

Configuration d'un modèle de climat

$$\begin{aligned} &= \\ &\text{Contenu physique (parameterisations, équations, numérique)} \\ &+ \\ &\text{Configuration de grille} \\ &+ \\ &\text{Ajustement/tuning des paramètres libres} \end{aligned}$$

Tuning/calibration très général en modélisation numérique (ex: modèle épidémiologique)
Spécificités de la modélisation du climat :

1) Incertitude dans le forçage radiatif des nuages ~ dizaines de W/m^2

Sensibilité climatique $\sim 1K/(W/m^2)$

Température globale précise à 1K = chance ou tuning.

Sans doute vrai aussi pour des modèles LES ou CRM

2) Quasi infinité de métriques pertinentes :

rayonnement, dynamique grande échelle, météorologie de surface, polaire/tropicale, océanique/continental, ...

-> Grande place à la subjectivité

Stratégie classique :

Ajuster les paramètres les plus incertains qui impactent le plus le bilan radiatif

En l'occurrence les paramètres nuageux (Hourdin et al., 2017, BAMS)

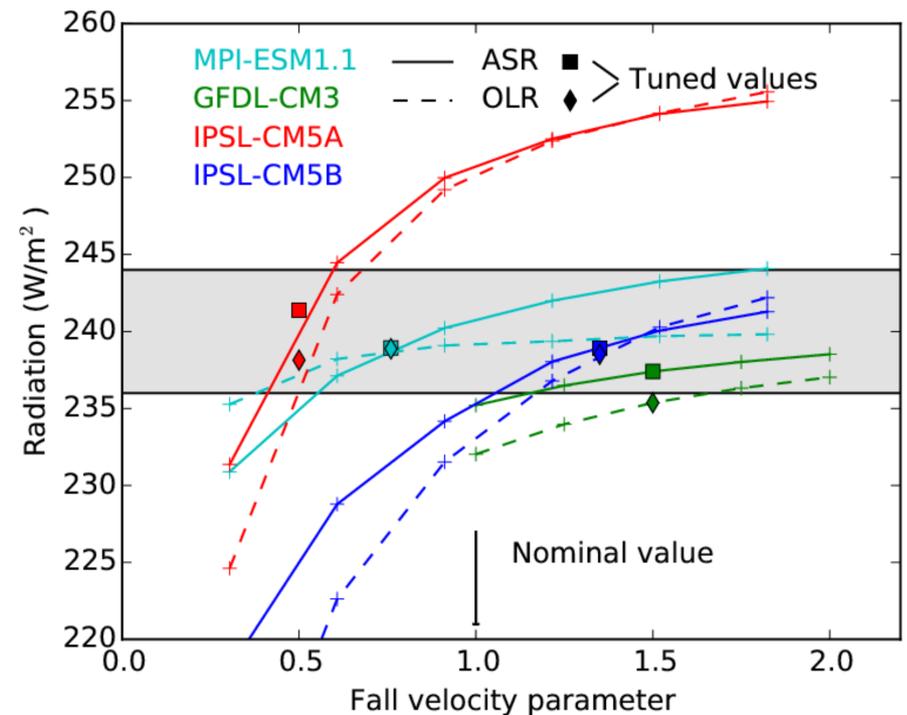
Hourdin et al., 2017,

The art and science of climate model tuning, BAMS, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00135.1>

Impact sur les flux globaux au sommet

— Rayonnement SW absorbé

- - - Rayonnement LW sortant

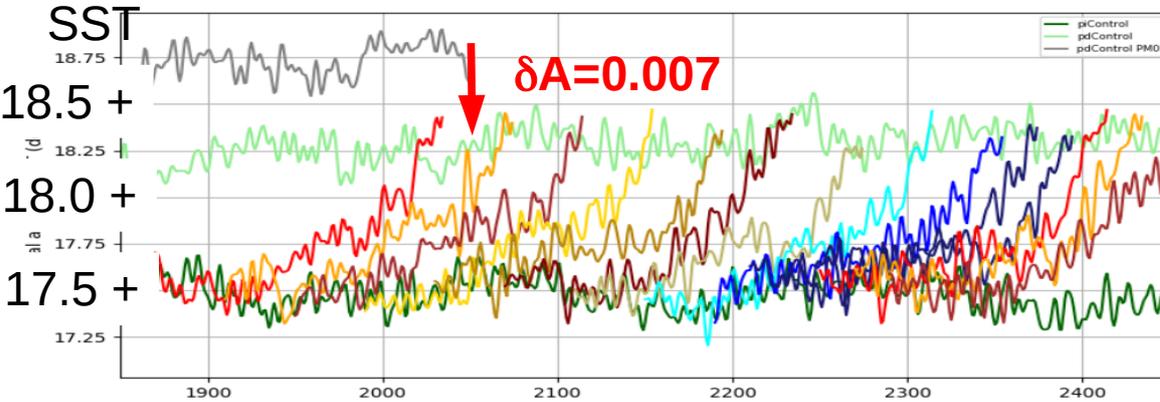


Stratégie de tuning apprise pendant la mise au point de IPSL-CM6 et éprouvée avec le projet QUEST (1/2)

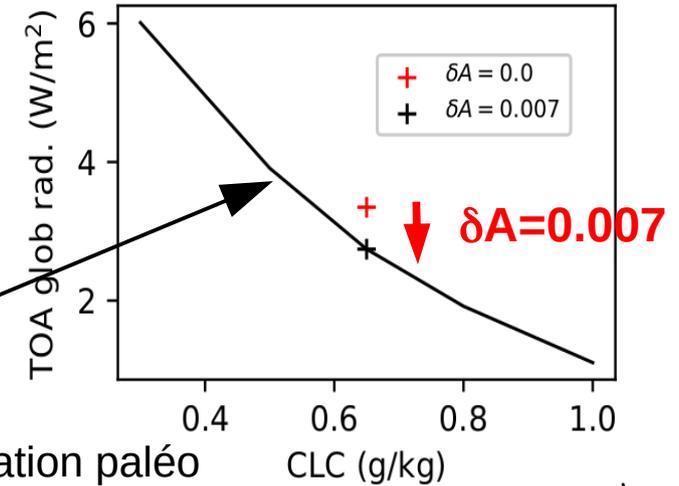
1) Ajustement de simulations present-day (pd) « à l'équilibre »

= forçage actuel + off-set de 0.007 sur l'albedo océanique pour compenser le « heat uptake »

Vérification a posteriori : pd ~ ensemble d' « historiques » sur la période récente



Flux net Top Of Atmosphere



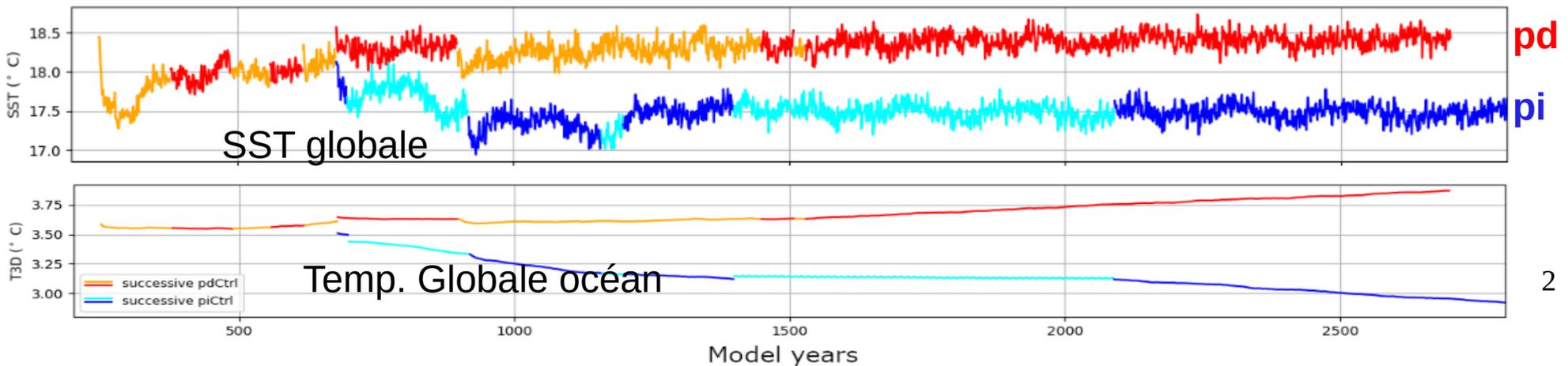
2) Mise en machine de couples pd/pi assez tôt

ajuster l'océan profond dans le contrôle pré-industriel (pi) ou simulation paléo

3) Réglage de la température globale à 0.2 ~K près (\Leftrightarrow ~0.2 W/m² près en Atmosph. forcée)

Mise à disposition d'abaques par rapport à un dernier paramètre de réglage.

Utilisation en pratique d'une cible SST 50S-50N pour séparerréglage global et réglage de la banquise.



Stratégie de tuning apprise pendant la mise au point de IPSL-CM6 et éprouvée avec le projet QUEST (2/2)

4) Re-réglage systématique des forçages radiatifs des nuages (répartition SW/LW et spatio-temporelle) en cas de changement important de contenu physique du modèle, visant en priorité la réduction des grands biais de SST (biais chauds de bords Est et circum Antartique)

Hourdin et al., 2020, Convective boundary layer control of the sea surface temperature in the Tropics, James
<https://doi.org/10.1029/2019MS001988>

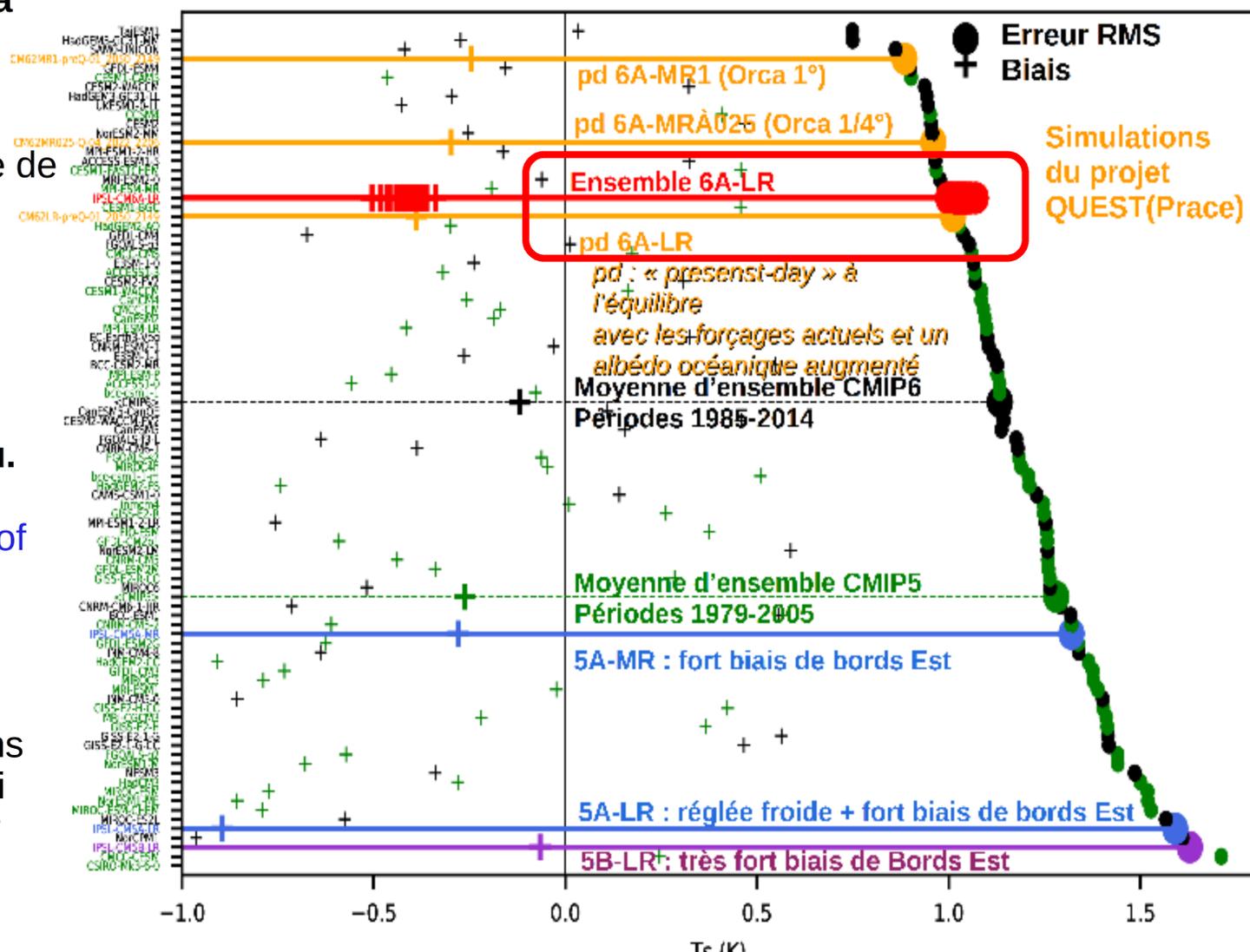
5) Réglage des paramètres de la banquise pour compenser possiblement des erreurs atmosphériques (rayonnement, turbulence, advection), du modèle de glace, de la turbulence sous la glace ... manque d'obs.

Réussi : un modèle plutôt bien réglé (SST, rayonnement banquise) avec une stratégie bien établie et publiée sous peu.
 Mignot et al., 2020, The development and tuning strategy of IPSL-CM6A-LR, en révision pour James

Mais ...
L'AMOC a fait des va-et-vient sans qu'on sache bien encore pourquoi
Variabilité tropicale à retravailler

Trop « manuel »

Erreurs sur le cycle saisonnier moyen des SSTs (35S-35N)



Et maintenant : approches d'apprentissage machine pour l'aide au tuning

Issues de la communauté de la Quantification des incertitudes.

Formalisation du problème

P paramètres à régler, dans des bornes $[p_{1,\min}, p_{1,\max}] \times [p_{2,\min}, p_{2,\max}] \times \dots$

M métriques, m_1, \dots, m_M avec des observations o_1, \dots, o_M et erreurs d'obs $\sigma_1, \dots, \sigma_M$

Exploration de l'espace (hyper-cube) de dimension P,

1) tirage au hasard de $N \sim 10 \times P$ vecteurs $(p_1, p_2, \dots, p_P)_n$

2) Réalisation de N simulations avec le GCM

3) Calcul des $N \times M$ métriques

4) Pour chaque métrique, construction d'un méta modèle, émulateur, « surrogate » donnant pour chaque valeur possible des paramètres une estimation (espérance d'un opérateur statistique avec une barre d'erreur de reconstruction). Basé sur les Processus Gaussiens

Réduction de l'espace des paramètres par « history matching/ iterative refocusing »

1) On réduit l'espace des paramètres en éliminant les régions où la métrique émulée est trop loin des obs/cibles, en tenant compte des différentes sources d'erreur, a) erreur d'observation, b) erreur de l'émulateur (on n'a pas sondé partout) et c) une « tolérance à l'erreur » tenant compte de l'erreur structurelle du modèle (inconnue) pour éviter les compensations d'erreur.

2) On peut itérer pour réduire l'espace « Not Ruled Out Yet » en refaisant un tirage de $10 \times P$ simulations, uniquement dans l'espace NROY déjà déterminé.

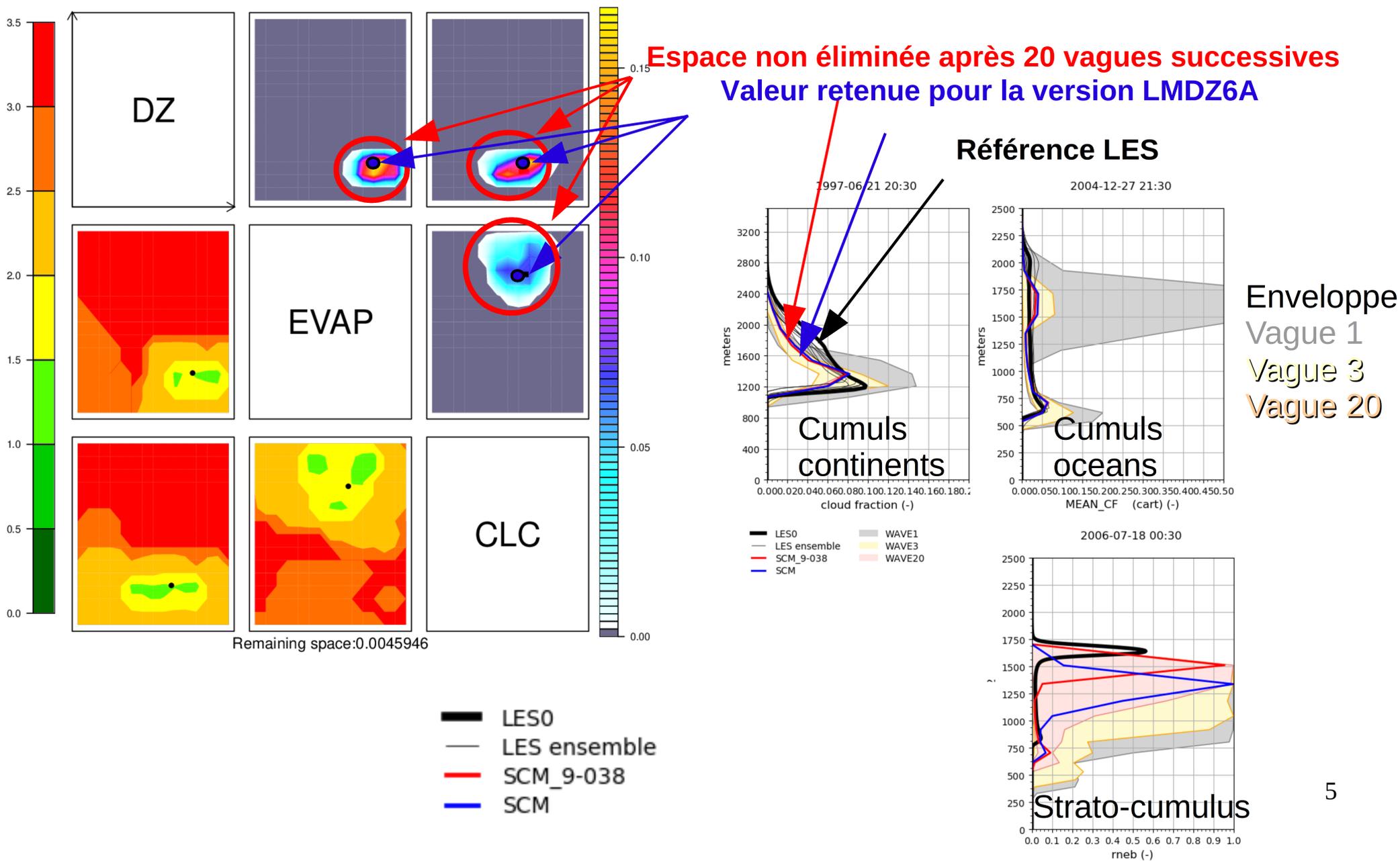
On a donc de plus en plus de « sondages » réels au fur et à mesure de « vagues » successives.

Couvreux et al., 2020 : Process-based climate model development harnessing machine learning: I. a calibration tool for parameterization improvement, Accepté par James

Hourdin et al., 2020 : Process-based climate model development harnessing machine learning: II. model calibration from single column to global, Accepté par James

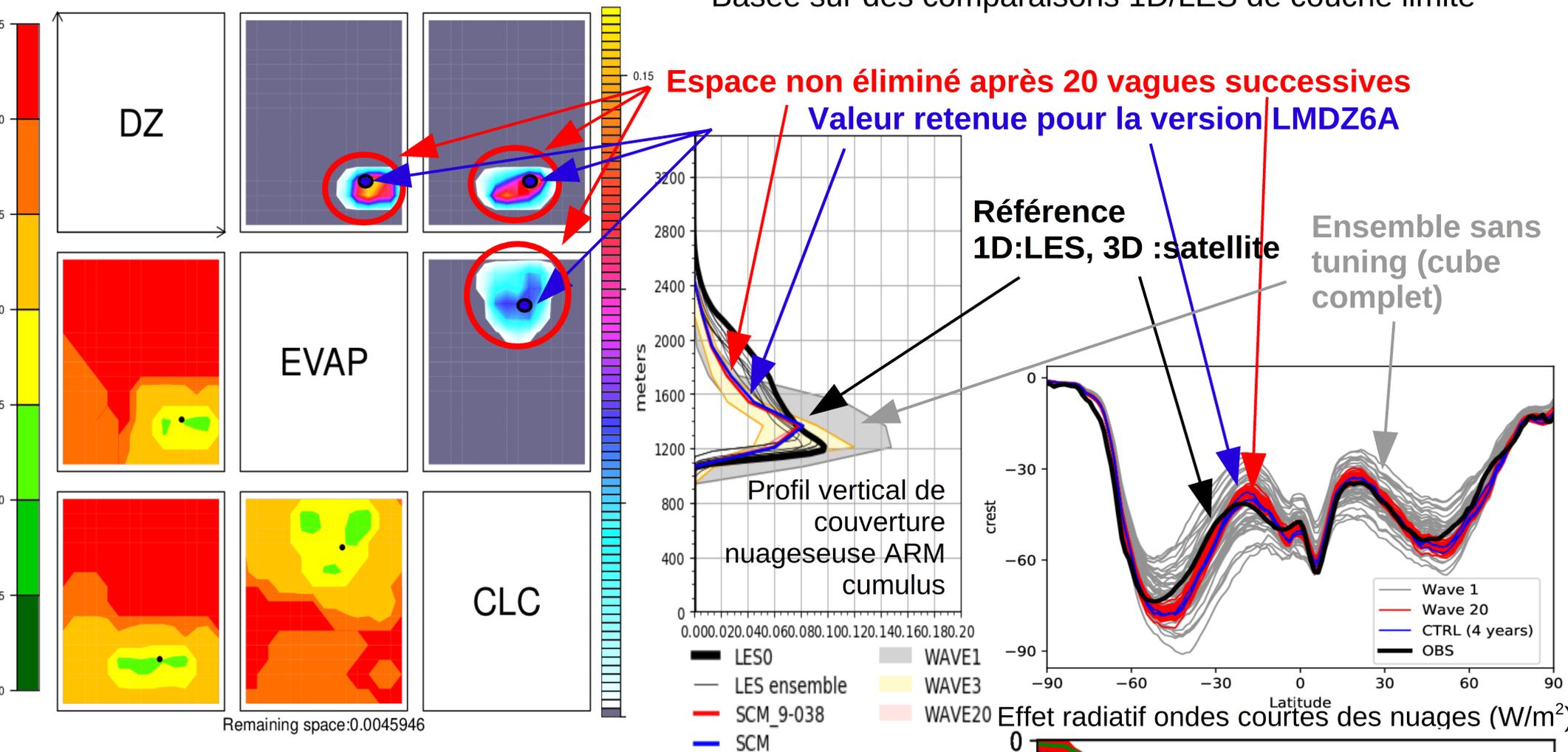
Exemple : revisite du tuning de IPSL-CM6A-LR sur des cas 1D par comparaison aux LES

En n'autorisant à varier que 3 paramètres, on retrouve les valeurs des paramètres retenues pour CMIP6, en 20 vagues en 1D sur quelques cas de nuages par comparaison à des LES



Revisite du tuning manuel de LMDZ6A :

Exemple de réduction de l'espace des paramètres
Basée sur des comparaisons 1D/LES de couche limite



Conclusion : Le tuning SCM LES permet

- 1/ de choisir des paramètres garantissant une bonne simulation des scènes nuageuses
- 2/ d'ajuster en partie les effets radiatifs des nuages.
- 3/ Peut être utilisé pour pré-conditionner un tuning 3D

→ Exposé Sébastien

L'outil est là. On apprend à l'utiliser.

« Proof of Concept » 1D + 3D [Hourdin et al. 2020](#)

En cours :

1) Intégration d'une simulation globale moyenne résolution (256x256x79) basée sur un tuning automatique présenté aux AMAs en 2018 (QUEST)

2) Réglage de plusieurs versions (presque) aussi bien réglées que IPSL-CM6A-LR mais avec des ECS contrastés (QUEST) : on réduit le NROY (avec 2 vagues basées sur 250 simulations atmosphériques de 2 ans et utilisation de ~ 15 métriques radiatives + précip).

Dans le NROY, on fait des expériences forcées SST clim et SST + 4K → ECS forts/faibles
Redécouverte de la nécessité de re-régler la banquise et du peu de contrôle sur l'AMOC

3) Réglage d'une configuration très basse résolution pour le paléo avec la même approche. Avec exploration de mondes différent en 3D avec des comportement différents de la convection ; échec de l'utilisation du 1D pour la convection profonde mettant en évidence une limite des paramétrisations.

4) reprise du travail sur les paramétrisations en mode 1D/LES grâce à la capacité à séparer contenu des paramétrisation (forme fonctionnelle des paramétrisations) de l'ajustement des paramètres.

On n'a pas et on ne souhaite **pas un outil de tuning automatique.**

L'outil permet d' « **objectiver** » le caractère nécessairement **subjectif du tuning**

Il permet de **se doter de stratégie plus efficace, en grande partie à définir et affiner**

L'outil fait réaliser l'importance de bien définir les métriques

Enjeux pour ICMC

Construire et s'approprier la méthodologie.

Un nouvel horizon qui s'ouvre.

L'appropriation technique va de paire avec une pensée de la modélisation du climat à tous les niveaux.

Penser des outils pour les grands ensembles.

Appliquer à des hiérarchies de modèles : 1D, zoomé/guidé/climatique, basse/haute résolution, couplé/forcé.

Sur un tirage de 300 jeux de 30 paramètres, on peut calculer un NROY qui tienne compte simultanément de métriques sur des simulations réalisées dans plusieurs configurations. Le coup est donné essentiellement par le coup individuel de la simulation la plus coûteuse x ~300 x quelques vagues. Problème spécifique posé par l'ajustement des constantes de temps longues.

Travaille et formulation du transfert entre configurations :

Quelles métriques en Atm forcé pour corriger les biais du couplé ?

Quelles métriques dépendent de la résolution et comment ?

Utilisation de la hiérarchie de configuration pour s'assurer que les bons comportements ne sont pas (trop) obtenus par compensation d'erreur.