

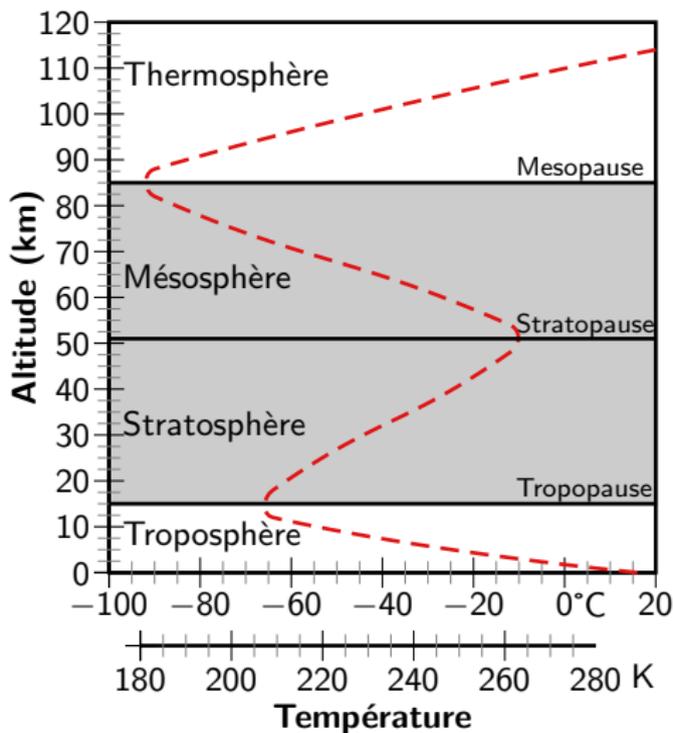
Étude comparative du rôle de la dynamique et de la chimie dans la modélisation de l'atmosphère moyenne

David Saint-Martin

Thèse dirigée par **Daniel Cariolle**.

Météo-France [CNRM-GAME/GMGEC/CAIAC]

Qu'est-ce que l'atmosphère moyenne ?

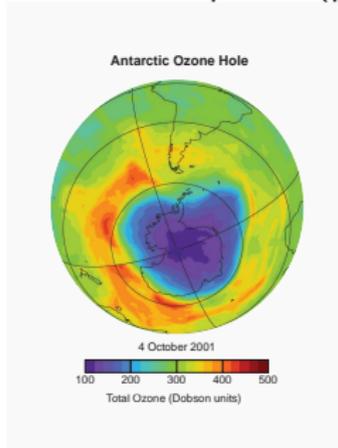


▷ Couches de l'atmosphère définies à partir du profil vertical de température.

- **Troposphère** : T décroît avec z (chauffage par le bas). Concentre près de 85% de la masse et la quasi-totalité de la vapeur d'eau de l'atmosphère.
- **Stratosphère** : L'absorption du rayonnement solaire par l'ozone conduit à l'augmentation de T avec z , ce qui limite les mouvements verticaux et en fait une couche stratifiée.
- **Atmosphère moyenne** : stratosphère et mésosphère.

Étude de l'atmosphère moyenne : contexte scientifique

- **Historiquement** focalisée sur **l'ozone**.
 - ▷ Mise en évidence d'une diminution périodique importante des contenus totaux en ozone dans les régions polaires (principalement antarctiques).
 - ▷ Rejet par les activités industrielles de chlorofluorocarbures (CFC).
 - ▷ Observer/prédire le retour à l'équilibre (protocole de Montréal).



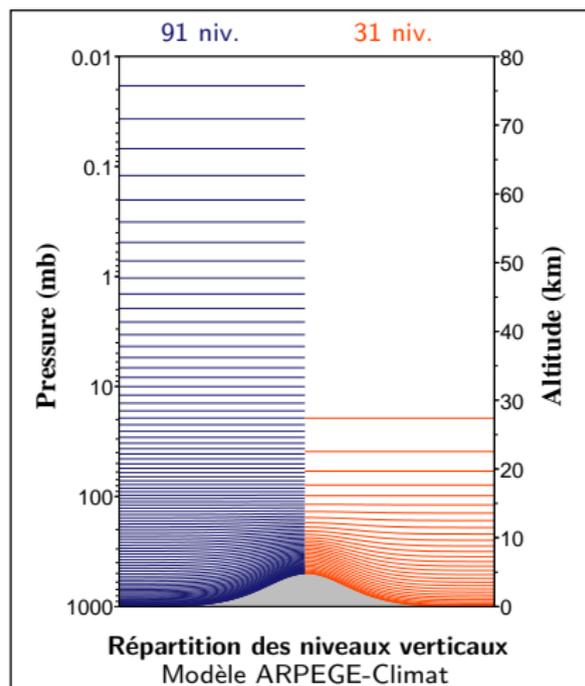
Trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique (oct. 2001).

Étude de l'atmosphère moyenne : contexte scientifique

- **Plus récemment** (milieu des années 90) orientée dans une perspective **climatique**.
 - ▷ Mise en évidence de **liens** substantiels entre la **troposphère** (communément étudiée) et la **stratosphère** à différentes échelles de temps (intrasaisonnaire à décennale).
 - ▷ Présence de gaz importants pour la **chimie** et pour le bilan **radiatif** de l'atmosphère (ozone, vapeur d'eau).
 - ▷ Perturbations **dynamiques** se propageant de la stratosphère vers la troposphère.

Étude de l'atmosphère moyenne : contexte scientifique

- Sous l'angle de la **modélisation**.

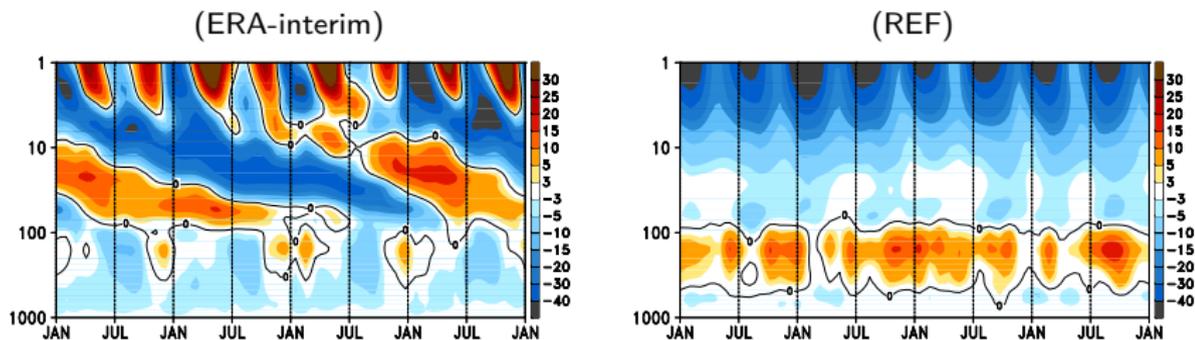


- ▶ Introduction progressive de l'atmosphère moyenne dans les modèles climatiques globaux.
- **Dynamique** : processus radiatifs complexes, ondes de gravité de petite échelle, ...
- **Chimie** : nombre conséquent d'espèces chimiques, microphysique des nuages stratosphériques, dynamique réaliste, ...

Étude de l'atmosphère moyenne : contexte scientifique

- Dans le modèle **atmosphérique** du CNRM : **ARPEGE-Climat**
 - ▷ Représentation inexacte de certains phénomènes importants :
 - variabilité du vortex polaire hivernal.
 - circulation méridienne de Brewer-Dobson.
 - oscillation quasi-biennale (QBO) et semi-annuelle (SAO) du vent dans la stratosphère équatoriale.

Évolution temporelle (sur 4 années) du vent zonal équatorial (m/s)



Étude de l'atmosphère moyenne : objectifs de la thèse

Ambitions de la thèse

- Contribuer à l'effort de compréhension du rôle de la stratosphère dans le climat de la troposphère.
- Améliorer la représentation de l'atmosphère moyenne dans le modèle atmosphérique ARPEGE-Climat.
 - ▷ Volet **dynamique** : inclusion d'une paramétrisation des ondes de gravité non orographiques.
 - ▷ Volet **chimique** : introduction d'un couplage avec un module de chimie stratosphérique détaillée.

Étude de l'atmosphère moyenne : objectifs de la thèse

Ambitions de la thèse

- Contribuer à l'effort de compréhension du rôle de la stratosphère dans le climat de la troposphère.
- Améliorer la représentation de l'atmosphère moyenne dans le modèle atmosphérique ARPEGE-Climat.
 - ▷ Volet **dynamique** : inclusion d'une paramétrisation des ondes de gravité non orographiques.
 - ▷ Volet **chimique** : introduction d'un couplage avec un module de chimie stratosphérique détaillée.

Plan de cet exposé

- ① Représentation des ondes de gravité non orographiques dans le modèle ARPEGE-Climat.
- ② Rôle de la chimie dans la dynamique de l'atmosphère moyenne.

Première partie

1 Les ondes de gravité

Introduction

- Propriétés générales
- Circulation dans la mésosphère
- Oscillation quasi-biennale

Paramétrisation

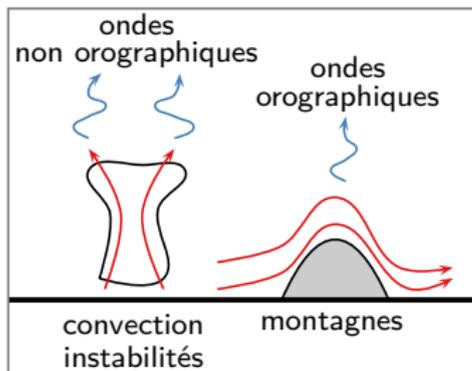
- Description
- Réglage

Rôle dans Arpège-Climat

Conclusion

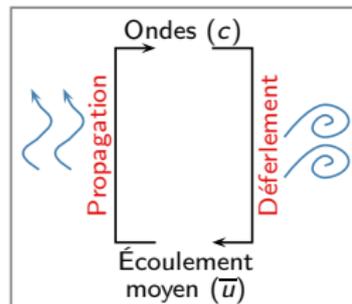
2 Un modèle de chimie-climat

Les ondes de gravité : propriétés générales

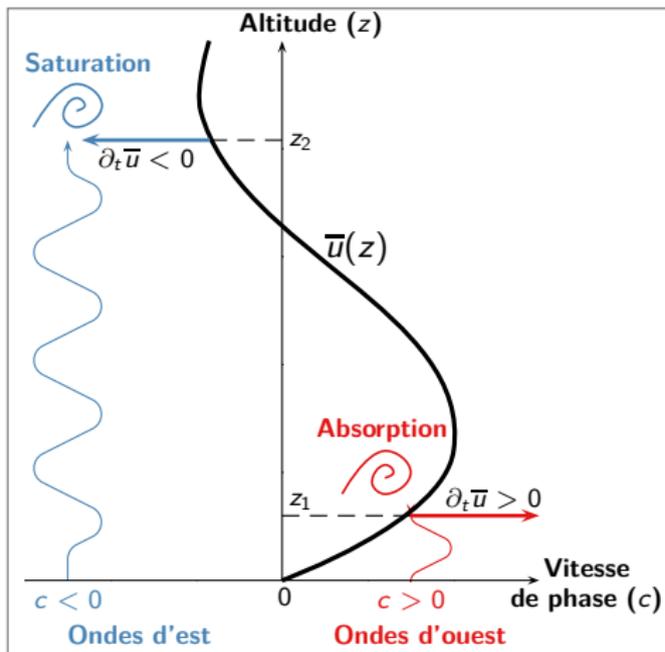


- Générées dans la troposphère par une variété de **sources**.
- Échelles spatio-temporelles **petites**.
 - ▷ horizontale : 10 - 500 km
 - ▷ verticale : 0.1 - 10 km

- Propagation **verticale** et interaction avec l'écoulement de grande échelle (théorie linéaire; [Lindzen, 1981](#)).
- Transport de **quantité de mouvement** jusque dans la stratosphère et la mésosphère.

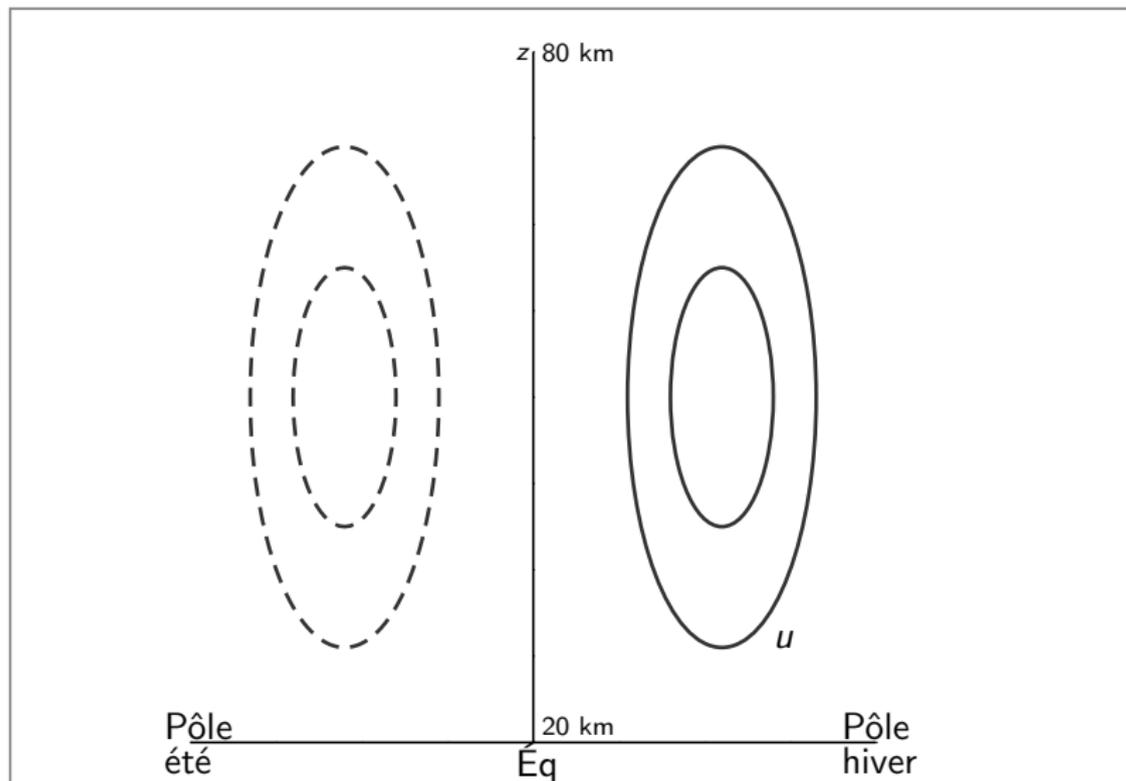


Propagation verticale : mécanismes de dissipation

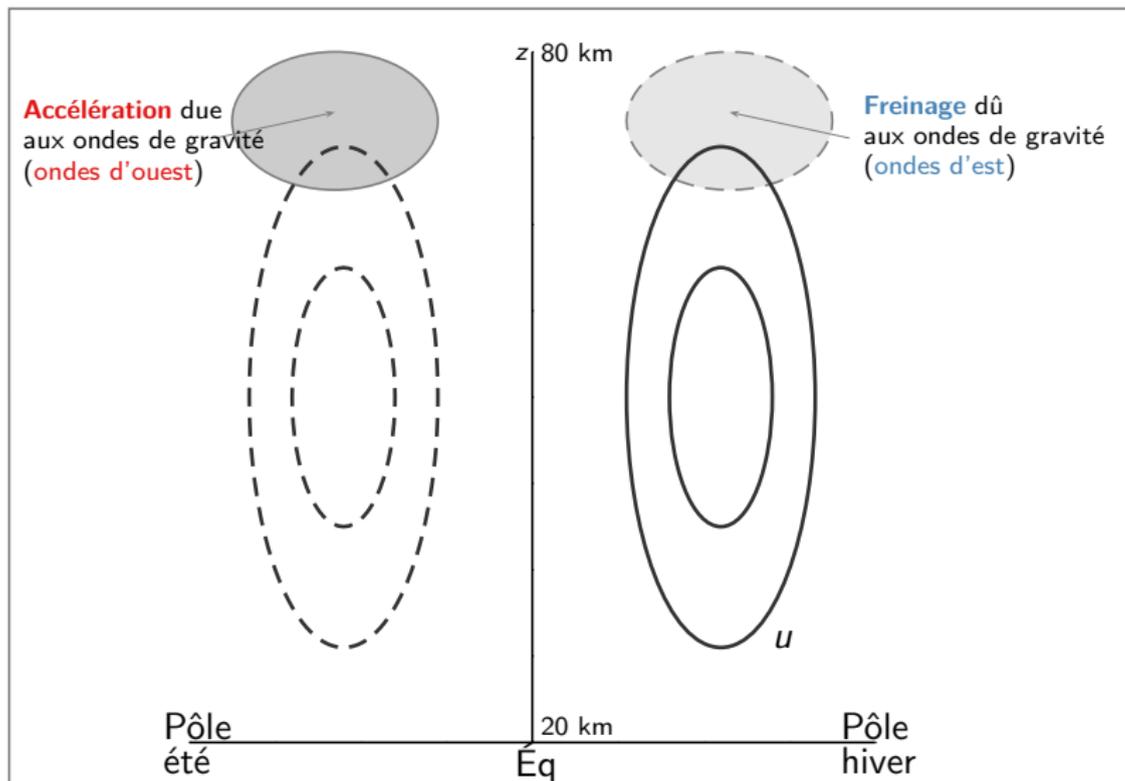


- **Propagation conservative.**
- **Déferlement dès que :**
 - **Absorption** ($c = \bar{u}$) par niveaux critiques (\triangleright Oscillation quasi-biennale).
 - **Saturation** par instabilité convective (\triangleright Circulation mésosphérique).
- **Se traduit par :**
 - **Dépôt** de quantité de mouvement : modification de l'écoulement.
 - **Mélange** turbulent.

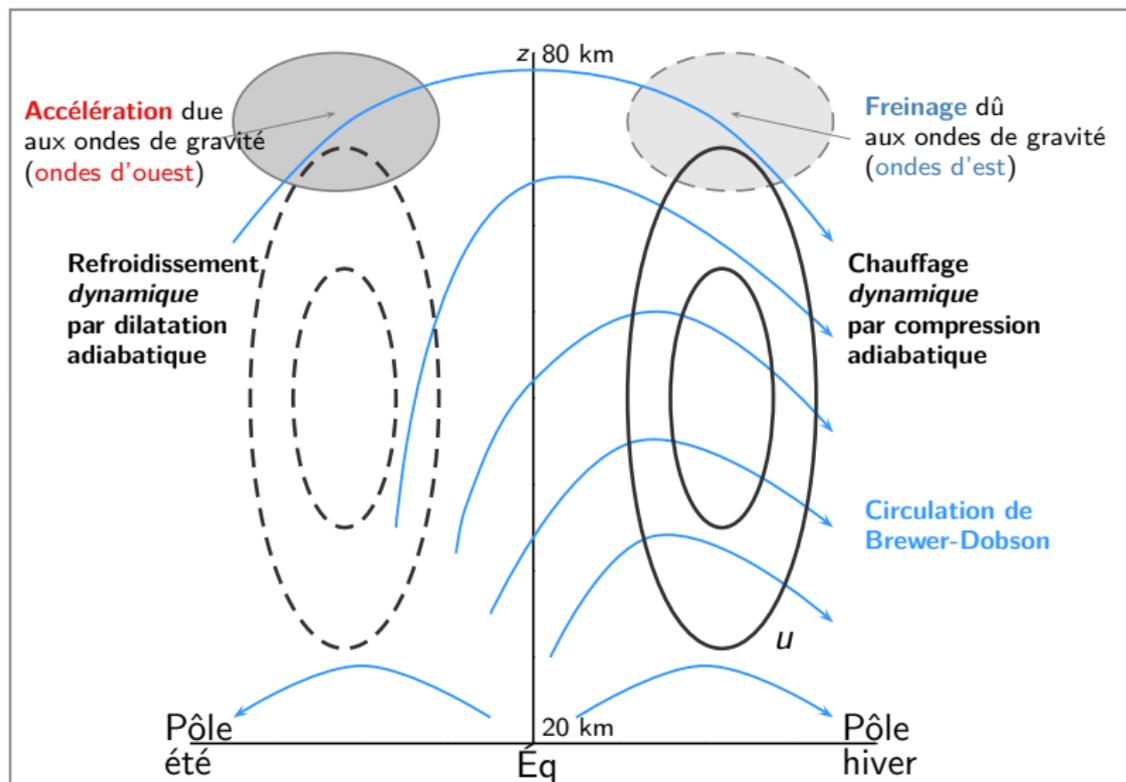
Rôle des ondes de gravité : circulation dans la mésosphère



Rôle des ondes de gravité : circulation dans la mésosphère

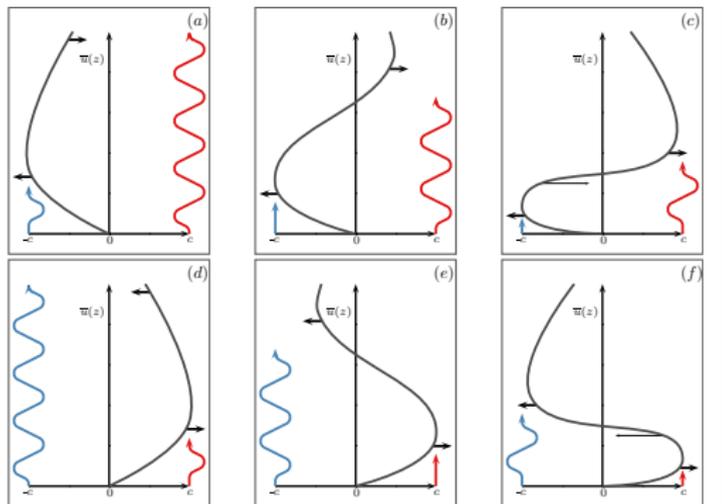


Rôle des ondes de gravité : circulation dans la mésosphère



Rôle des ondes de gravité : l'oscillation quasi-biennale

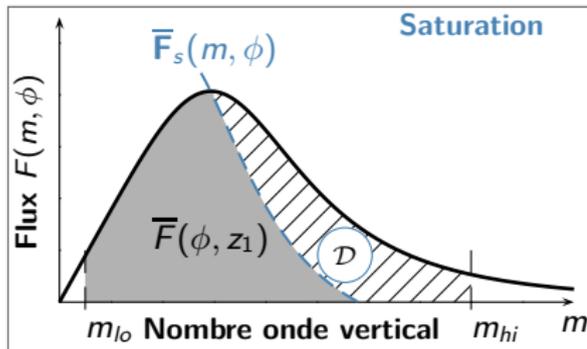
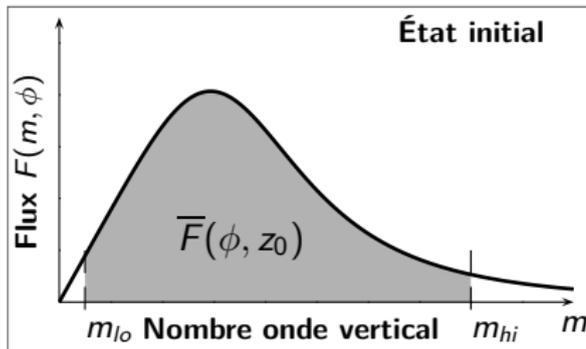
- Théorie de la QBO (Holton et Lindzen, 1972 ; Plumb, 1977).
- Rôle des ondes équatoriales de grande échelle.



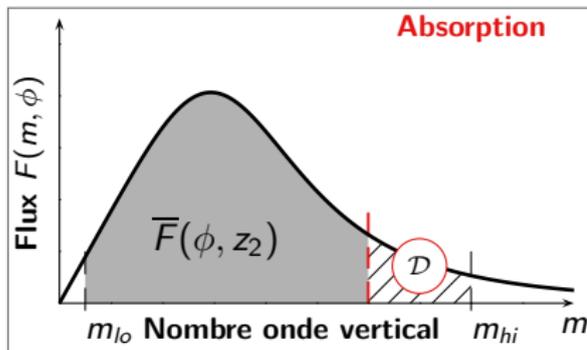
Paramétrisation des ondes de gravité

- ▶ Représentation simplifiée de leurs effets : **paramétrisation**.
- ▶ 2 types de paramétrisations : ondes orographiques et **non orographiques**.
- ▶ Développement récent (Warner et McIntyre, 1996, 2001 ; Hines, 1997).
- Choix de la paramétrisation **WMS** (Scinocca, 2003) : permet la prise en compte de plusieurs types de dissipation (McLandress, 2005).
- Études de **sensibilité** aux choix de certains paramètres : tests unidimensionnels.
- **Réglage** de la paramétrisation : utilisation des observations existantes.

La paramétrisation WMS (2)

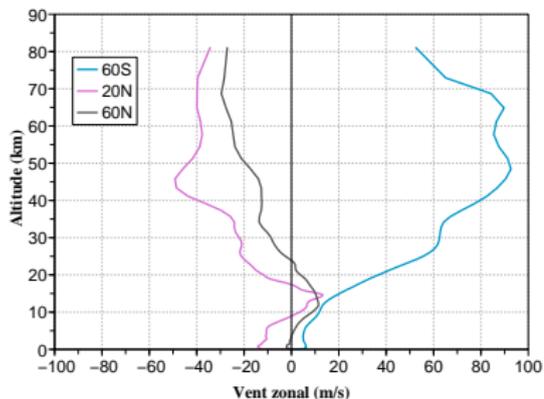


- ▷ Choix de la forme du spectre et quantité de flux initial F_0 .
- ▷ Discrétisation du spectre : considération pratique.
- ▷ Propagation conforme à la théorie linéaire.
- ▷ Dissipation : prise en compte de l'absorption et de la saturation.

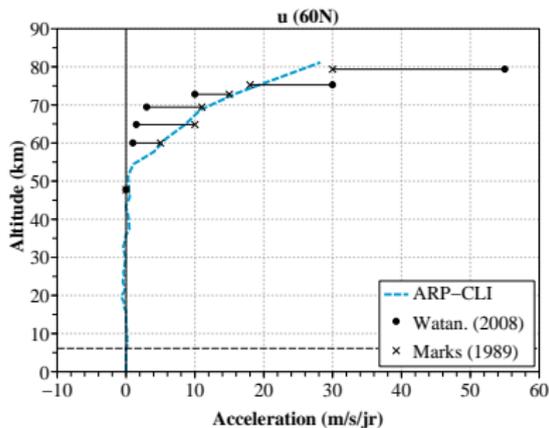


Réglage des paramètres : validation unidimensionnelle

u [$m.s^{-1}$] (juillet)



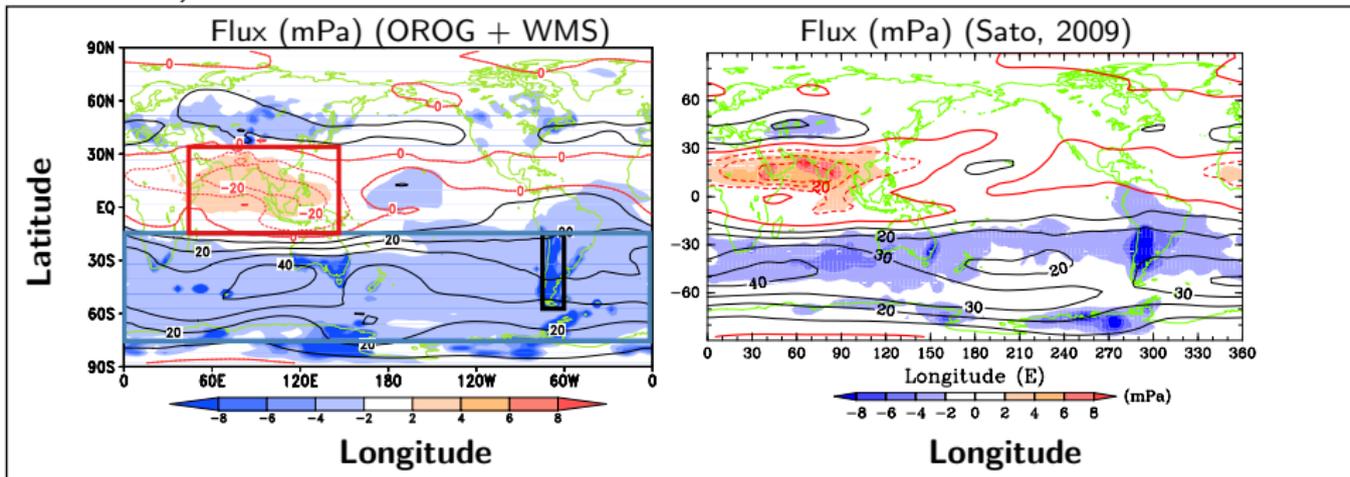
Accélération $\partial_t u$ ($m.s^{-1}.jr^{-1}$)



- Validation unidimensionnelle : profils de vent extraits du modèle.
- Comparaison aux observations (Marks, 1989) et aux résultats d'un modèle à très haute résolution (Watanabe, 2008).
- Calibration raisonnable des tendances de vent mésosphériques.

Réglage des paramètres : validation tridimensionnelle

Distribution horizontale (à 100 hPa, juillet) du flux net de quantité de mouvement (mPa) transporté par les ondes de gravité (contours : vent zonal)



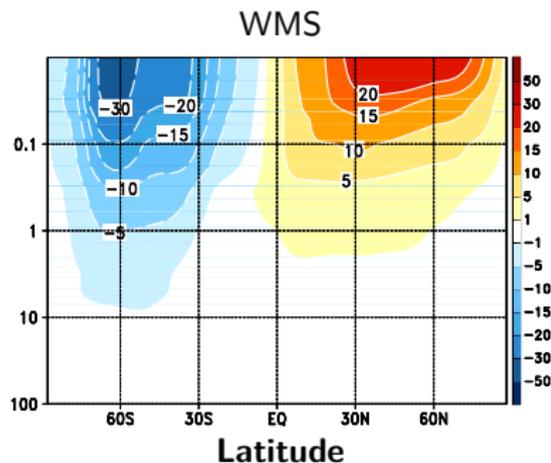
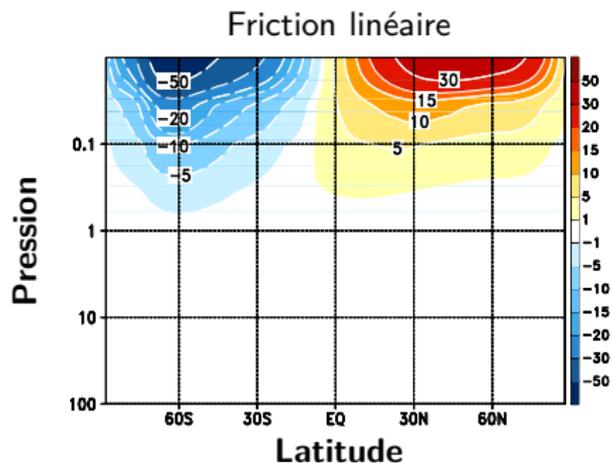
- Ordre de grandeur des flux à la tropopause respecté.
- Bonne correspondance avec le modèle à très haute résolution.
- *Localisation* des sources due à l'absorption par les vents troposphériques.

Évaluation dans le modèle Arpège-Climat

- Simulations **atmosphériques** (forçage par des SST) de 30 ans (climat présent 1971 – 2000) .
- Configuration en 91 niveaux (toit du modèle vers 80 km d'altitude) et une grille horizontale : 128 (lon) × 64 (lat).
- Comparaison d'une simulation de **référence** et d'une simulation incluant la **paramétrisation** WMS.
- Évaluation **globale** sous différents aspects :
 - ▷ Effet sur la circulation mésosphérique.
 - ▷ Rôle dans le cycle de vie du vortex polaire de l'hémisphère sud.
 - ▷ Effet dans la stratosphère équatoriale.

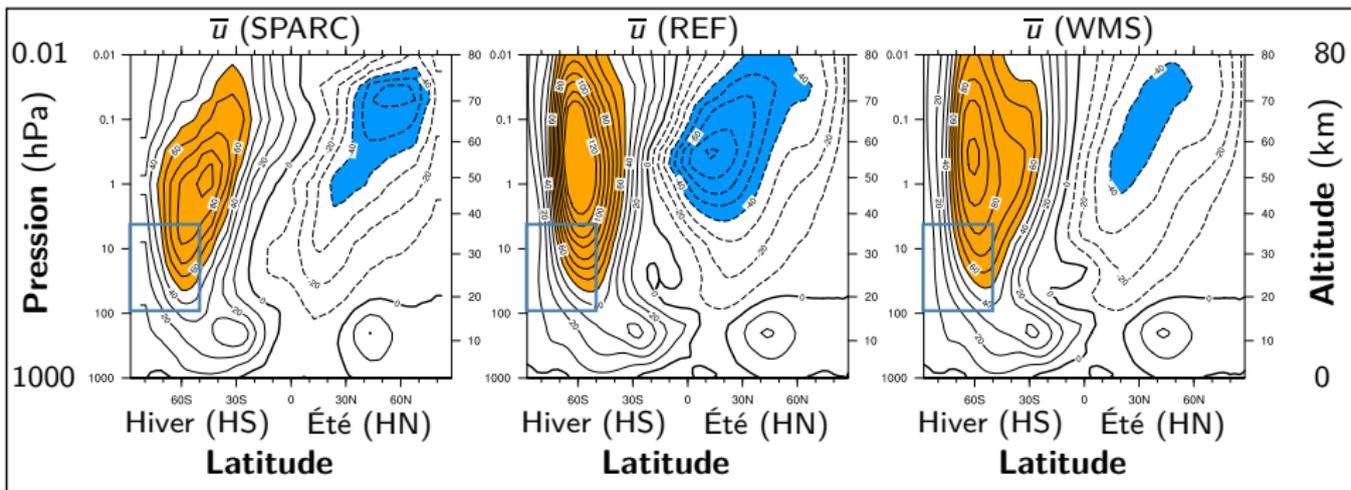
Climatologie zonale (juillet) de la tendance de vent induite par les ondes de gravité

$$\partial_t u \text{ (m.s}^{-1}.\text{jr}^{-1}\text{)}$$



- Valeurs comparables aux observations.
- Effet jusque dans la stratosphère (en hiver).

Climatologie (juillet) de la moyenne zonale du vent zonal



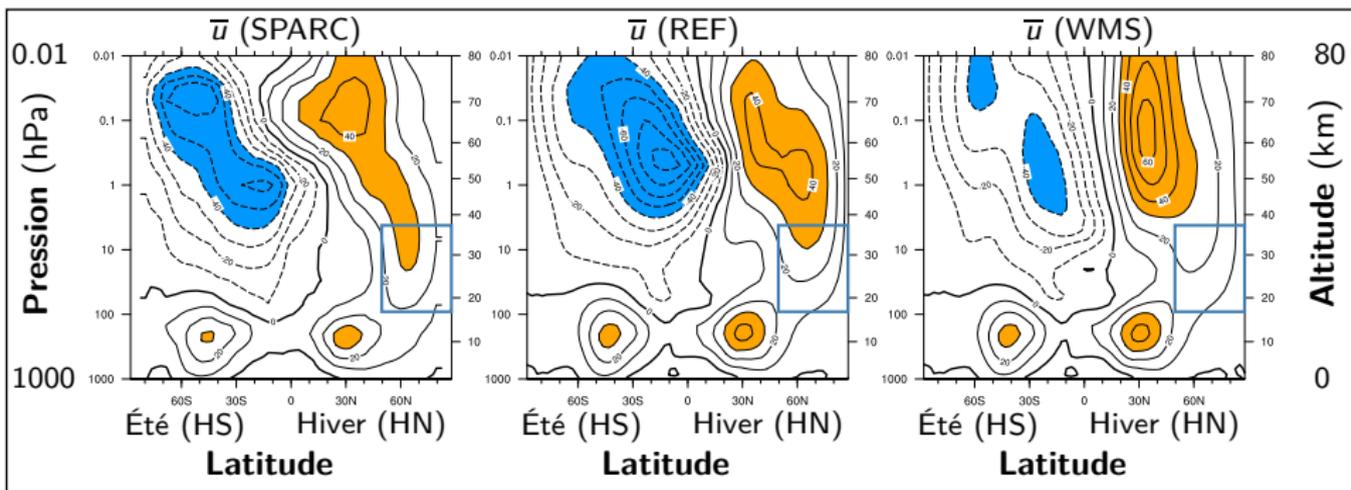
- **Référence**

- Jets trop intenses ($> 120 \text{ m.s}^{-1}$ en hiver)
- Mauvaise localisation des **maxima**.

- **Paramétrisation WMS**

- Ralentissements des jets (hiver et été) : en accord avec SPARC.
- Représentation de l'inclinaison des jets.

Climatologie (janvier) de la moyenne zonale du vent zonal



- **Référence**

- ▷ Jets trop intenses.

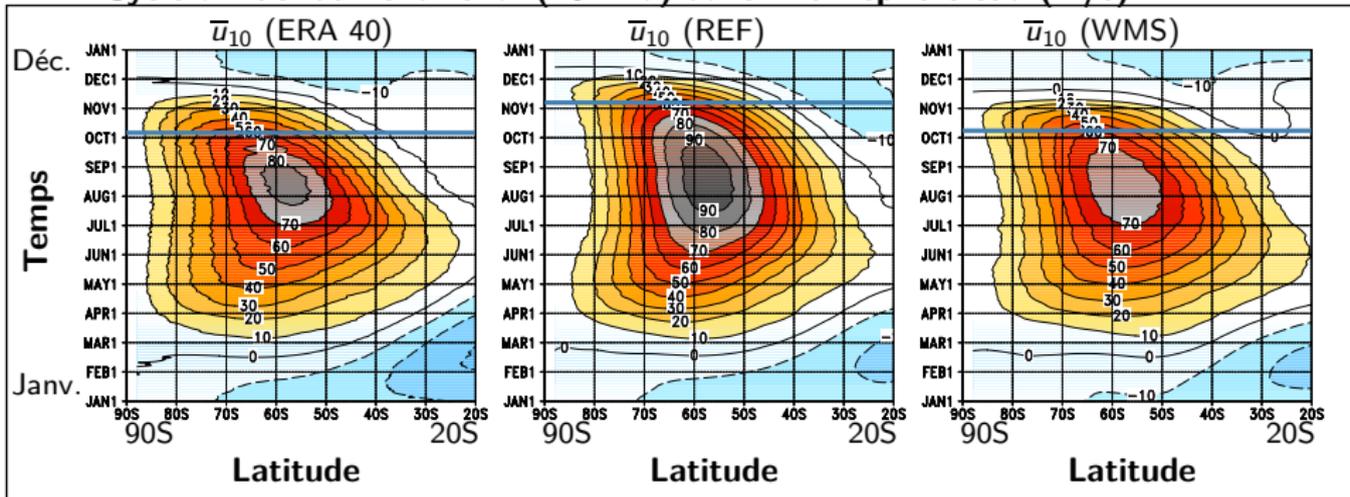
- **Paramétrisation WMS**

- ▷ Ralentissement du jet d'été : en accord avec SPARC.

- ▷ Effet contrasté dans l'hémisphère nord (autres acteurs en jeu).

Le vortex polaire dans l'hémisphère sud

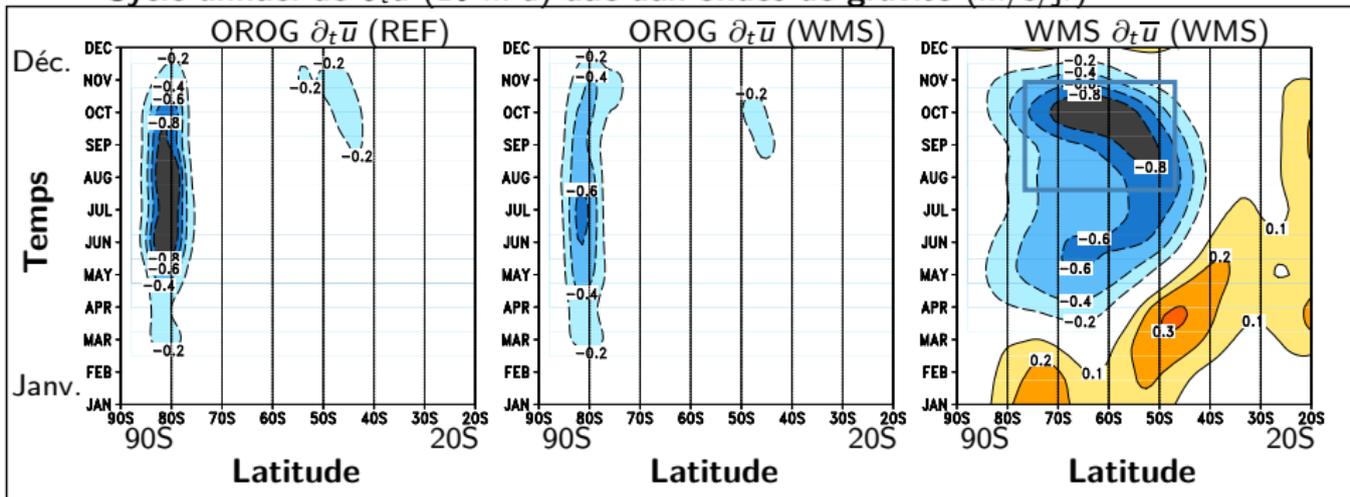
Cycle annuel du vent zonal (10 hPa) dans l'hémisphère sud (m/s)



- Ralentissement réaliste du jet polaire hivernal (70 m.s^{-1}).
- Date de destruction du **vortex** plus précoce (1 mois), en meilleur accord avec la réanalyse ERA 40.

Le vortex polaire dans l'hémisphère sud

Cycle annuel de $\partial_t \bar{u}$ (10 hPa) due aux ondes de gravité (m/s/jr)

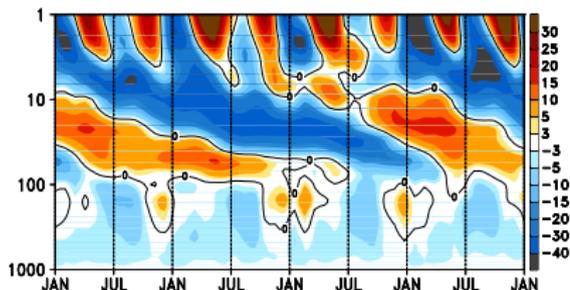


- Modification du forçage par les ondes orographiques : explication insuffisante.
- **Forçage** par les ondes non orographiques (WMS) : explication possible (cf Scaife, 2002 ; Scinocca, 2008).

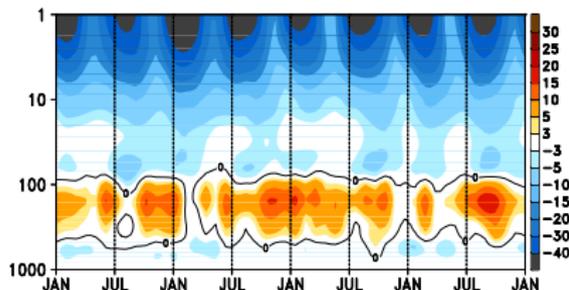
La stratosphère équatoriale

Évolution temporelle (sur 4 années) du vent zonal équatorial (m/s)

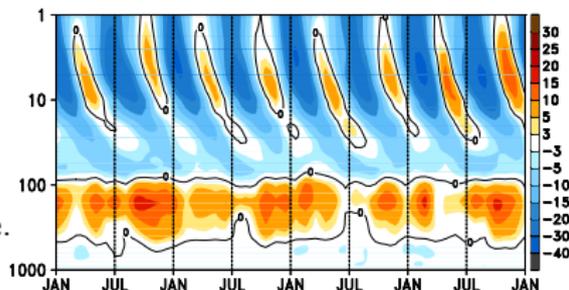
(ERA-interim)



(REF)



(WMS)



- Représentation de la SAO.
 - ▷ Vents d'ouest (stratopause).
- Absence d'une QBO réaliste.
 - ▷ Nombreux tests de sensibilité.
 - ▷ Résolution verticale fine.
 - ▷ Réglage de la diffusion horizontale.
 - ▷ Ondes équatoriales ?
 - ▷ Circulation de Brewer-Dobson ?

Conclusion

- ① **Inclusion** d'une paramétrisation d'ondes de gravité non orographiques.
 - ▷ Travail préalable de réglage.
 - ▷ Utilisation tridimensionnelle dans le modèle ARPEGE-Climat.
- ② **Évaluation** de l'effet dans le modèle.
 - ▷ Améliorations indéniables de la circulation de l'atmosphère moyenne.
 - ▷ Base de travail solide pour des développements futurs.

Deuxième partie

1 Les ondes de gravité

2 Un modèle de chimie-climat

Contexte historique

Développement d'un modèle de chimie-climat

Validation

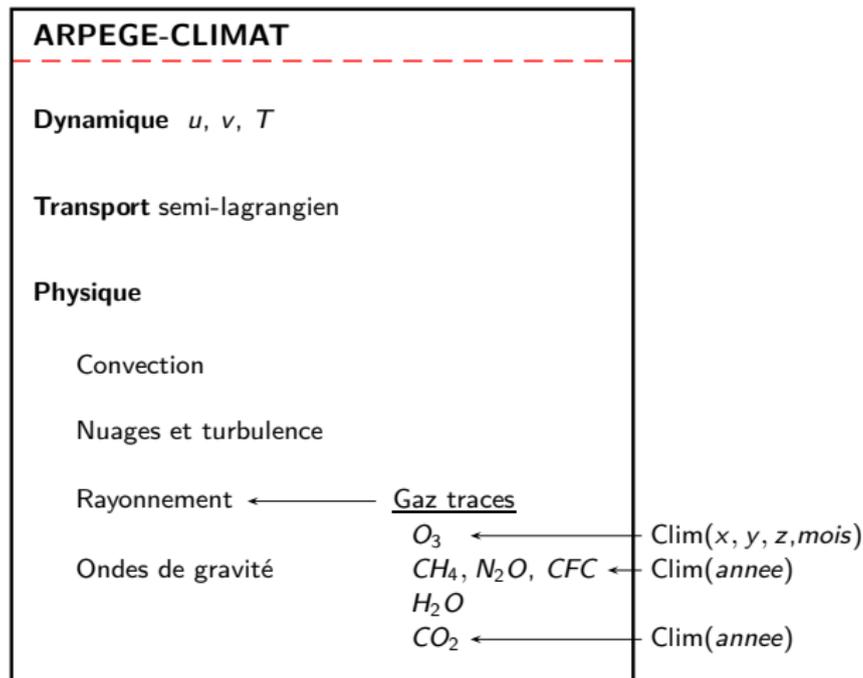
Rôle du couplage

Conclusion

La chimie dans les modèles globaux

- **Historiquement** jugée trop onéreuse (numériquement parlant) pour y être introduite directement.
 - ▷ Climatologies pour définir les principaux gaz radiativement actifs.

La chimie dans les modèles globaux



La chimie dans les modèles globaux

- **Historiquement** jugée trop onéreuse (numériquement parlant) pour y être introduite directement.
 - ▷ **Climatologies** pour définir les principaux gaz radiativement actifs.
 - ▷ Utilisation de schémas **simplifiés** : schéma linéaire d'ozone ([Cariolle et Déqué, 1986](#)).
 - ▷ Création de modèles **dédiés** :
 - modèles de chimie-transport (CTM)
 - pilotés par les champs météorologiques.
 - MOCAGE pour le CNRM.

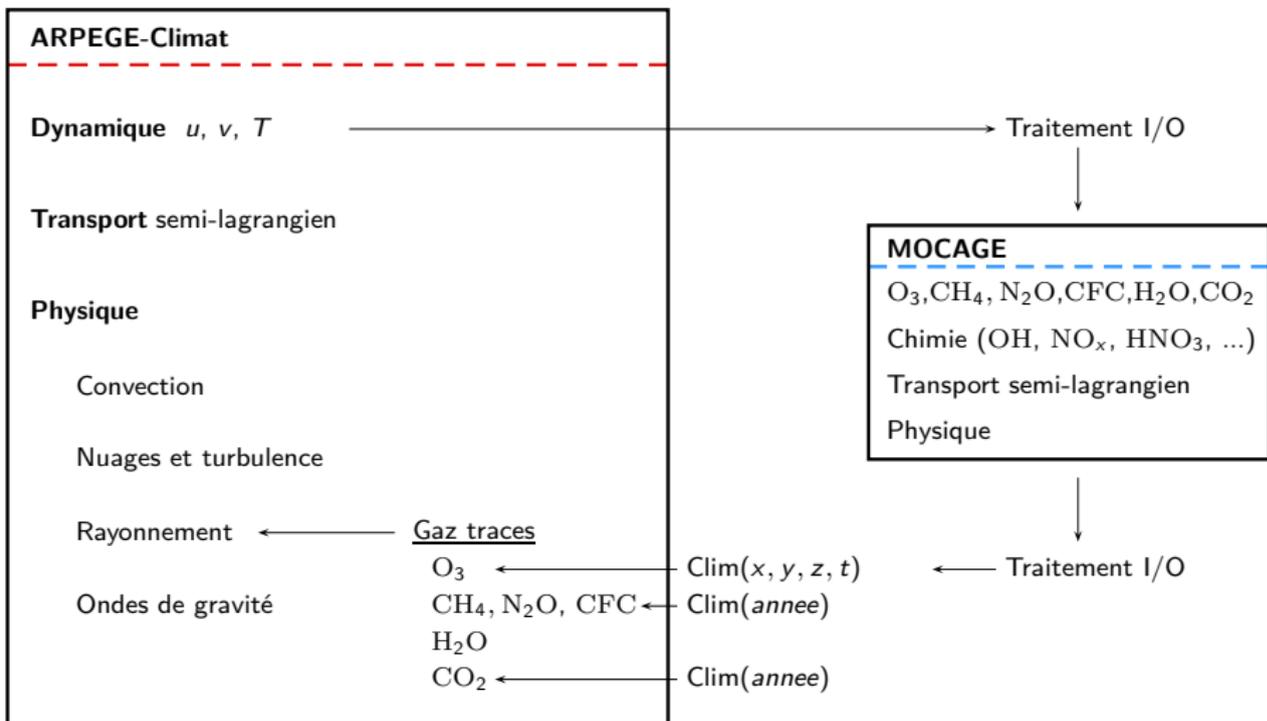
La chimie dans les modèles globaux

- **Historiquement** jugée trop onéreuse (numériquement parlant) pour y être introduite directement.
 - ▷ **Climatologies** pour définir les principaux gaz radiativement actifs.
 - ▷ Utilisation de schémas **simplifiés** : schéma linéaire d'ozone ([Cariolle et Déqué, 1986](#)).
 - ▷ Création de modèles **dédiés** :
 - modèles de chimie-transport (CTM)
 - pilotés par les champs météorologiques.
 - MOCAGE pour le CNRM.
- **Plus récemment** l'étude du rôle des interactions chimie-climat devient un enjeu important.
 - ▷ Développement de nouveaux modèles **couplés** chimie-climat (CCM).
 - ▷ Projet d'intercomparaison **CCM-Val** (2ème phase : 2007-2010).
 - ▷ Mise en place des outils au CNRM.

Développement d'un modèle de chimie-climat

- 1 Utilisation des outils existants (ARPEGE-Climat et MOCAGE)
 - ▷ Fonctionnement successif des deux modèles : modèle CNRM-ACM.
- 2 Constat (participation au projet CCM-Val-2)
 - ▷ Temps de calcul **prohibitif**.
 - ▷ Couplage **faible** : basse fréquence (6h), une seule espèce (O_3).
 - ▷ Nécessité de modifier la configuration.
- 3 Développement d'un *nouveau* modèle CNRM-CCM.
 - ▷ Intégration directe du module de chimie stratosphérique REPROBUS de MOCAGE dans le modèle ARPEGE-Climat.
 - ▷ Évolution tridimensionnelle d'une 40 d'espèces chimiques.
 - ▷ Temps de calcul réduit d'un facteur 20 (simulations climatiques).
 - ▷ Couplage : fréquence du modèle atmosphérique (15 min), plusieurs espèces (O_3 , CH_4 , H_2O , ...).
 - ▷ Souplesse d'utilisation : mode forcé, tous forçages, ...

Le modèle CNRM-ACM



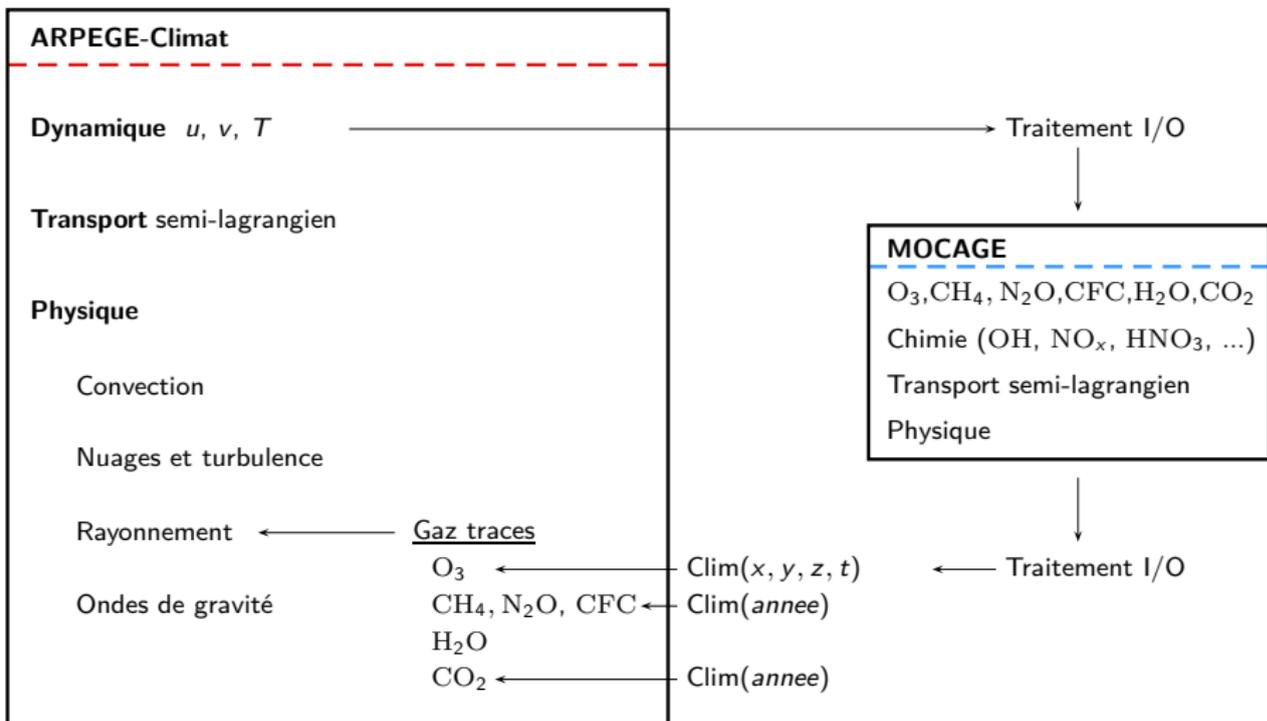
Développement d'un modèle de chimie-climat

- 1 Utilisation des outils existants (ARPEGE-Climat et MOCAGE)
 - ▷ Fonctionnement successif des deux modèles : modèle CNRM-ACM.
- 2 Constat (participation au projet CCM-Val-2)
 - ▷ Temps de calcul **prohibitif**.
 - ▷ Couplage **faible** : basse fréquence (6h), une seule espèce (O_3).
 - ▷ Nécessité de modifier la configuration.
- 3 Développement d'un *nouveau* modèle CNRM-CCM.
 - ▷ Intégration directe du module de chimie stratosphérique REPROBUS de MOCAGE dans le modèle ARPEGE-Climat.
 - ▷ Évolution tridimensionnelle d'une 40 d'espèces chimiques.
 - ▷ Temps de calcul réduit d'un facteur 20 (simulations climatiques).
 - ▷ Couplage : fréquence du modèle atmosphérique (15 min), plusieurs espèces (O_3 , CH_4 , H_2O , ...).
 - ▷ Souplesse d'utilisation : mode forcé, tous forçages, ...

Développement d'un modèle de chimie-climat

- 1 Utilisation des outils existants (ARPEGE-Climat et MOCAGE)
 - ▷ Fonctionnement successif des deux modèles : modèle CNRM-ACM.
- 2 Constat (participation au projet CCM-Val-2)
 - ▷ Temps de calcul **prohibitif**.
 - ▷ Couplage **faible** : basse fréquence (6h), une seule espèce (O_3).
 - ▷ Nécessité de modifier la configuration.
- 3 Développement d'un *nouveau* modèle CNRM-CCM.
 - ▷ Intégration directe du module de chimie stratosphérique REPROBUS de MOCAGE dans le modèle ARPEGE-Climat.
 - ▷ Évolution tridimensionnelle d'une 40 d'espèces chimiques.
 - ▷ Temps de calcul réduit d'un facteur 20 (simulations climatiques).
 - ▷ Couplage : fréquence du modèle atmosphérique (15 min), plusieurs espèces (O_3 , CH_4 , H_2O , ...).
 - ▷ Souplesse d'utilisation : mode forcé, tous forçages, ...

Le modèle CNRM-ACM



Le modèle CNRM-CCM : conception

ARPEGE-Climat

Dynamique u, v, T

Transport SL

Physique

Convection

Nuages et turbulence

Rayonnement ← Gaz traces

Ondes de gravité

MOCAGE

$O_3, CH_4, N_2O, CFC, H_2O, CO_2$

Chimie (OH, NO_x , HNO_3 , ...)

Transport SL

Physique

O_3

CH_4, N_2O, CFC

H_2O

CO_2

Le modèle CNRM-CCM : réalisation

ARPEGE-Climat + Chimie

Dynamique u, v, T

Transport SL

Physique

Convection

Nuages et turbulence

Rayonnement ← Gaz traces

Ondes de gravité

O₃

CH₄, N₂O, CFC

H₂O

CO₂

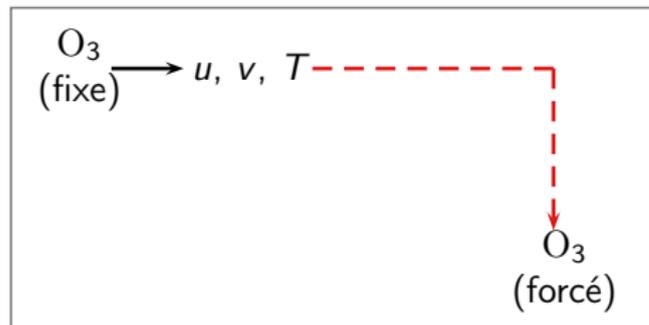
Chimie (OH, NO_x, HNO₃...)

Développement d'un modèle de chimie-climat

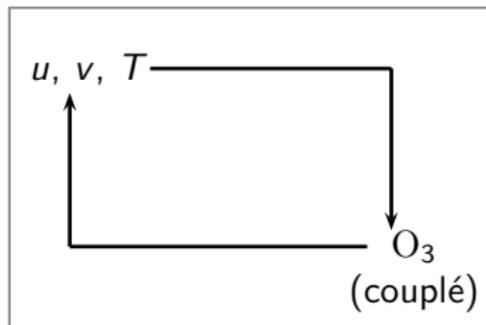
- 1 Utilisation des outils existants (ARPEGE-Climat et MOCAGE)
 - ▷ Fonctionnement successif des deux modèles : modèle CNRM-ACM.
- 2 Constat (participation au projet CCM-Val-2)
 - ▷ Temps de calcul **prohibitif**.
 - ▷ Couplage **faible** : basse fréquence (6h), une seule espèce (O_3).
 - ▷ Nécessité de modifier la configuration.
- 3 Développement d'un *nouveau* modèle CNRM-CCM.
 - ▷ Intégration directe du module de chimie stratosphérique REPROBUS de MOCAGE dans le modèle ARPEGE-Climat.
 - ▷ Évolution tridimensionnelle d'une 40 d'espèces chimiques.
 - ▷ Temps de calcul réduit d'un facteur 20 (simulations climatiques).
 - ▷ Couplage : fréquence du modèle atmosphérique (15 min), plusieurs espèces (O_3 , CH_4 , H_2O , ...).
 - ▷ Souplesse d'utilisation : mode forcé, tous forçages, ...

Validation du modèle de chimie-climat (CNRM-CCM)

- ① Évaluation de la **valeur réelle**
 - Vérification de la fidélité du modèle aux observations.
 - Comparaison aux meilleurs modèles internationaux.
- ② Évaluation de la **valeur ajoutée**
 - Comparaison avec le modèle *forcé*.
 - Interprétation des résultats (partie suivante).

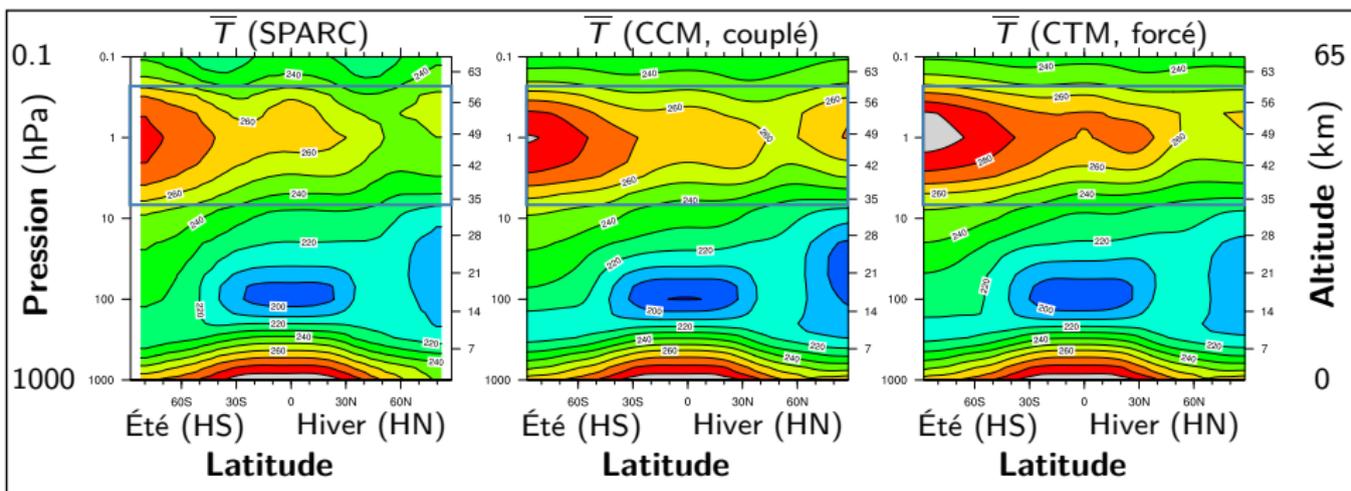


CNRM-CCM en mode forcé
≡ CNRM-CTM



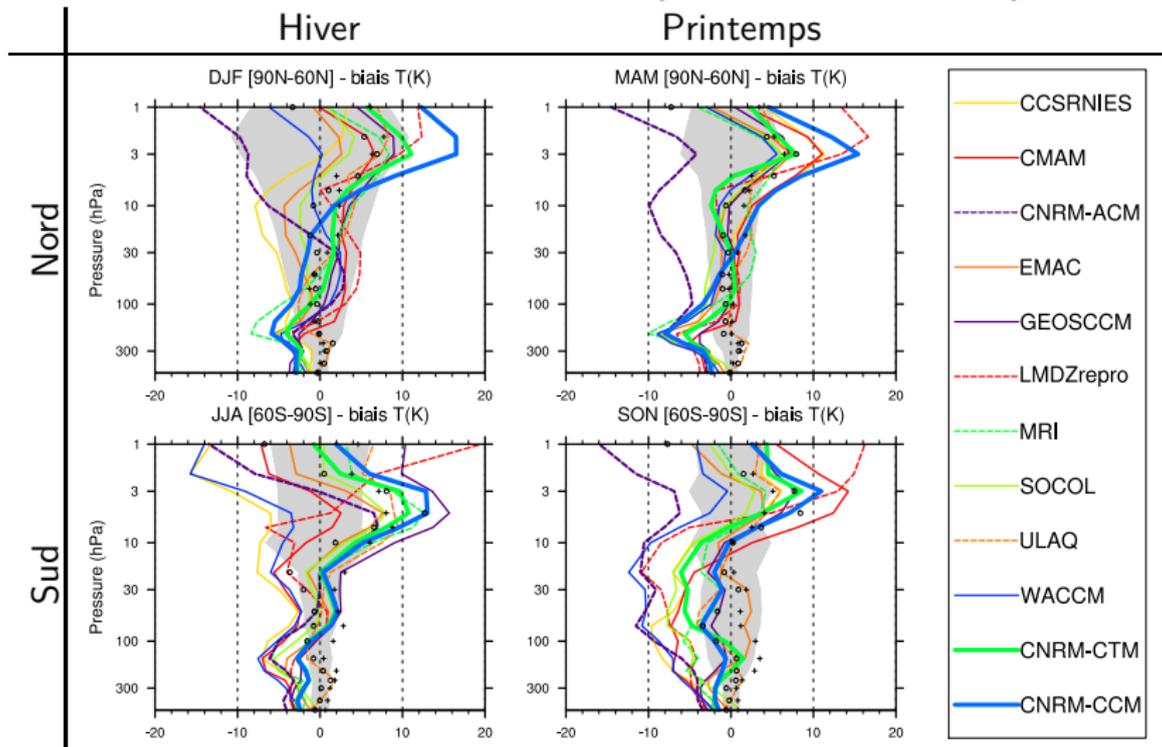
en mode couplé
≡ CNRM-CCM

Climatologie zonale (janvier) de la température.



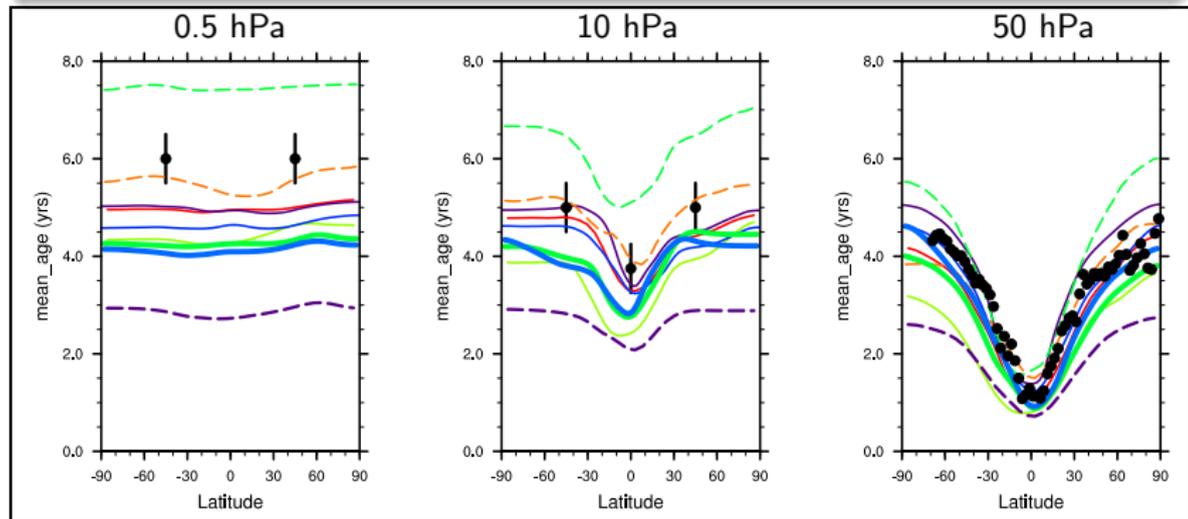
- **Valeur réelle**
 - ▷ Bonne correspondance générale.
- **Valeur ajoutée ?**
 - ▷ Relativement proche.
 - ▷ Réduction des biais à la stratopause.
 - ▷ Tropopause tropicale plus froide.

Biais de température vs ERA40 (régions polaires)



Âge de l'air

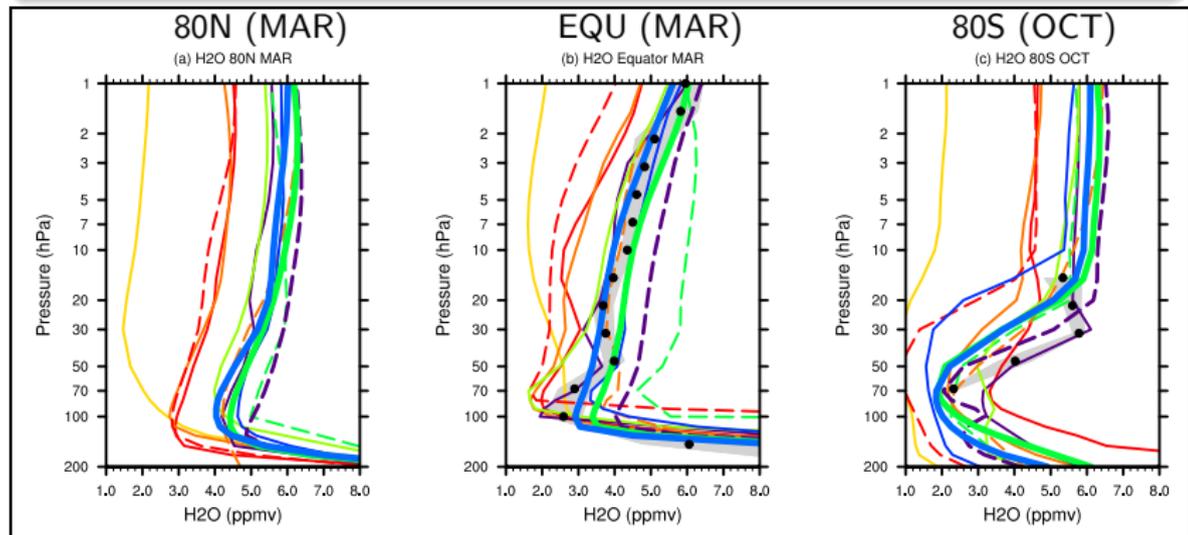
Représentation du **transport** cruciale pour les espèces à longue durée de vie (méthane CH_4 , protoxyde d'azote N_2O).



- **Valeur réelle** ▷ Représentation réaliste confirmée par d'autres diagnostics (tape recorder).
- **Valeur ajoutée ?** ▷ Circulation de Brewer-Dobson reste trop rapide (problème robuste).

Profil vertical de vapeur d'eau

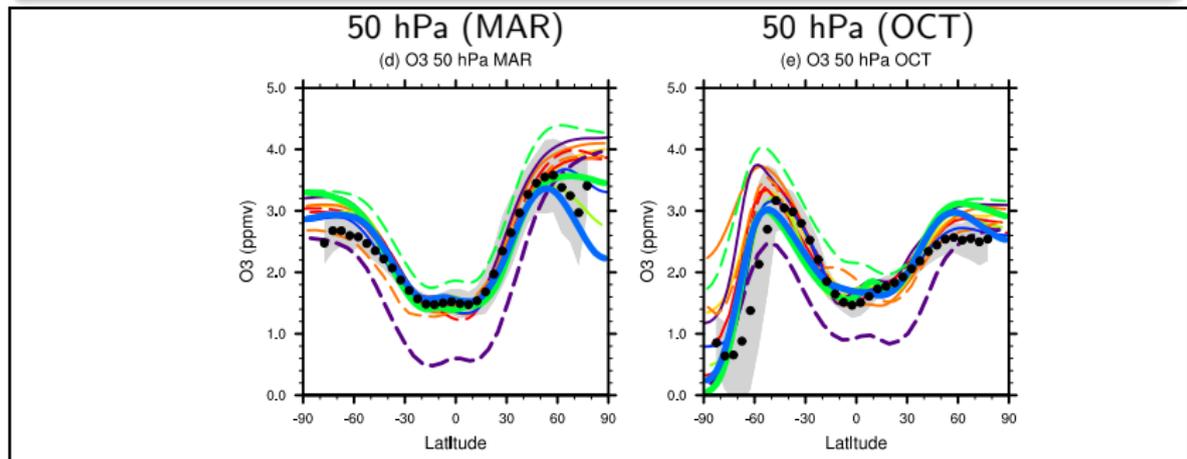
Rôle important : **radiatif** (Solomon, 2010) et **chimique** (nuages).



- **Valeur réelle** ▷ En accord avec les observations HALOE (dispersion des modèles).
- **Valeur ajoutée ?** ▷ Différence de température de la tropopause tropicale.

Ozone

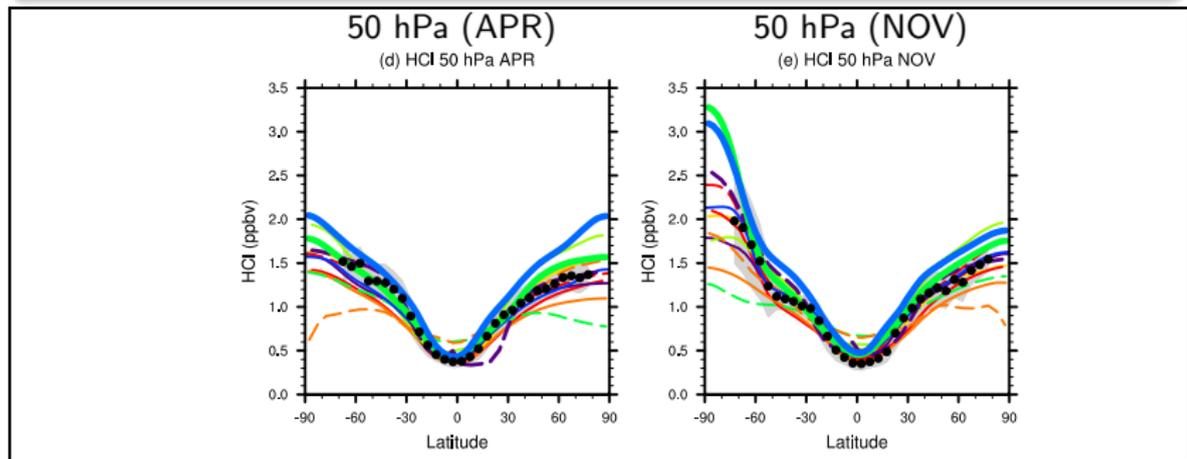
Rôle particulièrement important pour la **dynamique**.



- **Valeur réelle** ▷ En accord avec les observations (cohérence des modèles).
- **Valeur ajoutée ?** ▷ Différences notables dans la stratosphère hivernale de l'hémisphère nord (cf partie suivante).

Chlorure d'hydrogène

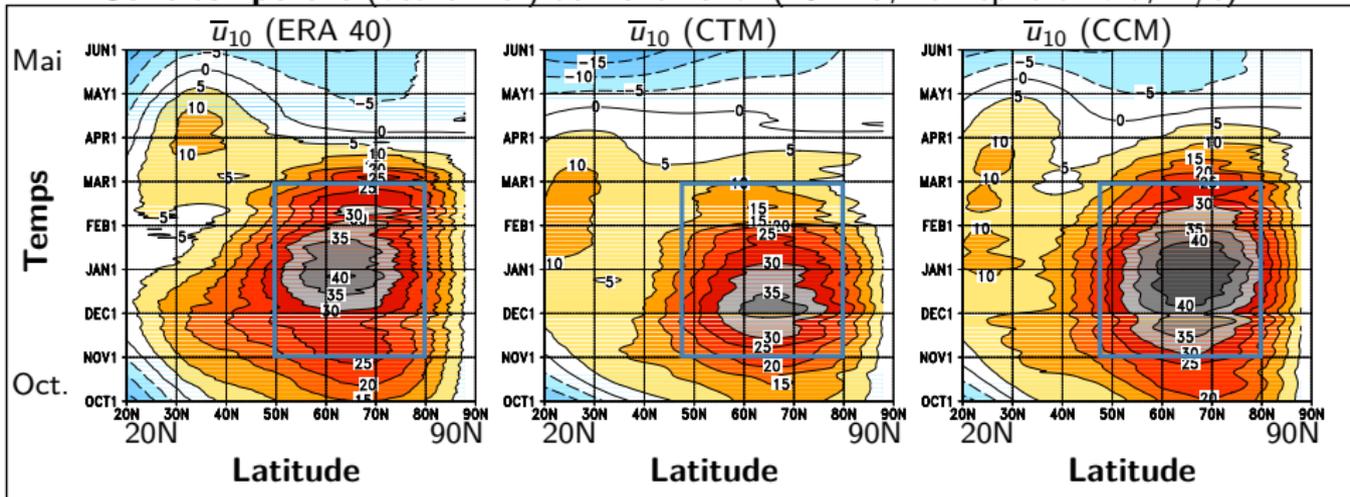
Espèce-**réservoir** qui libère des espèces destructrices d'ozone.



- **Valeur réelle** ▷ Surestimation des contenus en HCl.
- **Valeur ajoutée ?** ▷ Différences dans la stratosphère hivernale.

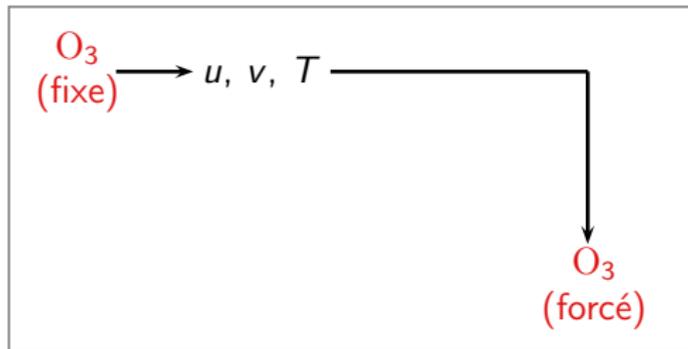
Couplage chimique : constat

Série temporelle (oct. à mai) du vent zonal (10 hPa, hémisphère nord, m/s)



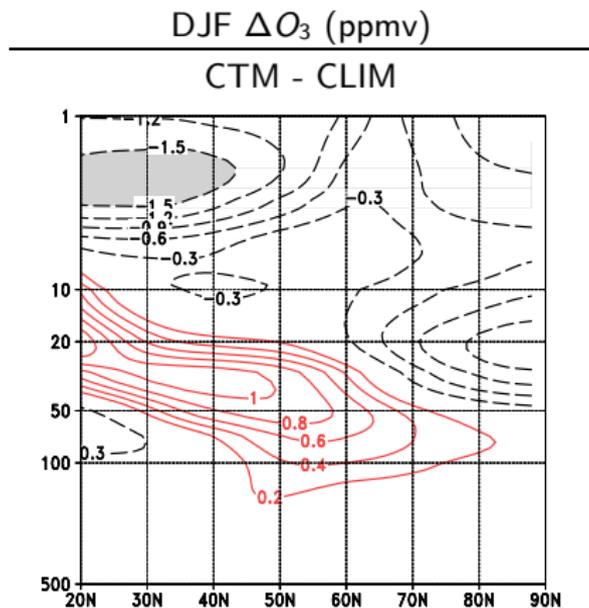
- Meilleure représentation du cycle de vie du vortex polaire.
 - ▷ Plus intense.
 - ▷ Durée plus longue.

Couplage chimique : méthodologie (1)



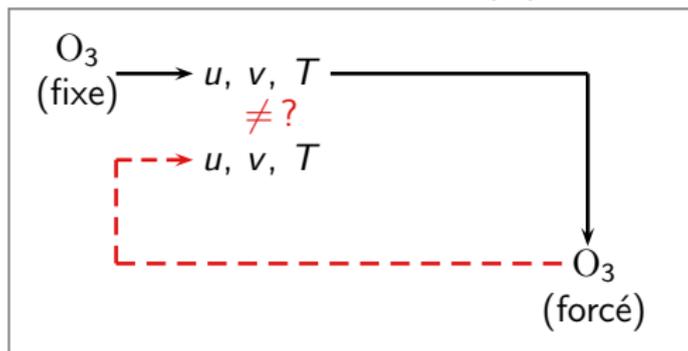
- 1 Dans quelle mesure le champ d'ozone simulé par le modèle en forcé est-il différent du champ prescrit ?
- 2 Dans quelle mesure ce champ d'ozone est-il susceptible de modifier la dynamique atmosphérique ?
- 3 Dans quelle mesure cette perturbation crée-t-elle :
 - un nouveau champ d'ozone ? réaction *chimique* ? chimie hétérogène ?
 - une nouvelle dynamique ? réaction *atmosphérique* ? circulation méridienne ? ondes planétaires ?

Couplage chimique : interprétation possible (1)



- Réduction importante dans la stratosphère polaire (> 1 ppmv).

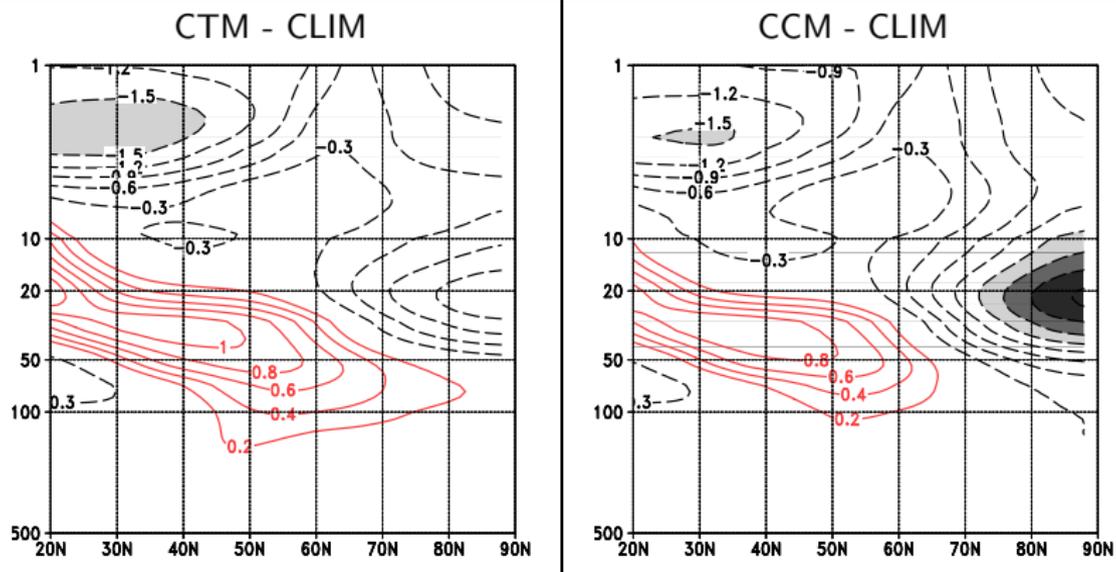
Couplage chimique : méthodologie (2)



- 1 Dans quelle mesure le champ d'ozone simulé par le modèle en forcé est-il différent du champ prescrit ?
- 2 Dans quelle mesure ce champ d'ozone est-il susceptible de modifier la dynamique atmosphérique ?
- 3 Dans quelle mesure cette perturbation crée-t-elle :
 - un nouveau champ d'ozone ? réaction *chimique* ? chimie hétérogène ?
 - une nouvelle dynamique ? réaction *atmosphérique* ? circulation méridienne ? ondes planétaires ?

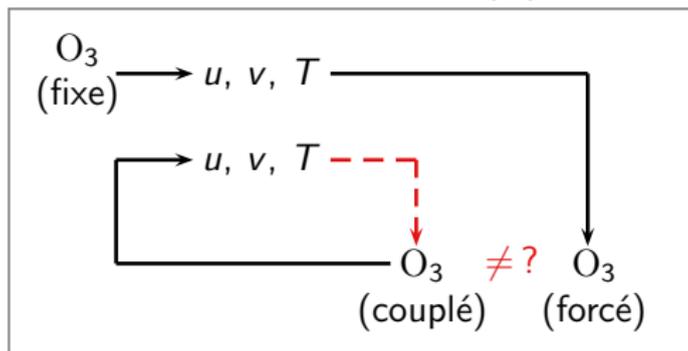
Couplage chimique : interprétation possible (2)

DJF ΔO_3 (ppmv)



- Moins d'ozone en couplé qu'en forcé : mise en place vraisemblable d'une nouvelle circulation.

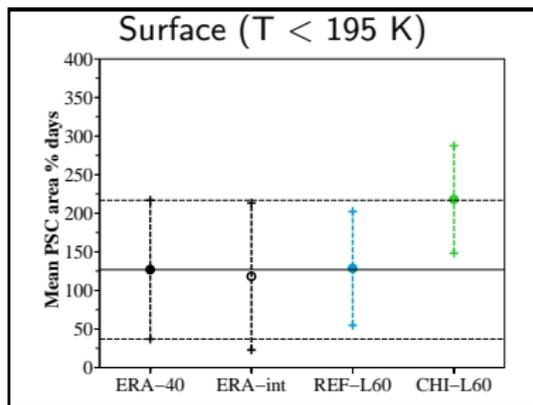
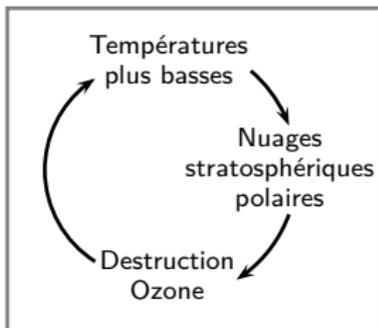
Couplage chimique : méthodologie (3)



- 1 Dans quelle mesure le champ d'ozone simulé par le modèle en forcé est-il différent du champ prescrit ?
- 2 Dans quelle mesure ce champ d'ozone est-il susceptible de modifier la dynamique atmosphérique ?
- 3 Dans quelle mesure cette perturbation crée-t-elle :
 - un nouveau champ d'ozone ? réaction *chimique* ? chimie hétérogène ?
 - une nouvelle dynamique ? réaction *atmosphérique* ? circulation méridienne ? ondes planétaires ?

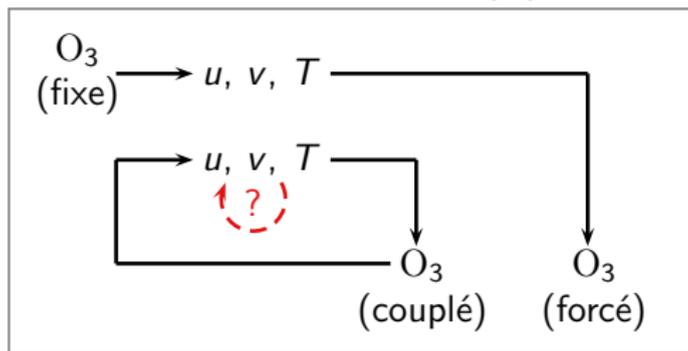
Couplage chimique : interprétation possible (3)

- Température très basses (< 195 K) \triangleright formation de nuages stratosphériques polaires (PSC) et existence d'une chimie **hétérogène** destructrice d'ozone.
- Formation de PSC plus fréquente.



- Boucle de rétroaction positive ?

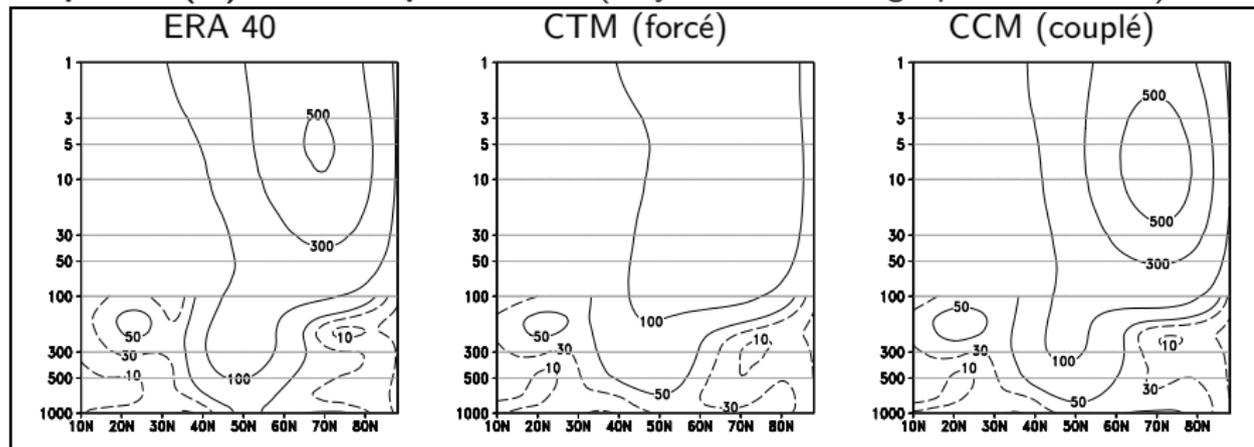
Couplage chimique : méthodologie (4)



- 1 Dans quelle mesure le champ d'ozone simulé par le modèle en forcé est-il différent du champ prescrit ?
- 2 Dans quelle mesure ce champ d'ozone est-il susceptible de modifier la dynamique atmosphérique ?
- 3 Dans quelle mesure cette perturbation crée-t-elle :
 - un nouveau champ d'ozone ? *réaction chimique* ? chimie hétérogène ?
 - une nouvelle dynamique ? *réaction atmosphérique* ? circulation méridienne ? ondes planétaires ?

Couplage chimique : interprétation possible (4)

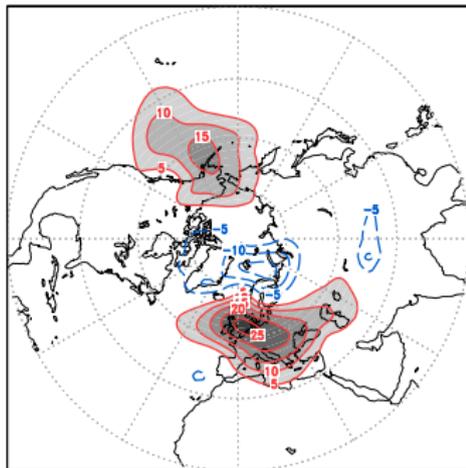
Amplitude (m) de l'onde planétaire 1 (moy. mensuelle du géopotentiel, mars)



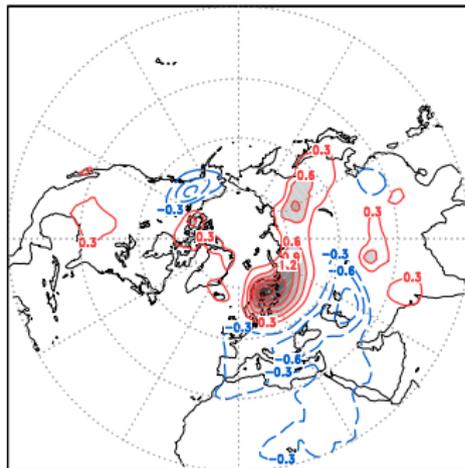
- Modification de la propagation des ondes planétaires : conséquences sur la variabilité stratosphérique et la circulation troposphérique ?

Couplage chimique : intérêt potentiel

Δ DJF Z1000 (CCM - CTM)



Δ DJF T1000 (CCM - CTM)



- Modification de la circulation stratosphérique hivernale \triangleright impact en surface (Boville, 1984 ; Norton, 2003).

Conclusion

- ① **Développement** d'un modèle de chimie-climat.
 - ▷ Numériquement performant (perspective climatique).
 - ▷ Souplesse d'utilisation.
- ② **Évaluation** du modèle.
 - ▷ Validation générale.
 - ▷ Au niveau des meilleurs modèles internationaux.
- ③ **Utilisation potentielle** du modèle.
 - ▷ Mise en évidence d'un rôle notable à travers la mise en place de rétroactions (chimique ou dynamique).
 - ▷ Effets sur le climat de surface ?

Conclusion

Axes de recherche

- 1 **Représenter** les ondes de gravité et en évaluer leur rôle : implémentation réussie d'une paramétrisation d'ondes de gravité non orographiques.
- 2 **Modéliser** les interactions chimie-climat : développement d'un modèle couplé chimie-climat.
- 3 **Explorer** les liens dynamiques entre la stratosphère et la troposphère : expériences idéalisées.

Résultats

- 1 Amélioration sensible du modèle.
- 2 Outil adapté pour l'étude des interactions chimie-climat (rôle notable).
- 3 Confirmation du rôle de la stratosphère équatoriale dans la circulation hivernale de l'hémisphère nord.

Perspectives

- Approfondissement des liens troposphère-stratosphère.
- Modélisation la QBO.
- Étude du rôle des schémas de transport.
- Représentation de la chimie troposphérique.
- Traitement plus réaliste des aérosols.

