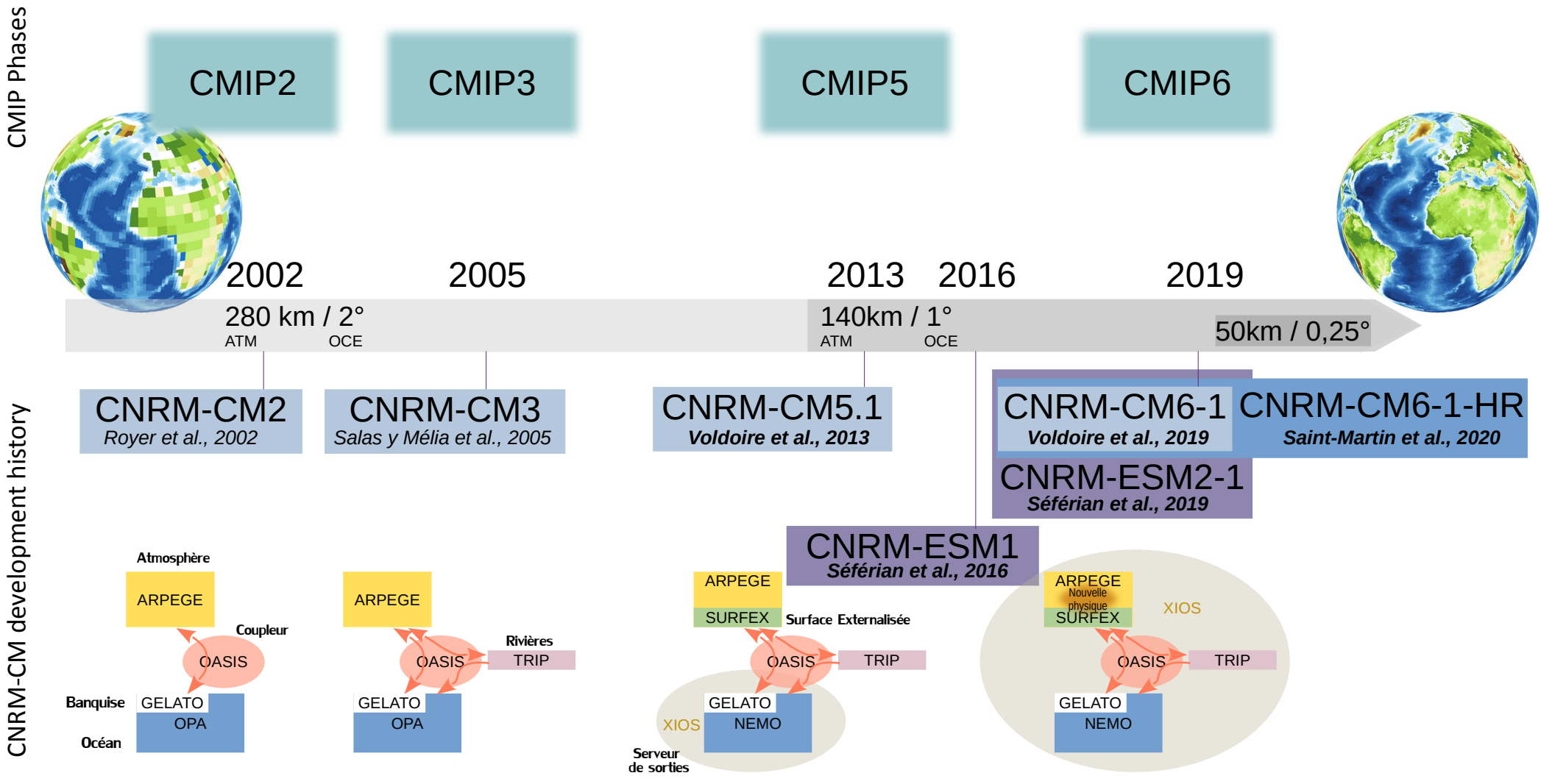
CNRM-CM3
Salas y Mélia et al., 2005

CNRM-CM5.1
Voldoire et al., 2013




CMIP Phases
CMIP2
CMIP3
CMIP5
2002
2005
2013
2016
280 km / 2°
ATM
OCE
140km / 1°
ATM
OCE
CNRM-CM2
Royer et al., 2002
CNRM-CM3
Salas y Mélia et al., 2005
CNRM-CM5.1
Voldoire et al., 2013
CNRM-ESM1
Séférian et al., 2016
CNRM-CM development history
Atmosphère
ARPEGE
Coupleur
OASIS
Banquise
GELATO
OPA
Océan
ARPEGE
Rivières
OASIS
TRIP
GELATO
OPA
ARPEGE
SURFEX
Surface Externalisée
OASIS
TRIP
GELATO
XIOS
NEMO
Serveur
de sorties


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 Mélia et al., 2005
CNRM-CM5.1
Voldoire et al., 2013
CNRM-CM6-1
Voldoire et al., 2019
CNRM-ESM1
Séférian et al., 2016
CNRM-CM development history
Atmosphère
ARPEGE
Coupleur
OASIS
Banquise
GELATO
OPA
Océan
ARPEGE
OASIS
Rivières
TRIP
GELATO
OPA
ARPEGE
SURFEX
Surface Externalisée
OASIS
TRIP
XIOS
GELATO
NEMO
Serveur
de sorties
ARPEGE
Nouvelle
physique
SURFEX
XIOS
OASIS
TRIP
GELATO
NEMO


CMIP Phases
CMIP2
CMIP3
CMIP5
CMIP6
2002
2005
2013
2016
2019
280 km / 2°
ATM
OCE
140km / 1°
ATM
OCE
50km / 0,25°
CNRM-CM development history
CNRM-CM2
Royer et al., 2002
CNRM-CM3
Salas y Mélia et al., 2005
CNRM-CM5.1
Voldoire et al., 2013
CNRM-CM6-1
Voldoire 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
Atmosphère
ARPEGE
Coupleur
OASIS
Banquise
GELATO
OPA
Océan
ARPEGE
OASIS
Rivières
TRIP
GELATO
OPA
ARPEGE
SURFEX
Surface Externalisée
OASIS
TRIP
XIOS
GELATO
NEMO
Serveur
de sorties
ARPEGE
Nouvelle
physique
SURFEX
XIOS
OASIS
TRIP
GELATO
NEMO

Plan

1. Modélisation climatique

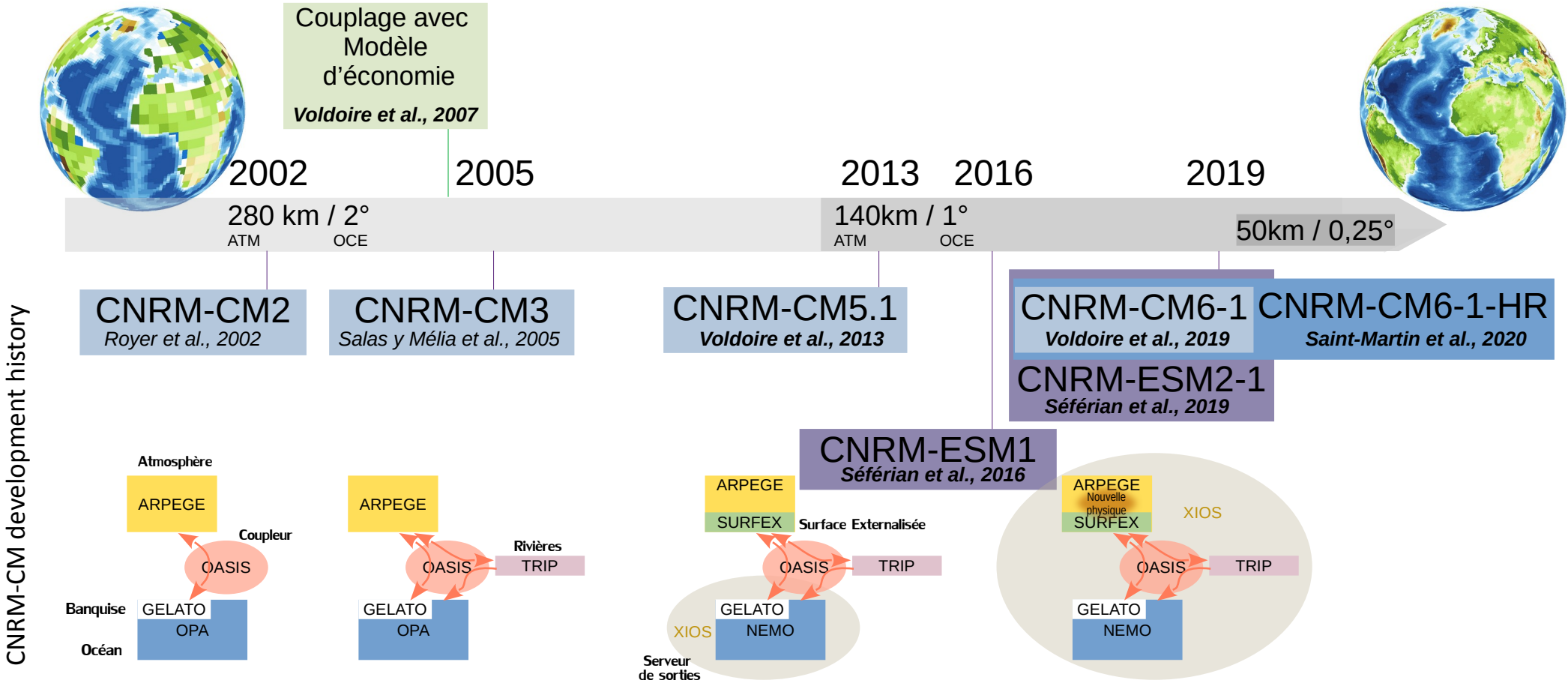
2. Construction du système couplé

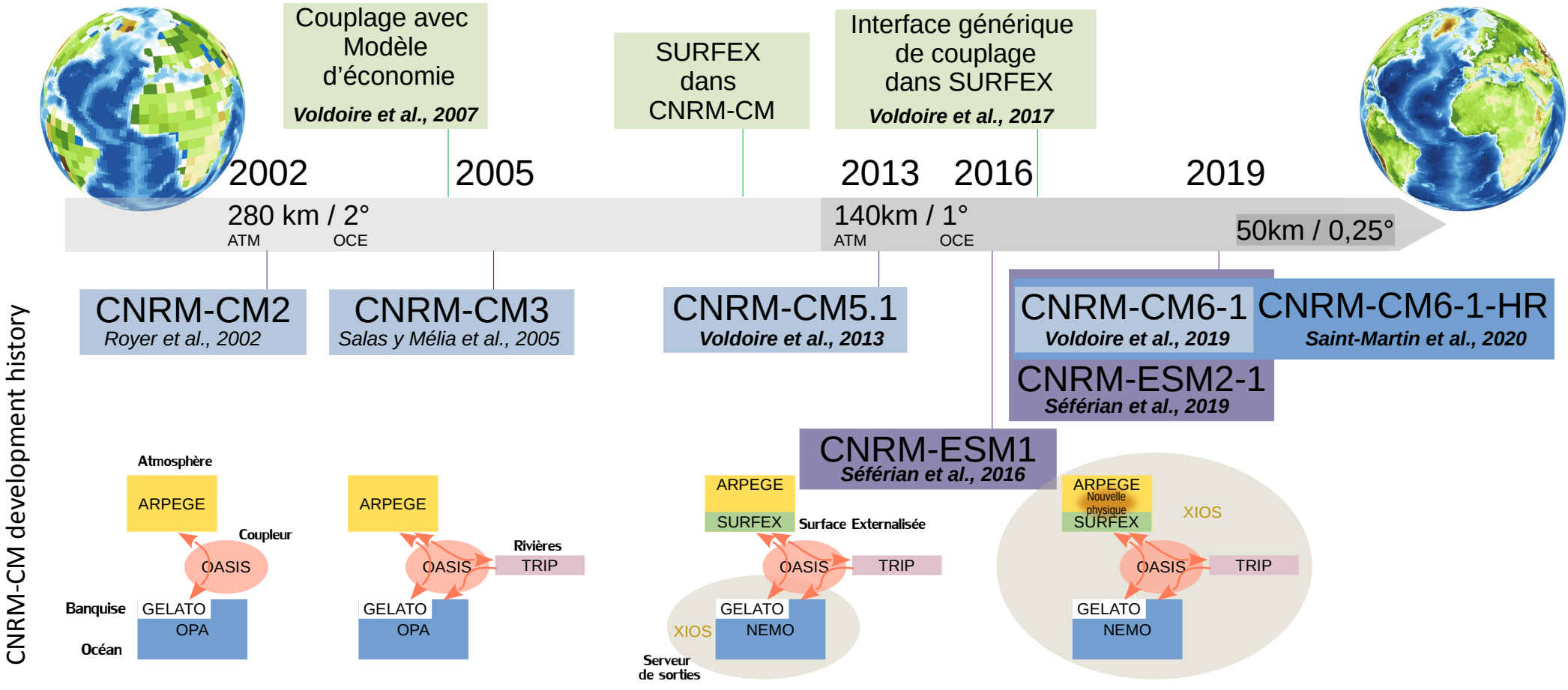
   2.1 Mes contributions au développement de CNRM-CM

   2.2 Evolution des performances sur 20 ans

3. Déconstruction du modèle pour mieux comprendre

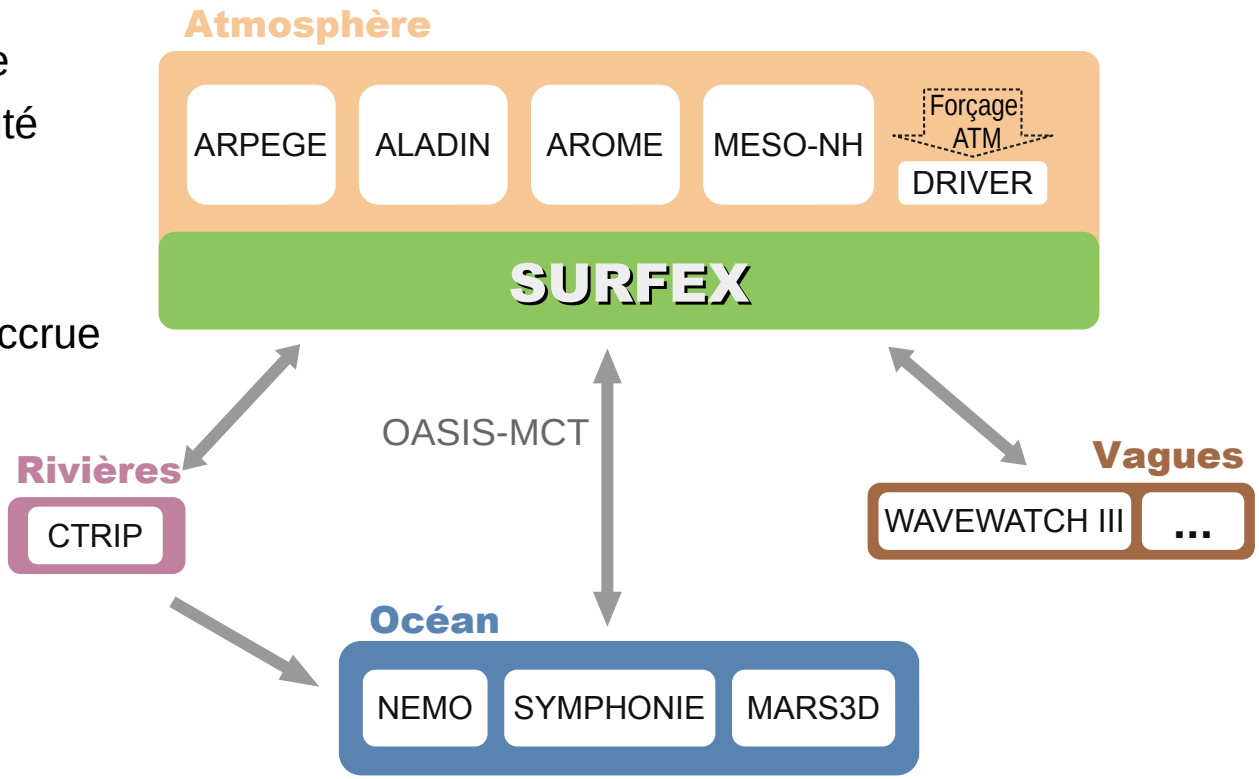
4. Calibration des modèles


CNRM-CM development history
Couplage avec Modèle d'économie
Voldoire et al., 2007
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
Voldoire et al., 2013
CNRM-CM6-1
Voldoire 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
Atmosphère
ARPEGE
Coupleur
OASIS
Banquise
GELATO
OPA
Océan
ARPEGE
OASIS
Rivières
TRIP
GELATO
OPA
ARPEGE
SURFEX
Surface Externalisée
OASIS
TRIP
XIOS
GELATO
NEMO
Serveur de sorties
ARPEGE
Nouvelle physique
SURFEX
XIOS
OASIS
TRIP
GELATO
NEMO

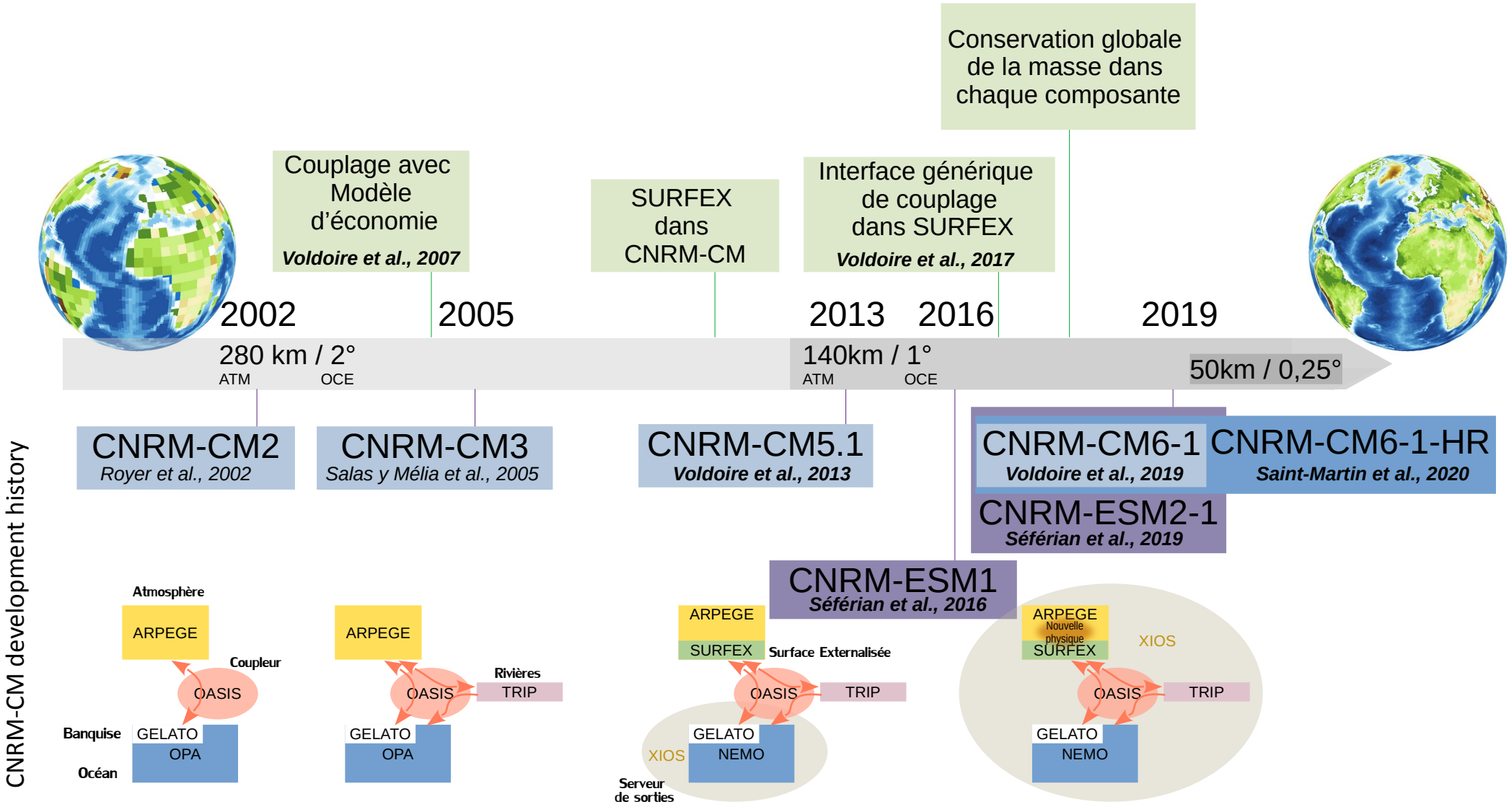

CNRM-CM development history
Couplage avec Modèle d'économie
Voldoire et al., 2007
SURFEX dans CNRM-CM
Interface générique de couplage dans SURFEX
Voldoire et al., 2017
2002
2005
2013
2016
2019
280 km / 2°
ATM
OCE
140km / 1°
ATM
OCE
50km / 0,25°
CNRM-CM2
Royer et al., 2002
CNRM-CM3
Salas y Mélia et al., 2005
CNRM-CM5.1
Voldoire et al., 2013
CNRM-CM6-1
Voldoire 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
Atmosphère
ARPEGE
Coupleur
OASIS
Banquise
GELATO
OPA
Océan
ARPEGE
OASIS
Rivières
TRIP
GELATO
OPA
ARPEGE
SURFEX
Surface Externalisée
OASIS
TRIP
XIOS
GELATO
NEMO
Serveur de sorties
ARPEGE
Nouvelle physique
SURFEX
XIOS
OASIS
TRIP
GELATO
NEMO

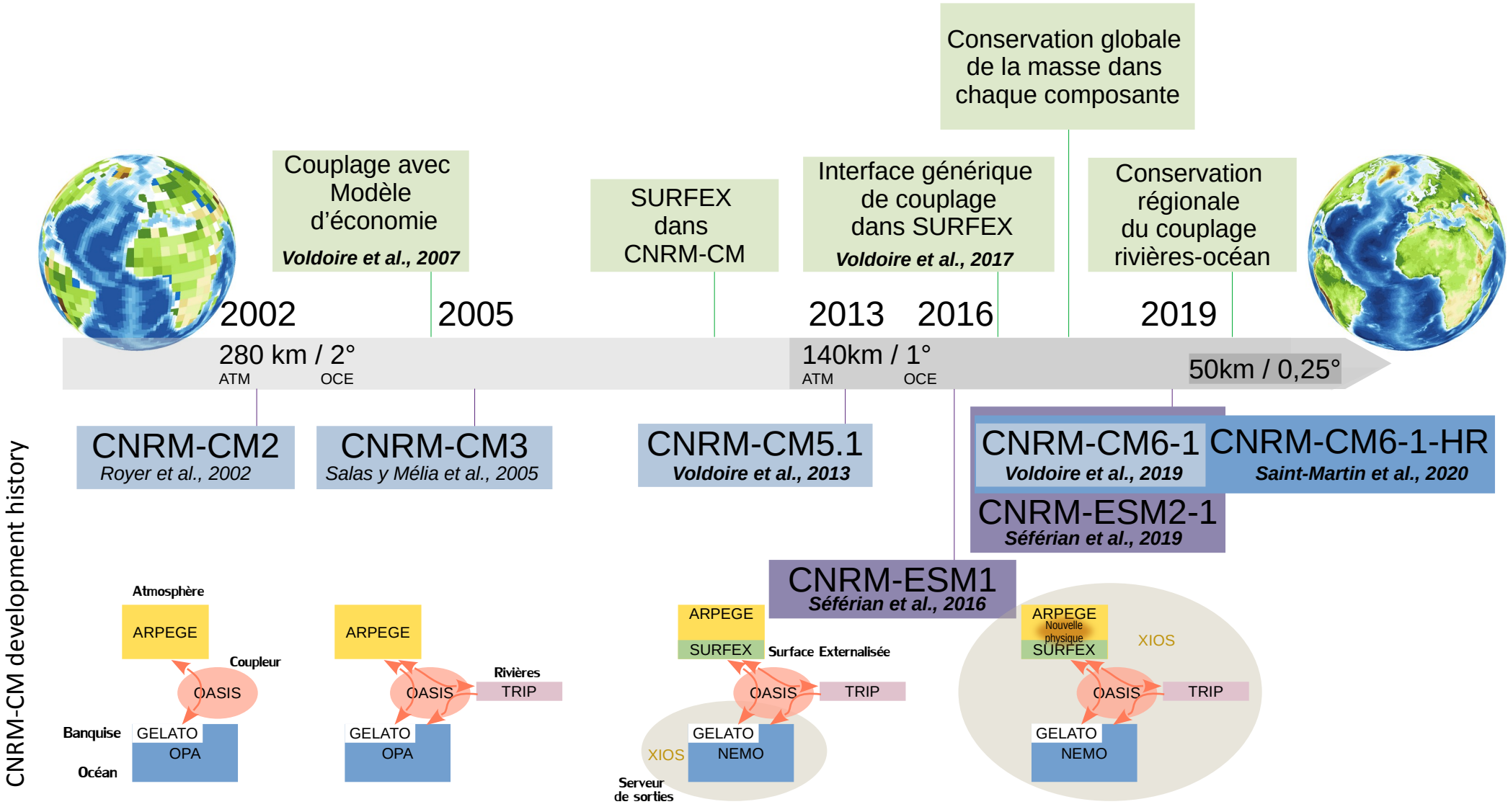
2.1 SURFEX : interface de couplage générique

- Une interface de couplage mutualisée
  - bénéficie à une large communauté
  - transfert de compétences facilité
- Déconstruction du système facilitée
  - capacité d'analyse scientifique accrue



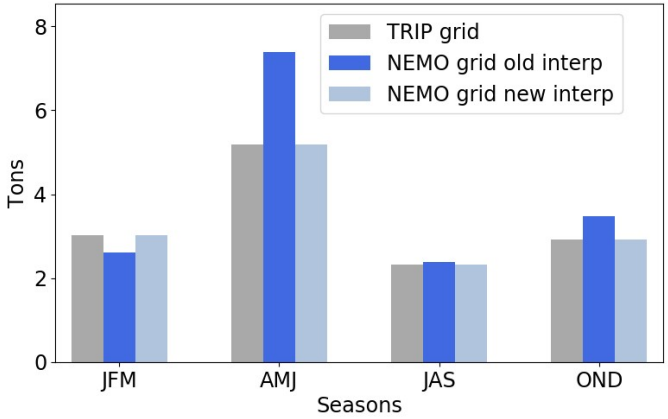
Voldoire et al., 2017


CNRM-CM development history
Couplage avec Modèle d'économie
Voldoire et al., 2007
SURFEX dans CNRM-CM
Interface générique de couplage dans SURFEX
Voldoire et al., 2017
Conservation globale de la masse dans chaque composante
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
Voldoire et al., 2013
CNRM-CM6-1
Voldoire 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
Atmosphère
ARPEGE
Coupleur
OASIS
Banquise
GELATO
OPA
Océan
ARPEGE
OASIS
Rivières
TRIP
GELATO
OPA
ARPEGE
SURFEX
Surface Externalisée
OASIS
TRIP
XIOS
GELATO
NEMO
Serveur de sorties
ARPEGE
Nouvelle physique
SURFEX
XIOS
OASIS
TRIP
GELATO
NEMO


CNRM-CM development history
Couplage avec Modèle d'économie
Voldoire et al., 2007
SURFEX dans CNRM-CM
Interface générique de couplage dans SURFEX
Voldoire et al., 2017
Conservation globale de la masse dans chaque composante
Conservation régionale du couplage rivières-océan
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
Voldoire et al., 2013
CNRM-CM6-1
Voldoire 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
Atmosphère
ARPEGE
Coupleur
OASIS
Banquise
GELATO
OPA
Océan
ARPEGE
OASIS
Rivières
TRIP
GELATO
OPA
ARPEGE
SURFEX
Surface Externalisée
OASIS
TRIP
XIOS
GELATO
NEMO
Serveur de sorties
ARPEGE
Nouvelle physique
SURFEX
XIOS
OASIS
TRIP
GELATO
NEMO

2.1 Couplage rivières-océan

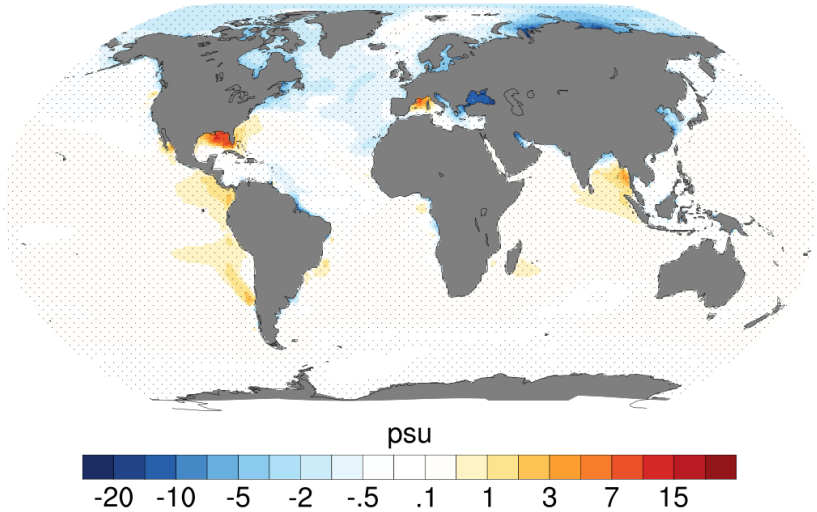
- Constat : méthode de couplage permet la conservation de l'eau globalement mais pas régionalement
- Nouvelle méthode
  - conservative régionalement
  - générique applicable à toutes résolutions/grilles



Cycle saisonnier de l'intégrale des flux d'eau des rivières autour de l'Islande

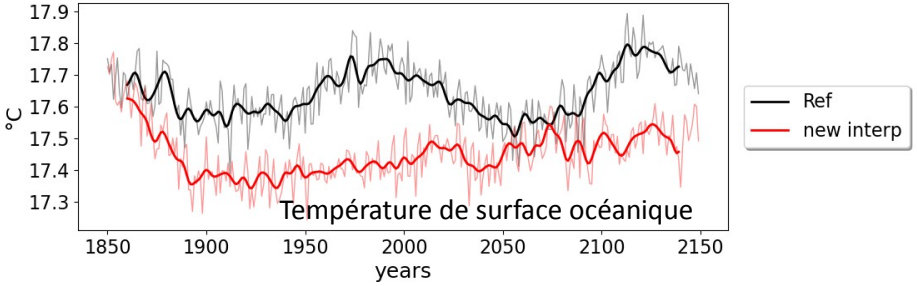
2.1 Impact sur le climat simulé

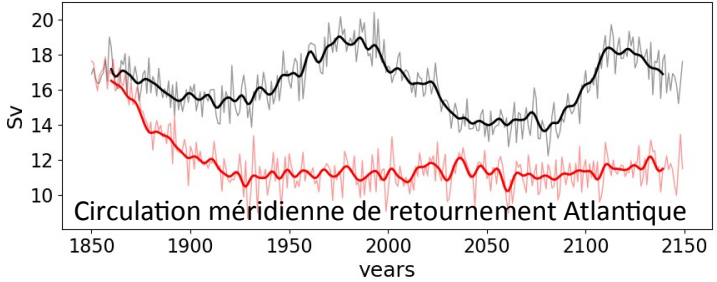
Changement de la salinité de surface (100 ans)

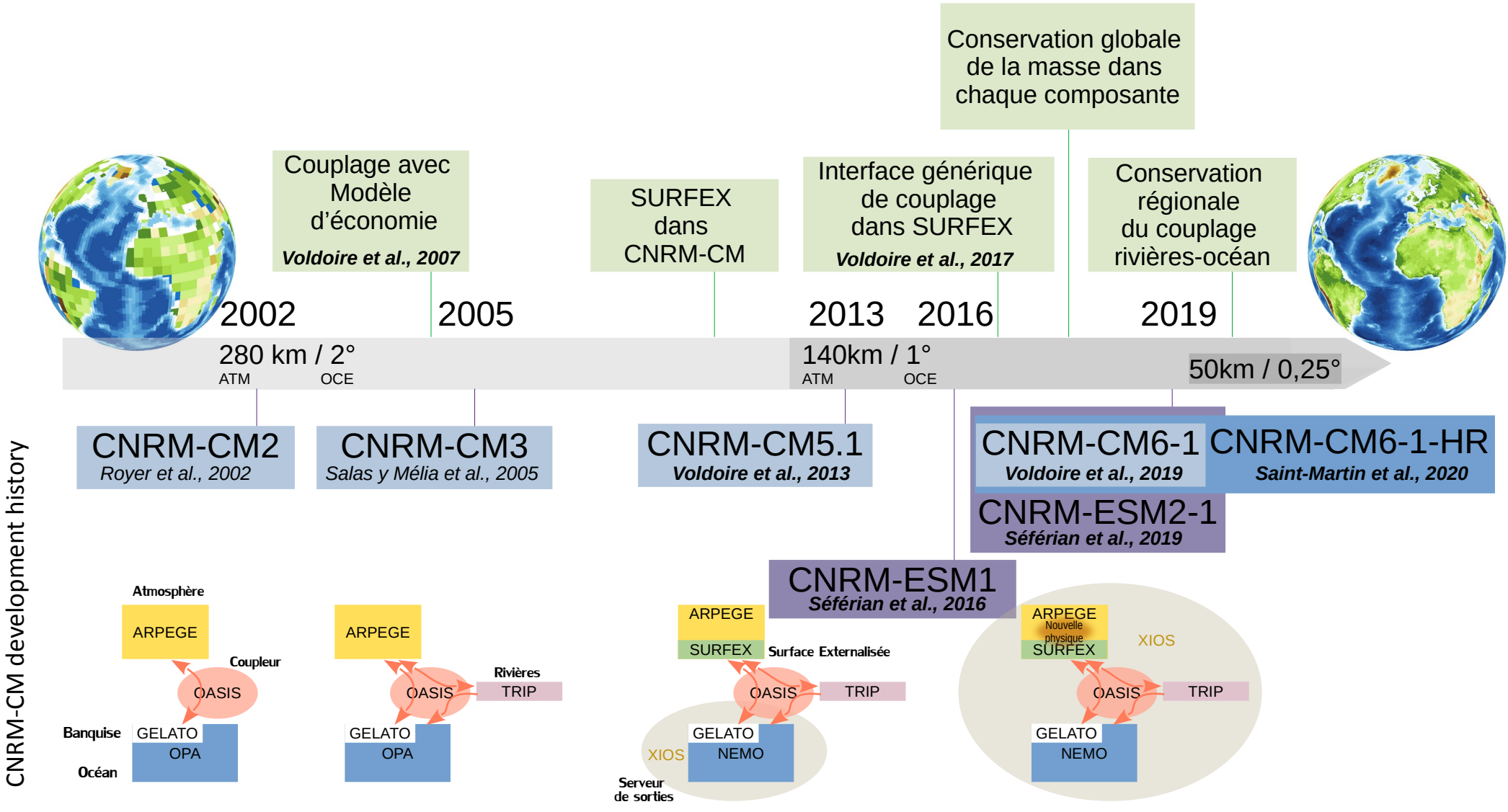


- Impacts importants sur la répartition de la salinité
  - réduction de la salinité aux hautes latitude Nord
  - accroissement de la salinité aux tropiques
- Modification de la densité des masses d'eau
- Impact sur la circulation océanique

- Nouvelle méthode générique disponible dans OASIS-MCT5.
- Importance d'assurer la conservation de la masse et de l'énergie






CNRM-CM development history
Couplage avec Modèle d'économie
Voldoire et al., 2007
SURFEX dans CNRM-CM
Interface générique de couplage dans SURFEX
Voldoire et al., 2017
Conservation globale de la masse dans chaque composante
Conservation régionale du couplage rivières-océan
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
Voldoire et al., 2013
CNRM-CM6-1
Voldoire 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
Atmosphère
ARPEGE
Coupleur
OASIS
Banquise
GELATO
OPA
Océan
ARPEGE
OASIS
Rivières
TRIP
GELATO
OPA
ARPEGE
SURFEX
Surface Externalisée
OASIS
TRIP
XIOS
GELATO
NEMO
Serveur de sorties
ARPEGE
Nouvelle physique
SURFEX
XIOS
OASIS
TRIP
GELATO
NEMO

Plan

1. Modélisation climatique

2. Construction du système couplé
   - 2.1 Mes contributions au développement de CNRM-CM
   - 2.2 Evolution des performances sur 20 ans

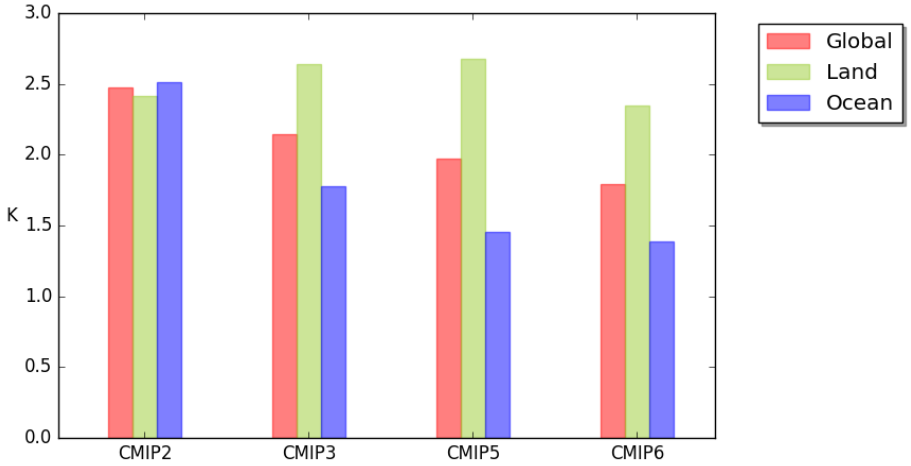
3. Déconstruction du modèle pour mieux comprendre

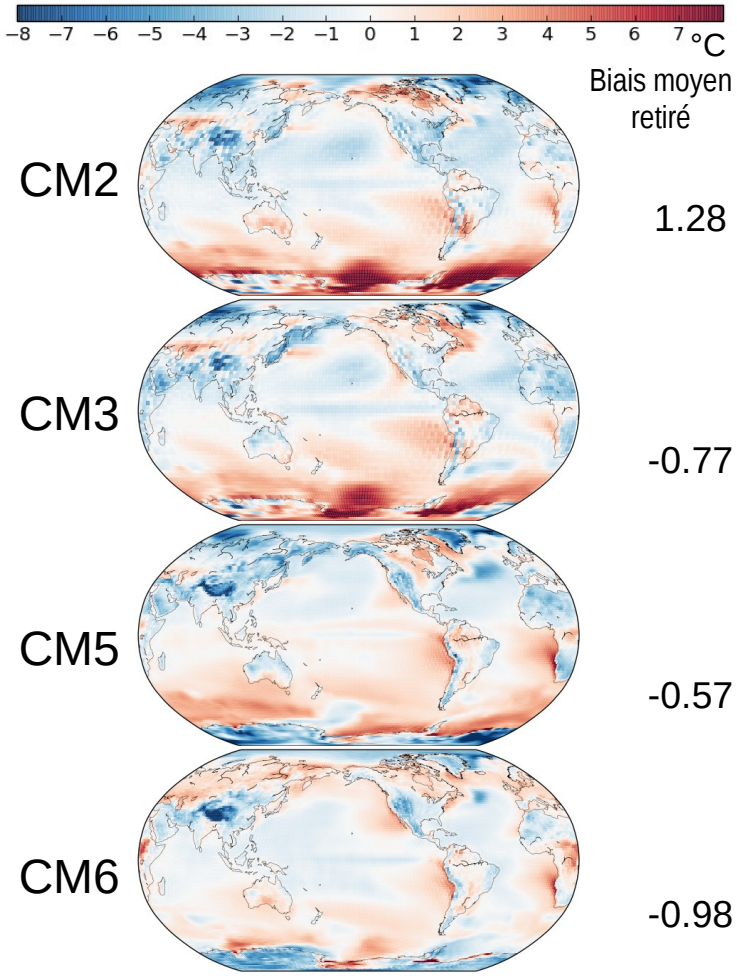
4. Calibration des modèles

2.2 Evolution du réalisme du modèle

Evolution du biais régional de température

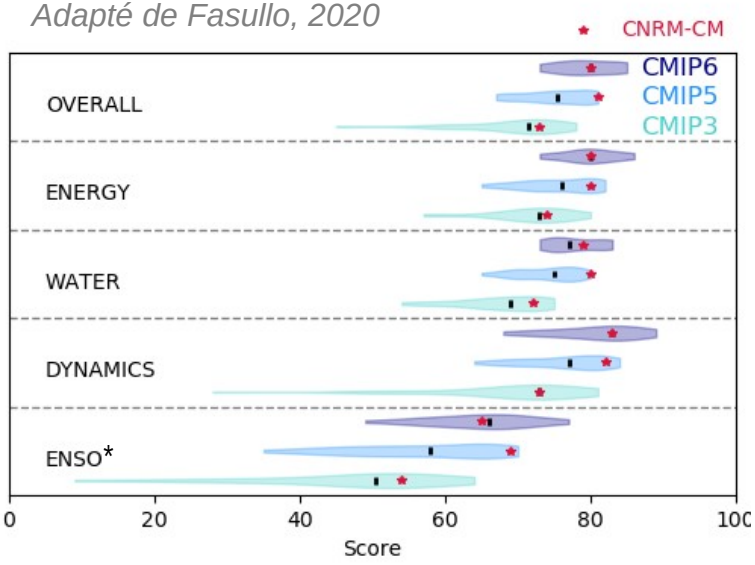
- La calibration des modèles vise à rendre nul le biais moyen global de température à l'ordre zéro (retiré sur ces figures)
- Plutôt une réduction progressive de la RMSE mais moins systématique sur continents





2.2 Comparaison à l'ensemble CMIP

Adapté de Fasullo, 2020



- Pour l'ensemble CMIP
  - Amélioration progressive des meilleurs modèles de CMIP3 à CMIP6
  - Réduction progressive des écarts de score entre modèle
- Pour CNRM-CM
  - Amélioration nette de CNRM-CM3 à CNRM-CM5 : phase de calibration
  - Pas d'évolution de CNRM-CM5 à CNRM-CM6 : changement majeur des paramétrisations atmosphériques et hydrologiques
- Par rapport à l'ensemble CMIP, CNRM-CM6 en recul
  - Pas eu le temps de thésauriser sur les nouvelles paramétrisations ?
  - Calibration en cause ?

*ENSO : El Nino Southern Oscillation

Conclusions / Perspectives

- Construction du système couplé
  - Encourager la modularité et la traçabilité
  - Assurer un niveau de raffinement cohérent entre les composantes
  - Poursuivre les efforts sur la conservation
    - Energie (Lauritzen et al., 2022)
  - Améliorer la représentation de certains processus
    - flux océan-atmosphère (**Blein et al., 2020, 2022**)

Conclusions / Perspectives

- Construction du système couplé
  - Encourager la modularité et la traçabilité
  - Assurer un niveau de raffinement cohérent entre les composantes
  - Poursuivre les efforts sur la conservation
    - Energie (Lauritzen et al., 2022)
  - Améliorer la représentation de certains processus
    - flux océan-atmosphère (**Blein et al., 2020, 2022**)

- Une approche « **par le bas** » du développement du système couplé
  - On améliore ce que l'on pense être en défaut puis on évalue les propriétés émergentes du modèle
  - Comment guider les priorités de développement ?
  - Comment faire régresser les erreurs systématiques ?

Conclusions / Perspectives

- Construction du système couplé
  - Encourager la modularité et la traçabilité
  - Assurer un niveau de raffinement cohérent entre les composantes
  - Poursuivre les efforts sur la conservation
    - Energie (Lauritzen et al., 2022)
  - Améliorer la représentation de certains processus
    - flux océan-atmosphère (**Blein et al., 2020, 2022**)

- Une approche « **par le bas** » du développement du système couplé
  - On améliore ce que l'on pense être en défaut puis on évalue les propriétés émergentes du modèle
  - Comment guider les priorités de développement ?
  - Comment faire régresser les erreurs systématiques ?

↳ Mener une « **approche par le haut** », comprendre le comportement du système intégral

Plan

1. Modélisation climatique

2. Construction du système couplé

3. Déconstruction du modèle pour mieux comprendre

    3.1 Découpler les composantes

    3.2 Rechercher les liens de cause à effet : protocole type Transpose-AMIP/CMIP

    3.3 Simplifier le système

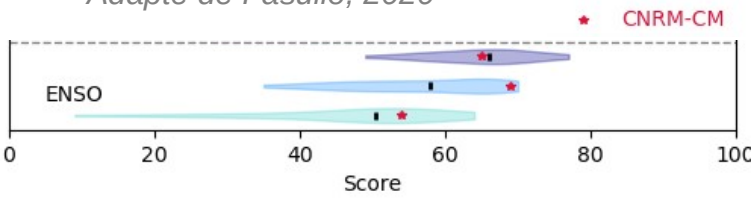
4. Calibration des modèles

3.1 Découpler les composantes

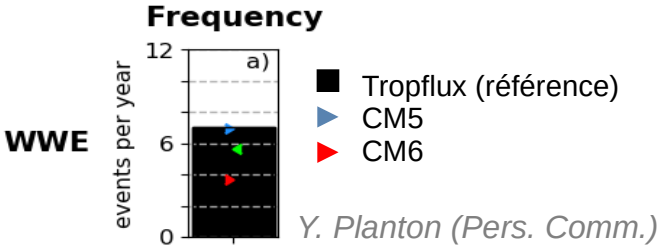
Performance de représentation d'ENSO dans CNRM-CM

- En léger recul en valeur absolue de CMIP5 à CMIP6
- Ne suit pas l'amélioration générale des modèles de CMIP5 à CMIP6

Adapté de Fasullo, 2020



Point fort de CNRM-CM5 : **Puy et al. 2017** avait montré le réalisme de la représentation des coups de vent d'Ouest (fréquence, saisonnalité, localisation) dans le modèle et leur importance pour la génération d'événements El Niño.



Y. Planton (Pers. Comm.)

- Dégradation de la représentation des coups de vent d'Ouest de CM5 à CM6

ENSO : pourquoi pas de progrès dans notre modèle entre CM5 et CM6 ?

3.1 Comprendre la dégradation

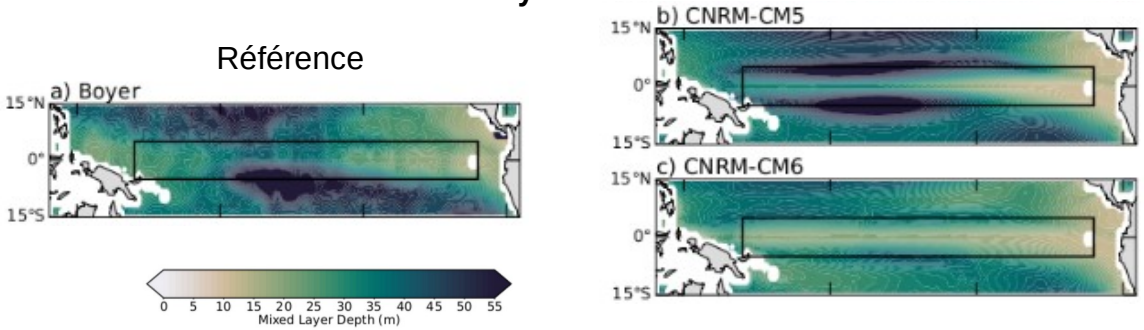
Méthodologie suivie (stage M2 T. Manni, co-encadrement G. Bellon, 2020) :

- Analyser en détail les changements des paramètres pertinents entre les 2 versions du modèle

3.1 Changements de CM5 à CM6

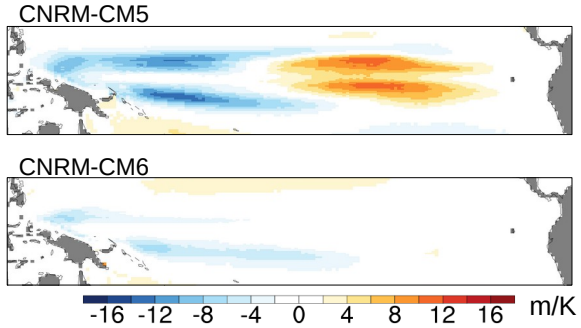
- Recherche de propriétés différemment représentées dans les 2 versions du modèle
  - Modification nette de la profondeur de couche de mélange (MLD): gradients zonaux et méridiens réduits
  - Réduction du changement de profondeur de couche de mélange lors des événements El Niño

État moyen

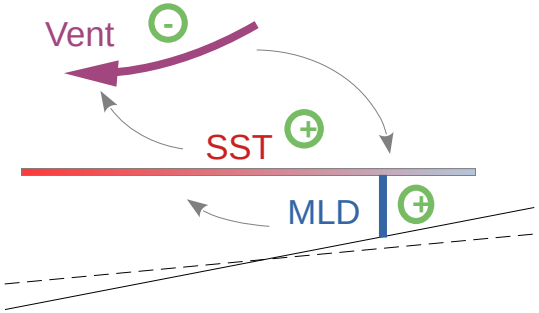


Profondeur de la couche de mélange (moyenne annuelle, critère en densité)

Variabilité



Régression anomalie de SST / profondeur de couche de mélange



Rétroaction de Bjerknes moins bien représentée dans CM6 ?

3.1 Comprendre la dégradation

Méthodologie suivie (stage M2 T. Manni, co-encadrement G. Bellon, 2021) :

- Analyser en détail les changements des paramètres pertinents entre les 2 versions du modèle

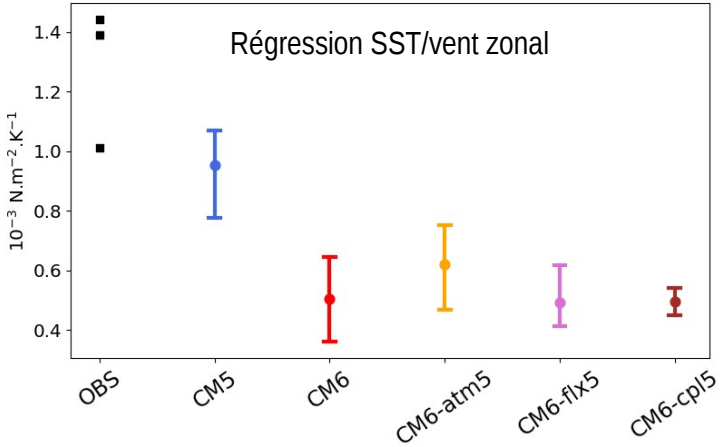
✅ Changement MLD

3.1 Comprendre la dégradation

Méthodologie suivie (stage M2 T. Manni, co-encadrement G. Bellon, 2021) :

- Analyser en détail les changements des paramètres pertinents entre les 2 versions du modèle
  ✔ Changement MLD
- Réaliser des expériences de sensibilité en désactivant des changements opérés entre CM5 et CM6
  - Changement des paramétrisations atmosphériques
  - Changement de la paramétrisation des flux océan-atmosphère
  - Changement de la fréquence de couplage

✘ Pas lié à un changement de la représentation de l'atmosphère ni du couplage
→ Changement dans modèle d'océan ?



3.1 Comprendre la dégradation

Méthodologie suivie (stage M2 T. Manni, co-encadrement G. Bellon, 2020) :

- Analyser en détail les changements des paramètres pertinents entre les 2 versions du modèle
  - ✔ Changement MLD
- Réaliser des expériences de sensibilité en désactivant des changements opérés entre CM5 et CM6
  - Changement des paramétrisations atmosphériques
  - Changement de la paramétrisation des flux océan-atmosphère
  - Changement de la fréquence de couplage

  ✘ Pas lié à un changement de la représentation de l'atmosphère ni du couplage
  → Changement dans modèle d'océan ?
- Analyser des simulations découplées :
  - Océan seules (OMIP)

3.1 Comprendre la dégradation

Méthodologie suivie (stage M2 T. Manni, co-encadrement G. Bellon, 2020) :

- Analyser en détail les changements des paramètres pertinents entre les 2 versions du modèle
  - ✔ Changement MLD
- Réaliser des expériences de sensibilité en désactivant des changements opérés entre CM5 et CM6
  - Changement des paramétrisations atmosphériques
  - Changement de la paramétrisation des flux océan-atmosphère
  - Changement de la fréquence de couplage

  ✘ Pas lié à un changement de la représentation de l'atmosphère ni du couplage
  → Changement dans modèle d'océan ?
- Analyser des simulations découplées :
  - Océan seules (OMIP)

  ✘ Pas de problème apparent en mode forcé

3.1 Comprendre la dégradation

Méthodologie suivie (stage M2 T. Manni, co-encadrement G. Bellon, 2020) :

- Analyser en détail les changements des paramètres pertinents entre les 2 versions du modèle
  - ✔ Changement MLD
- Réaliser des expériences de sensibilité en désactivant des changements opérés entre CM5 et CM6
  - Changement des paramétrisations atmosphériques
  - Changement de la paramétrisation des flux océan-atmosphère
  - Changement de la fréquence de couplage

  ✘ Pas lié à un changement de la représentation de l'atmosphère ni du couplage
  → Changement dans modèle d'océan ?
- Analyser des simulations découplées :
  - Océan seules (OMIP)

  ✘ Pas de problème apparent en mode forcé
- Réaliser des expériences partiellement contraintes
  - Correction du flux de quantité de mouvement

  ✔ Atmosphère pas seule en cause
  Protocole océan forcé en question

3.1 Comprendre la dégradation

Méthodologie suivie (stage M2 T. Manni, co-encadrement G. Bellon, 2020) :

- Analyser en détail les changements des paramètres pertinents entre les 2 versions du modèle
  - ✔ Changement MLD
- Réaliser des expériences de sensibilité en désactivant des changements opérés entre CM5 et CM6
  - Changement des paramétrisations atmosphériques
  - Changement de la paramétrisation des flux océan-atmosphère
  - Changement de la fréquence de couplage

  ✘ Pas lié à un changement de la représentation de l'atmosphère ni du couplage
  → Changement dans modèle d'océan ?
- Analyser des simulations découplées :
  - Océan seules (OMIP)

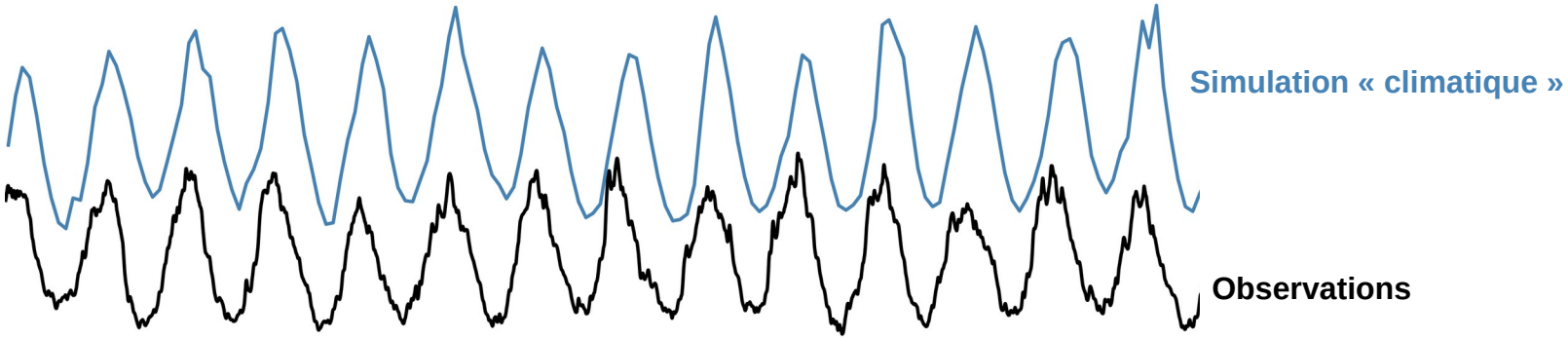
  ✘ Pas de problème apparent en mode forcé

Enquête non terminée, mais des leçons :

- Configurations forcées des modèles pas toujours informatives sur le comportement en couplé
- Difficile de séparer les effets liés aux changements des composantes de ceux liés au changement d'état moyen induit par des rétroactions couplées différentes

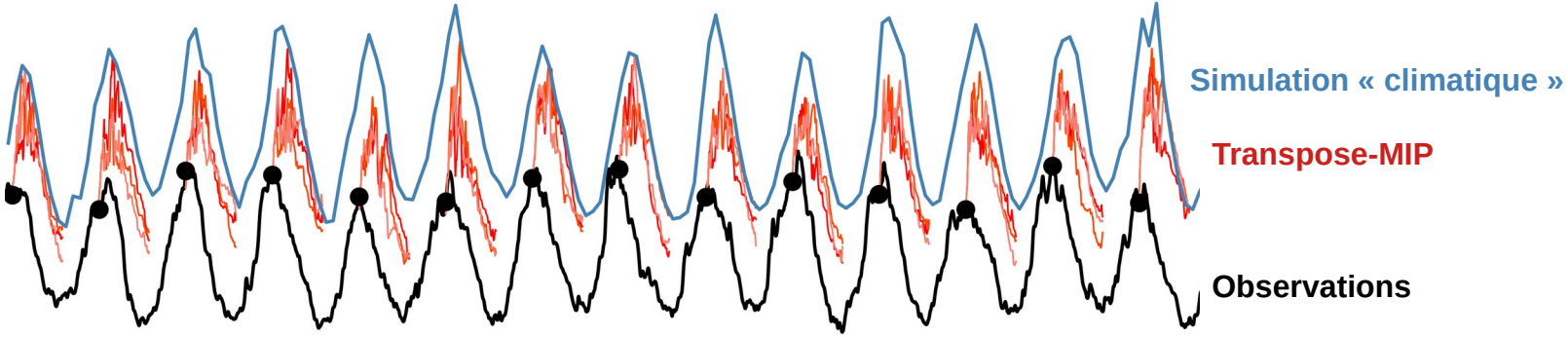
3.2 Protocole Transpose-AMIP/CMIP

- Travailler dans la phase transitoire pour
  - permettre de déterminer des liens de cause à effet
  - s'affranchir des rétroactions liés au changement d'état moyen



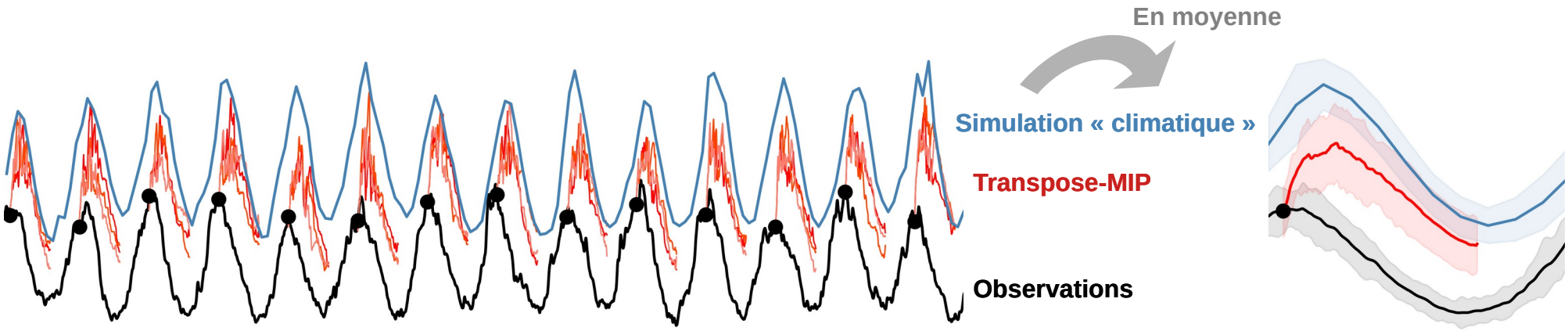
3.2 Protocole Transpose-AMIP/CMIP

- Travailler dans la phase transitoire pour
  - permettre de déterminer des liens de cause à effet
  - s'affranchir des rétroactions liés au changement d'état moyen
- Analyse de la vitesse de dérive vers le climat du modèle



3.2 Protocole Transpose-AMIP/CMIP

- Travailler dans la phase transitoire pour
  - permettre de déterminer des liens de cause à effet
  - s'affranchir des rétroactions liés au changement d'état moyen
- Analyse de la vitesse de dérive vers le climat du modèle
  - les variables qui dérivent en premier permettent d'identifier les potentielles causes des défauts



3.2 Transpose-AMIP : cas des nuages bas

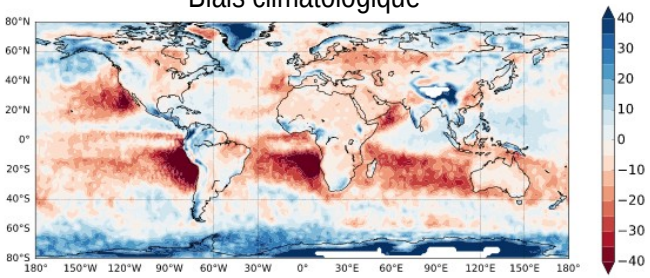
F. Brient, co-encadrement R. Roehrig

Brient et al., 2019

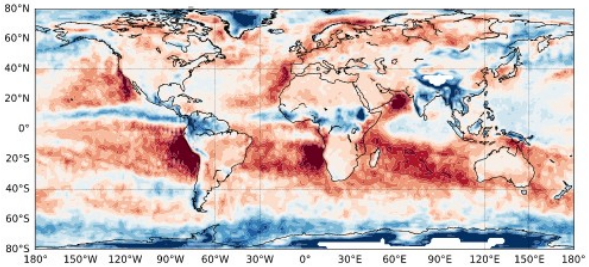
- Biais établi en qqs heures
- séparation des processus locaux versus transport grande échelle
- Expériences de sensibilité ont permis de pointer les éléments clefs dans les paramétrisations du modèle
  - forme de la distribution sous-maille de l'humidité dans la paramétrisation des nuages

Fraction des nuages bas

Biais climatologique



Biais Transpose-AMIP J+1



3.2 Transpose-AMIP : cas des nuages bas

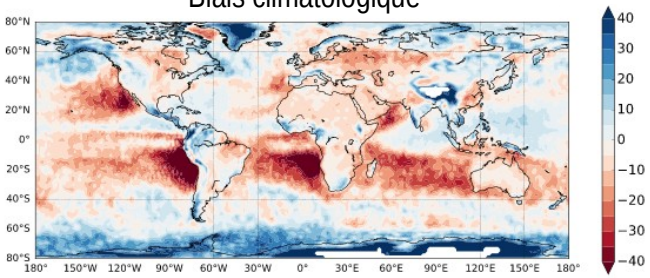
F. Brient, co-encadrement R. Roehrig

- Biais établi en qqs heures
- séparation des processus locaux versus transport grande échelle
- Expériences de sensibilité ont permis de pointer les éléments clefs dans les paramétrisations du modèle
  - forme de la distribution sous-maille de l'humidité dans la paramétrisation des nuages

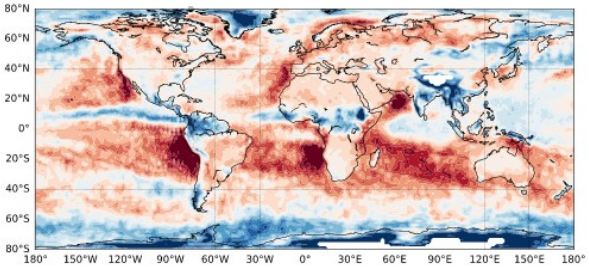
Brient et al., 2019

Fraction des nuages bas

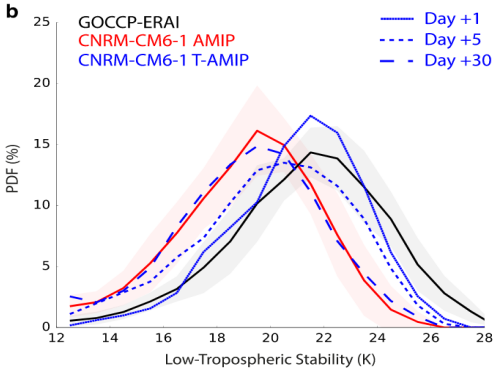
Biais climatologique

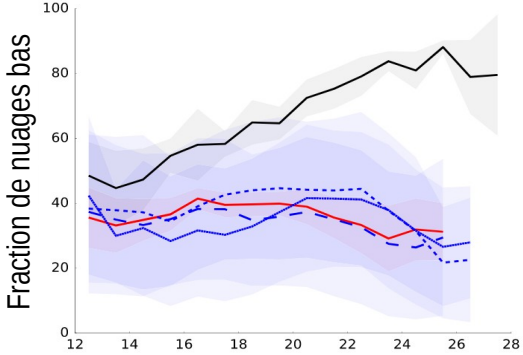


Biais Transpose-AMIP J+1



PDF indice de subsidence de grande échelle





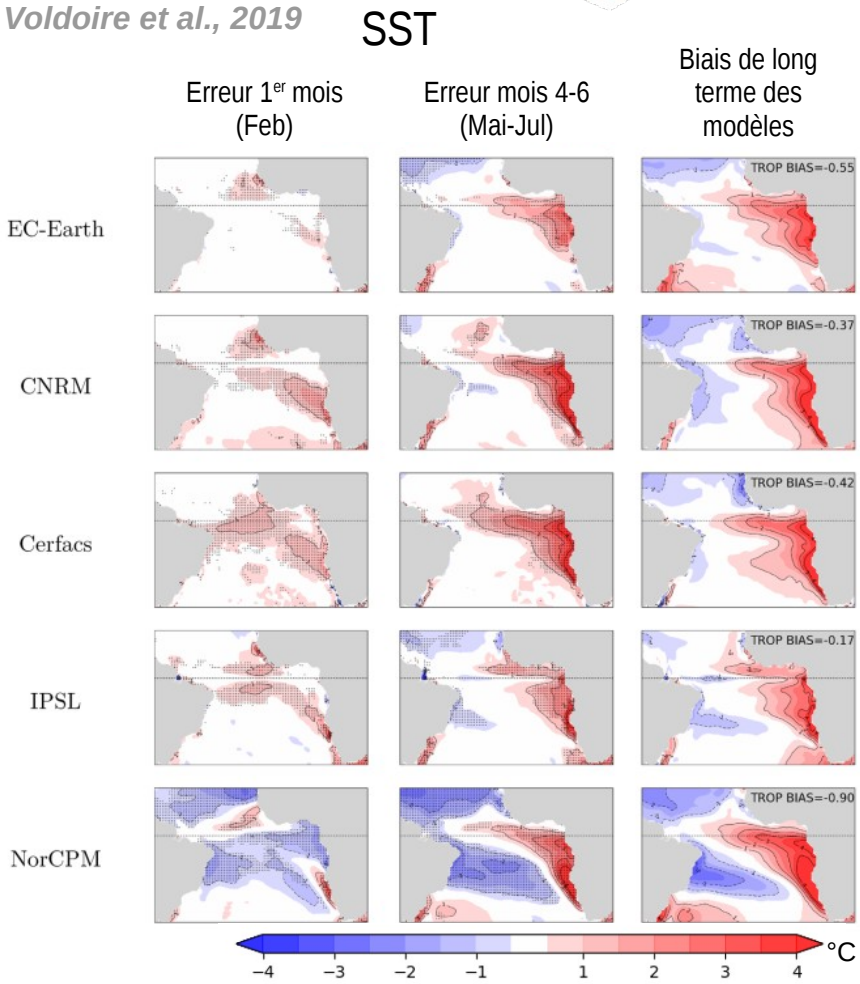
3.2 Transpose-CMIP : biais de SST

- Constat : suite au programme AMMA (dont thèse M. Joly, 2008) des biais résistants dans l'Atlantique tropical: un « ping-pong » entre spécialistes océan et atmosphère

- Utilisation protocole Transpose-CMIP
  - Analyse de la dérive
  - Expériences de sensibilité en mode transitoire

- En 2 temps :
  - Dans CNRM-CM (stage M. Claudon, **Voldoire et al., 2014**)
  - En multi-modèle dans le cadre du projet FP7 PREFACE (**Voldoire et al., 2019**)

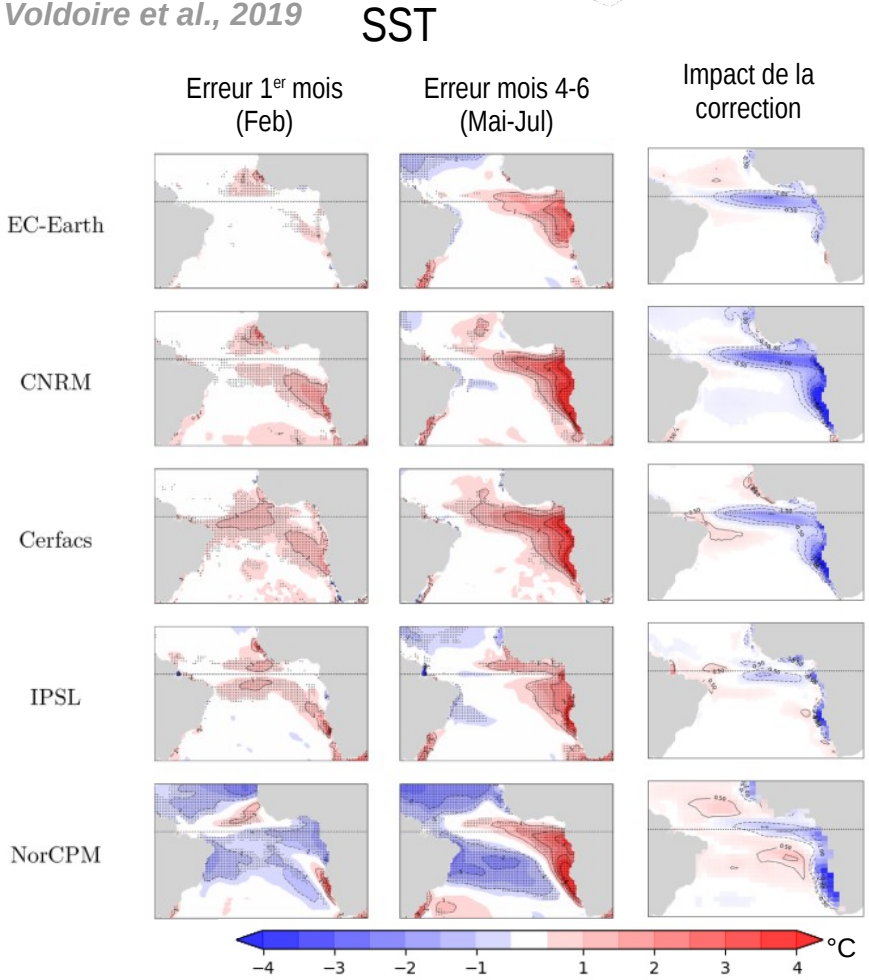
Voldoire et al., 2019



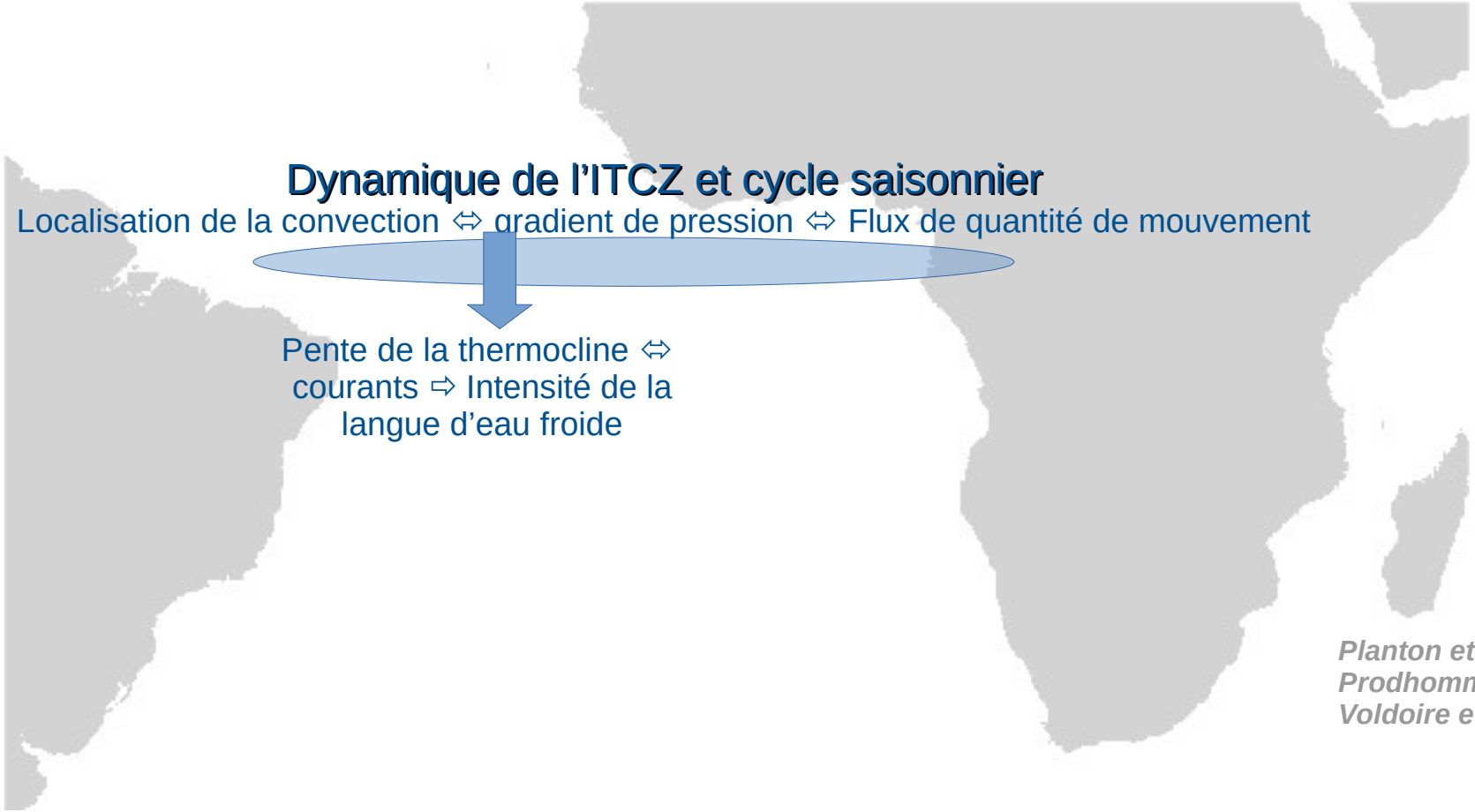
3.2 Transpose-CMIP : biais de SST

- Impact d'une correction de la tension de vent en surface
  - Réduction des biais dans tous les modèles
  - Selon la sous-région où le vent est corrigé, la réponse diffère selon les modèles

Voldoire et al., 2019



3.2 Sources de biais dans l'Atlantique tropical



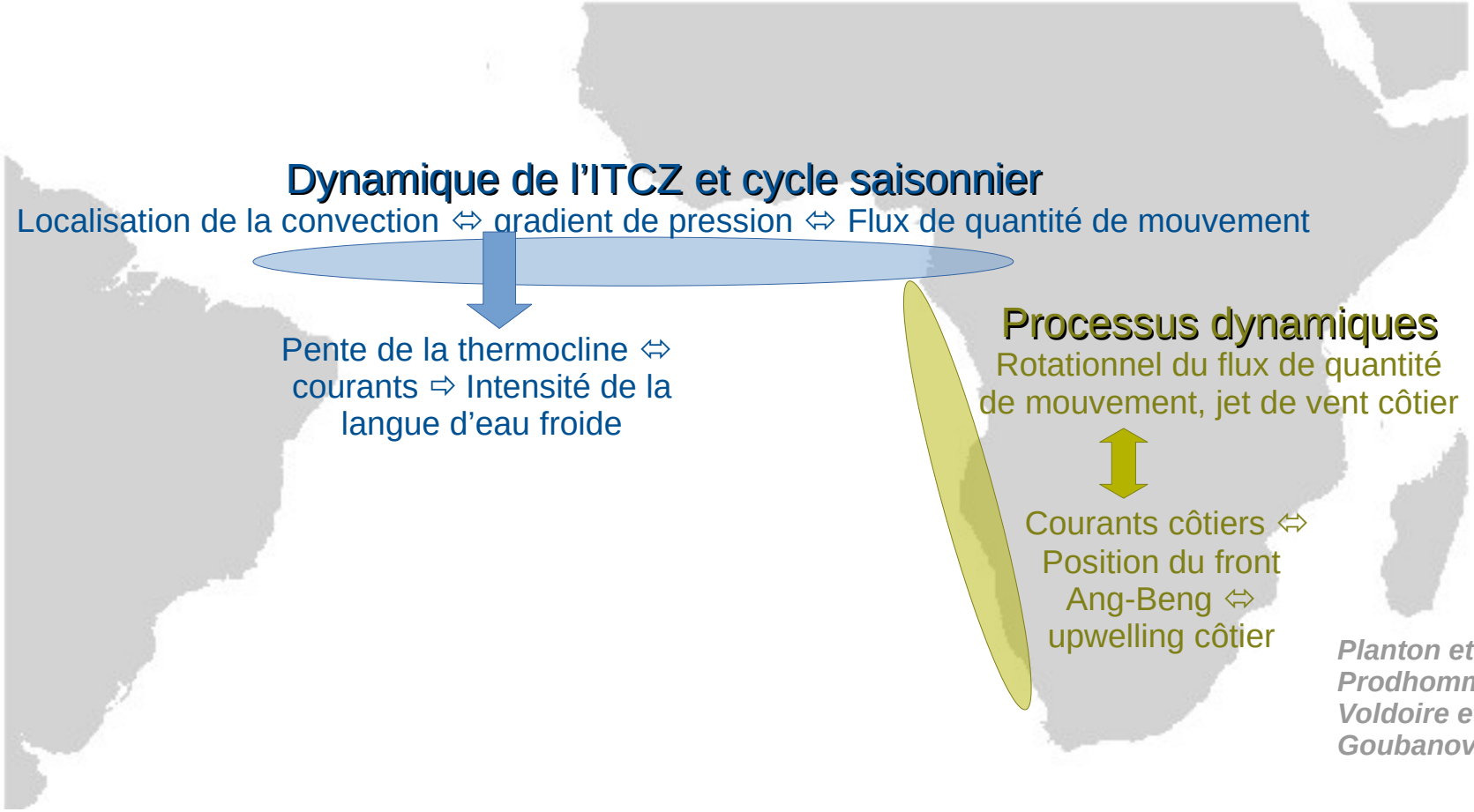
Dynamique de l'ITCZ et cycle saisonnier

Localisation de la convection ⇔ gradient de pression ⇔ Flux de quantité de mouvement

Pente de la thermocline ⇔ courants ⇨ Intensité de la langue d'eau froide

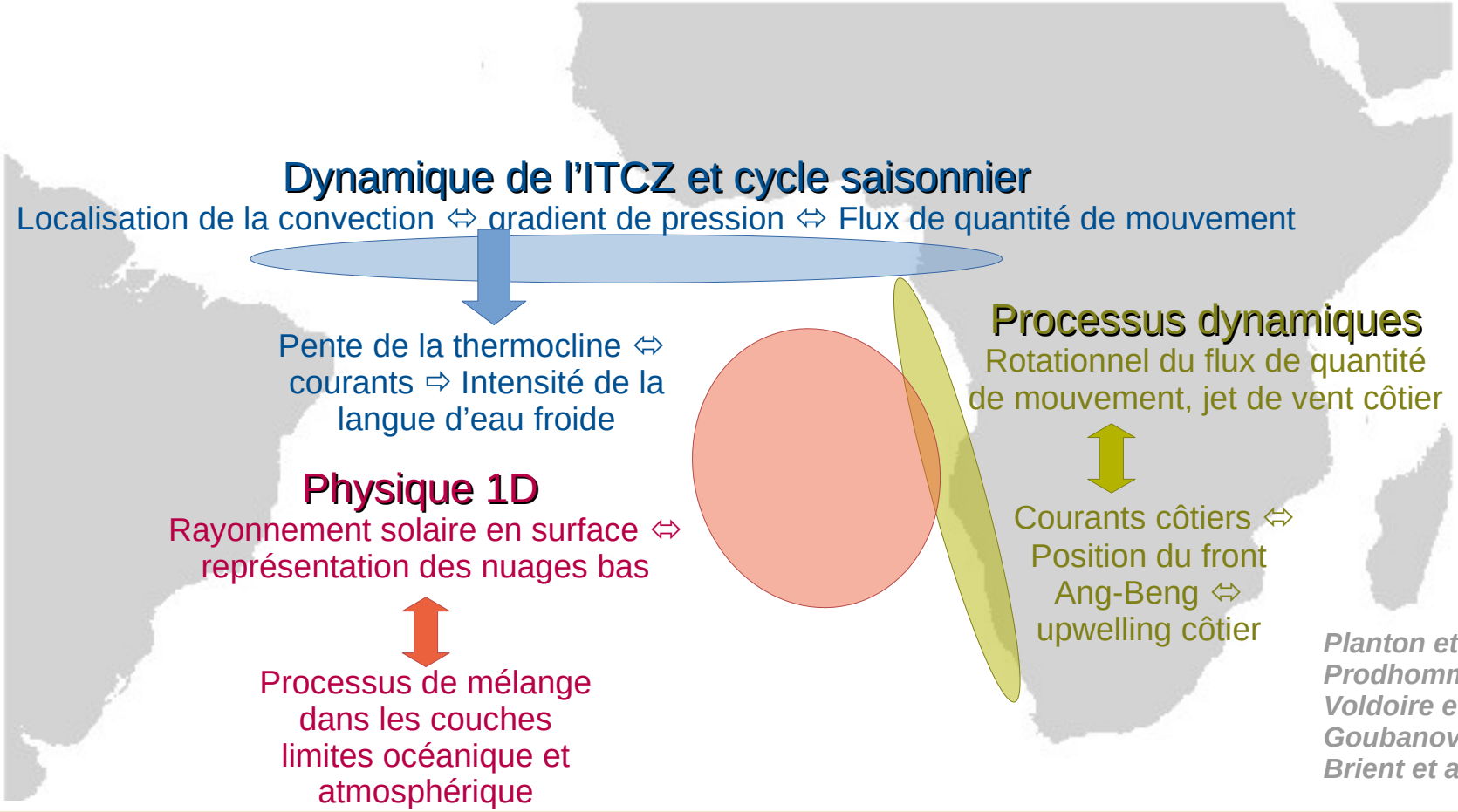
Planton et al., 2018
Prodhomme et al., 2019
Voldoire et al., 2019

3.2 Sources de biais dans l'Atlantique tropical



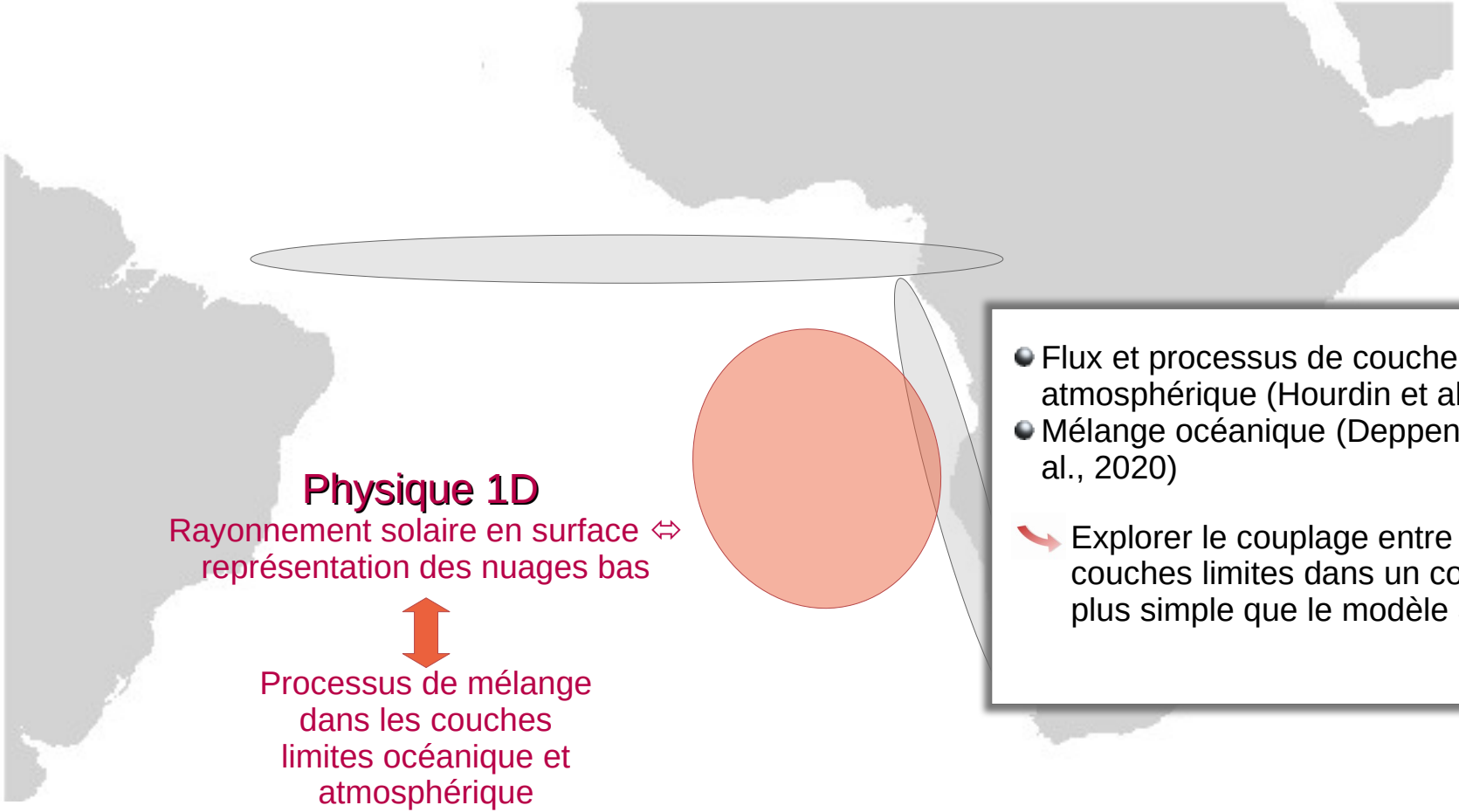
Planton et al., 2018
Prodhomme et al., 2019
Voldoire et al., 2019
Goubanova et al., 2018

3.2 Sources de biais dans l'Atlantique tropical



Planton et al., 2018
Prodhomme et al., 2019
Voldoire et al., 2019
Goubanova et al., 2018
Brient et al., 2019

3.2 Sources de biais dans l'Atlantique tropical



Physique 1D

Rayonnement solaire en surface ⇔ représentation des nuages bas

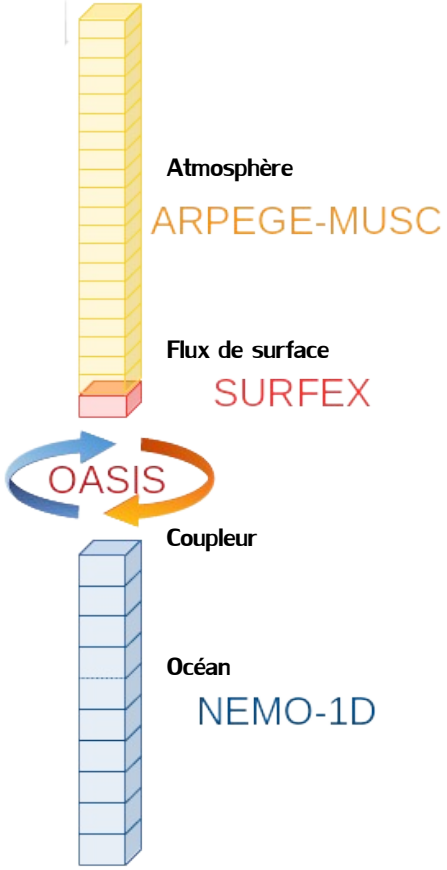
Processus de mélange dans les couches limites océanique et atmosphérique

- Flux et processus de couche limite atmosphérique (Hourdin et al., 2015)
- Mélange océanique (Deppenmeier et al., 2020)

Explorer le couplage entre ces 2 couches limites dans un contexte plus simple que le modèle 3D

3.3 Version uni-colonne

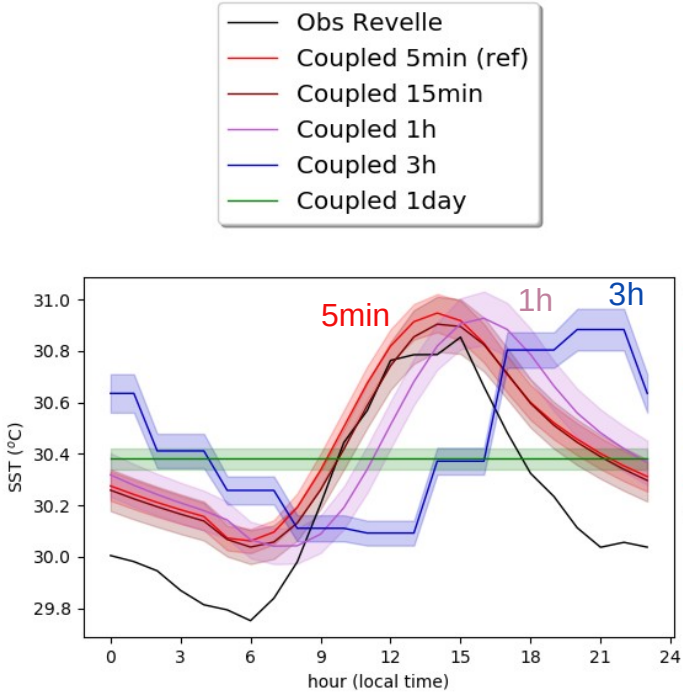
- Une version couplée des modèles colonnes existants pour l'atmosphère et l'océan
  - Implémentation cohérente avec le modèle 3D (même codes, couplage via OASIS, etc.)
- Première étude sur l'océan Indien (campagne CINDY/DYNAMO 2011, cas COCOA)
  - Données atmosphériques et océaniques co-localisées
  - Présence de forts cycles diurnes de SST



3.3 Représentation du cycle diurne

Représentation du cycle diurne de la SST dans la configuration uni-colonne :

- Pas d'effet de la fréquence de couplage sur
  - la SST moyenne
  - l'amplitude du cycle si couplage infra-journalier
- Fréquence de couplage conditionne le calage du cycle diurne (5h de retard avec couplage 3h)

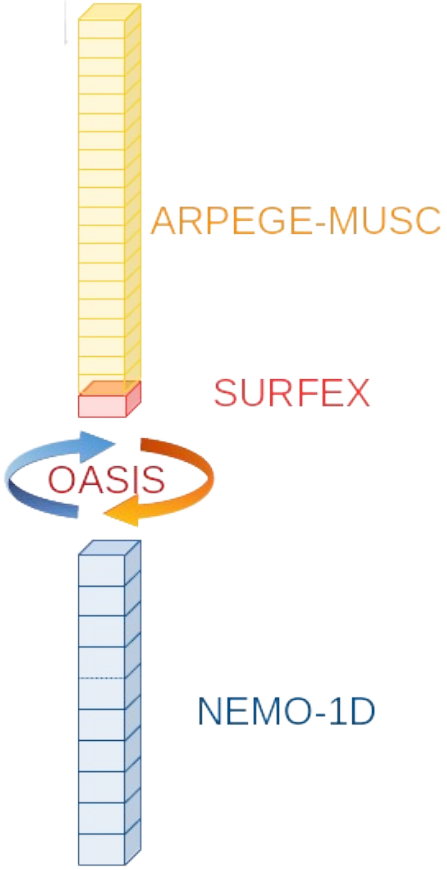


Voldoire et al., 2022

3.3 Intérêts du protocole uni-colonne

- Scientifique :
  - Mieux comprendre les rétroactions couplées (comparer dans un même contexte contrôlé des simulations couplées/forcées)
  - Explorer les interactions des couches limites atmosphériques et océaniques (rétroaction SST/nuages)

- Technique :
  - Un outil numérique « léger » sur PC
  - Tester rapidement des nouvelles paramétrisations (en particulier celles qui ont un impact sur les couches limites)
    - Paramétrisation des flux WASP (**Bouin et al.**, en préparation)
    - Schéma de convection océanique EDMF (Giordani et al., 2020)
  - Modifier l'algorithme temporel de couplage (Marti et al., 2021, collab. S. Valcke)



Conclusions / Perspectives

- Décomposer le modèle
  - Pour guider les axes de développement
    - Élaborer des protocoles adaptés, en particulier pour évaluer la composante océanique
      - Forcé en flux (Silvy et al., 2022)
      - Avec une couche de mélange atmosphérique simplifiée (ABL1D, Lemarié et al., 2020, thèse T. Brivoal)
    - Impact de la répartition des flux issus des calottes dans le système couplé
  - Pour mieux le comprendre
    - ENSO
    - Couplage des couches limites en région de nuages bas

Plan

1. Modélisation climatique
2. Construction du système couplé
3. Déconstruction du modèle pour mieux comprendre
4. Calibration des modèles

Calibration

- **Calibrer** : donner une valeur aux paramètres incertains des modèles (paramétrisations)

- On distingue 3 niveaux de calibration :
  - Calibration des **paramétrisations** (modèle colonne 1D pour développer les paramétrisations)
  - Calibration des **composantes** séparément les unes des autres en utilisant des forçages réalistes.
  - Calibration du **système intégral couplé**
    - Objectif : limiter la dérive du système en SST moyenne globale (SST à l'équilibre proche des observations)
    - Méthode : flux de surface du modèle atmosphérique (mode AMIP) ~0.W.m-2 si forcé par des SSTs préindustrielles

⚠ Éviter la sur-calibration qui introduit des compensations d'erreurs (Dommenget et al., 2018)

- La calibration, une question scientifique :
  - Peu documentée avant CMIP6
  - Étape formalisée seulement récemment (Hourdin et al., 2017; Schmidt et al., 2017)
  - A un impact sur les propriétés émergentes des modèles (sensibilité climatique, Zhao et al., 2016)
  - Un problème de grande dimension

La calibration au CNRM

- En pratique pour CNRM-CM (**Roehrig et al., 2020, Voldoire et al., 2019**)
  - Une méthode empirique
    - Des diagnostics systématiques
    - D'autres plus élaborés mais pas regardés systématiquement
  - Itérative
    - Modification d'1 ou 2 paramètres à la fois
    - Choix partiellement subjectifs (priorisation des métriques)
  - Et laborieuse
    - Processus long
    - Coûteux numériquement
    - Temps humain conséquent, et besoin d'un haut niveau d'expertise

- A refaire pour chaque nouvelle version → limite le rythme de développement des modèles

Envisager une méthode plus objective et moins coûteuse ?

2.2 Utiliser une méthode objective

- Dans le cadre du projet High Tune, une nouvelle méthodologie de calibration objective a été développée (Couvreux et al., 2021)
  - « History Matching » (Williamson et al., 2017)
    - Restreindre l'espace des paramètres
    - Avec prise en compte de l'incertitude modélisation & observations
  - Emulation du modèle
    - Parcourir l'espace des possibles à moindre coût
  - Processus itératif
    - Permet de limiter le nombre de simulations
    - Possibilité d'ajout de métriques en cours de processus
  - Points forts :
    - Formalisation de la calibration (définition de métriques, …)
    - Évite la sur-calibration

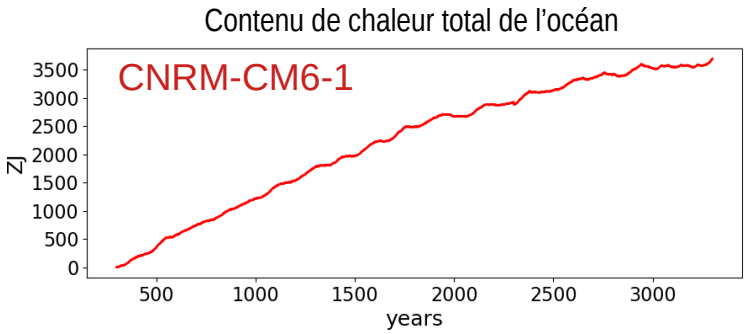
- Méthode testée avec succès pour la composante atmosphérique

↳ Comment l'appliquer au modèle couplé ?

↳ Comment gérer la dérive pour les composantes lentes à équilibrer ?

Perspectives

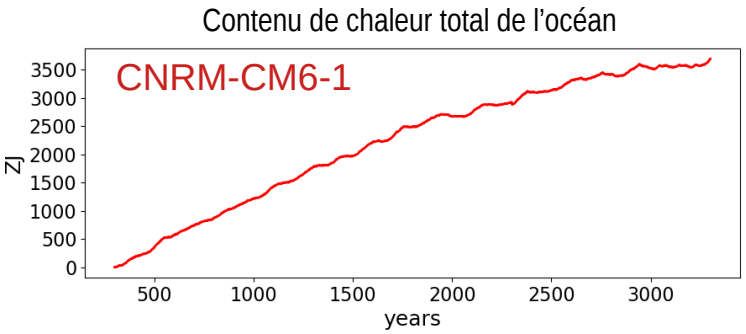
- Développer une méthode pour accélérer la mise à l'équilibre des composantes lentes
  - Déterminer l'impact de la dérive sur les études avec les modèles
  - Permettre d'appliquer une méthode de calibration objective à un coût acceptable
  - Différentes méthodes à tester
    - HRMES (IA, J. Deshayes, pers. Comm.)
    - Fast Forward (**D. Saint-Martin et al., 2019**)
    - Cooper et al. (2017) ...



Soutenu par projets OptimESM (Horizon UE) et TRACCS (PEPR)

Perspectives

- Développer une méthode pour accélérer la mise à l'équilibre des composantes lentes
  - Déterminer l'impact de la dérive sur les études avec les modèles
  - Permettre d'appliquer une méthode de calibration objective à un coût acceptable
  - Différentes méthodes à tester
    - HRMES (IA, J. Deshayes, pers. Comm.)
    - Fast Forward (**D. Saint-Martin et al., 2019**)
    - Cooper et al. (2017) ...



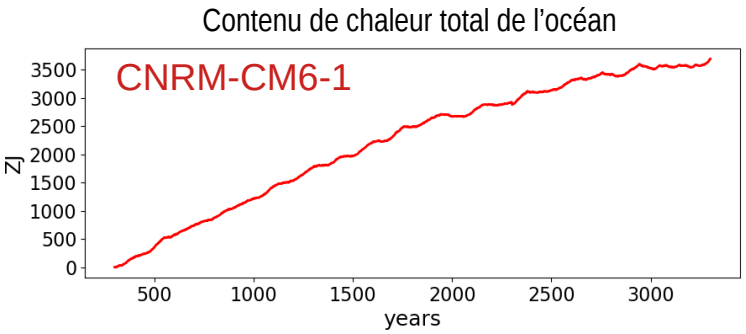
- Mettre en place une méthode de calibration objective pour le modèle complet
  - Appliquer à une hiérarchie de configurations et/ou au système complet
  - Définir des métriques
    - Diverses pour cibler le caractère « généraliste » de notre modèle
    - Orientées processus

Soutenu par projets OptimESM (Horizon UE) et TRACCS (PEPR)

Perspectives

Soutenu par projets OptimESM (Horizon UE) et TRACCS (PEPR)

- Développer une méthode pour accélérer la mise à l'équilibre des composantes lentes
  - Déterminer l'impact de la dérive sur les études avec les modèles
  - Permettre d'appliquer une méthode de calibration objective à un coût acceptable
  - Différentes méthodes à tester
    - HRMES (IA, J. Deshayes, pers. Comm.)
    - Fast Forward (**D. Saint-Martin et al., 2019**)
    - Cooper et al. (2017) ...



- Mettre en place une méthode de calibration objective pour le modèle complet
  - Appliquer à une hiérarchie de configurations et/ou au système complet
  - Définir des métriques
    - Diverses pour cibler le caractère « généraliste » de notre modèle
    - Orientées processus

Utiliser un laboratoire numérique adapté : une version numériquement « low cost » de CNRM-CM (~150 ans de simulation/j)

A plus long terme

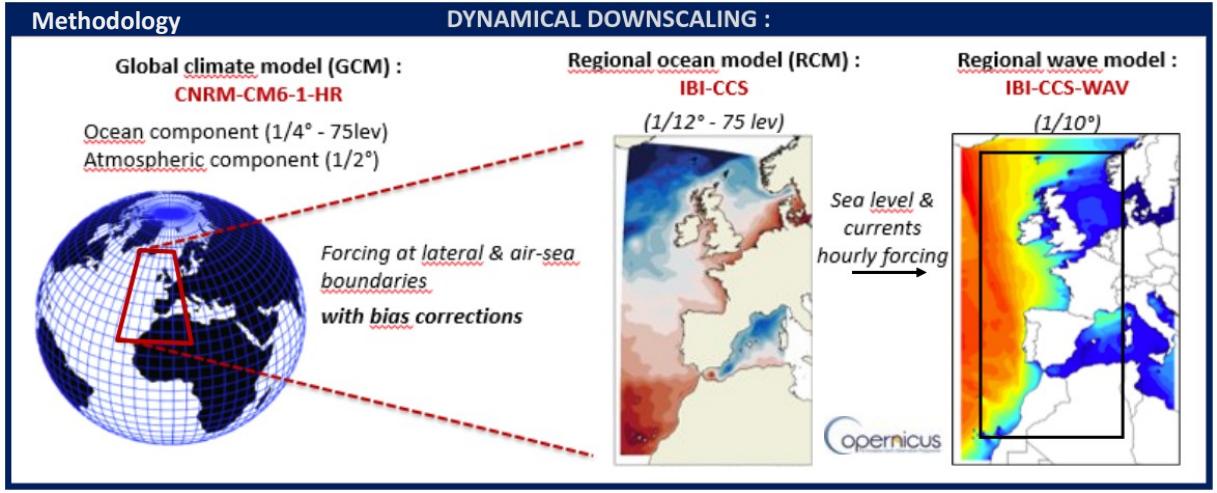
- Calibration inter-résolution ?
- Impact de la calibration sur les propriétés émergentes des modèles ?
- Un modèle ou plusieurs versions d'un même modèle avec des calibration différentes ?
- Créer un ensemble en mode paramètres perturbés
  - Caractériser **incertitude de modélisation** vs **erreur structurelle** du modèle

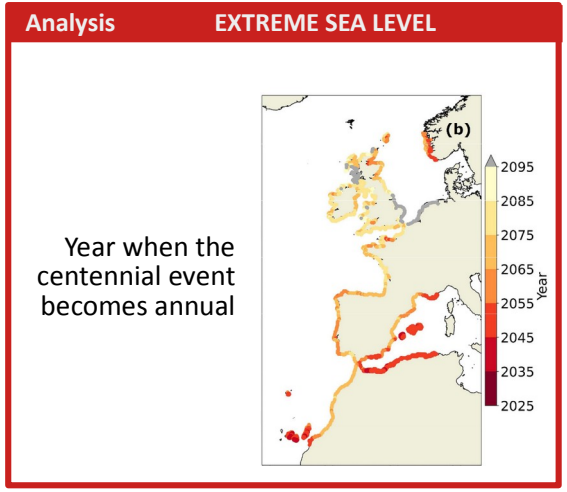
Conclusions

- Approche « par le bas » : du processus à l'intégration dans le système couplé intégral
- Approche « par le haut » : décortiquer le modèle pour comprendre
- Formaliser la calibration : mieux caractériser les incertitudes

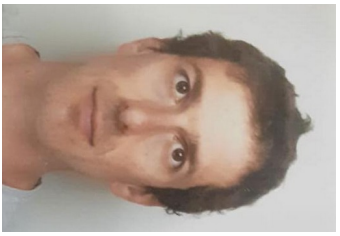
Conclusions

- Approche « par le bas » : du processus à l'intégration dans le système couplé intégral
- Approche « par le haut » : décortiquer le modèle pour comprendre
- Formaliser la calibration : mieux caractériser les incertitudes
- Accompagner les utilisateurs des simulations climatiques globales
  - « Projections régionales haute-résolution spatiale du niveau de la mer sur les côtes d'Europe de l'Ouest », thèse Alisée Chaigneau, co-encadrement A. Melet & G. Reffray, le 8 décembre à 14h à Mercator.





Mickaël Claudon



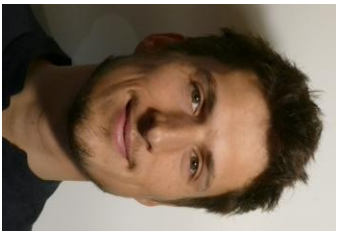
Tao Manni

Alisée Chaigneau

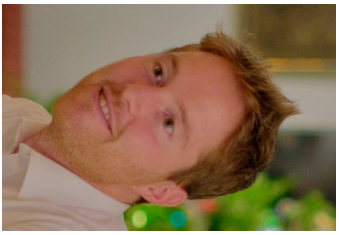
Merci !

Claudia Frauen

Sébastien Blein



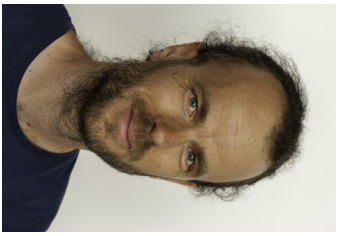
Yann Planton



Florent Brient

Maëva Marquillie

Mathieu Joly



Aurore Voldoire – Curriculum Vitae

Parcours

1998-2001	Formation ingénieur des travaux Météo-France
2001-2005	Thèse « Impact des changements d'utilisation des sols sur les projections climatiques »
2005-	Chercheur au CNRM/GMGEC Coordination du développement de CNRM-CM

Activité

- 77 articles dont 9 en premier auteur
- Participation à 4 jurys de thèse et 1 jury de HDR
- Participation aux comités d'évaluation PRACE & GENCI
- Membre du « OASIS Advisory Board »
- Interventions régulières dans des stages en formation permanente (MF & OMM).

Encadrement

Master 2

- 6 stages

Thèses

- M. Joly (AMMA) 2005-2008
- Y. Planton (PREFACE) 2012-2015
- A. Chaigneau (Mercator) 2019-2022

Post-doctorats

- O. Geoffroy (COMBINE) 2010-2012
- C. Frauen (PREFACE) 2014-2016
- F. Brient (PREFACE) 2016-2018
- S. Blein (COCOA) 2018-2020