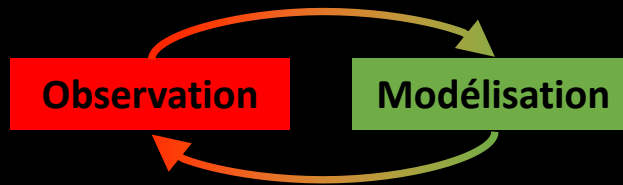


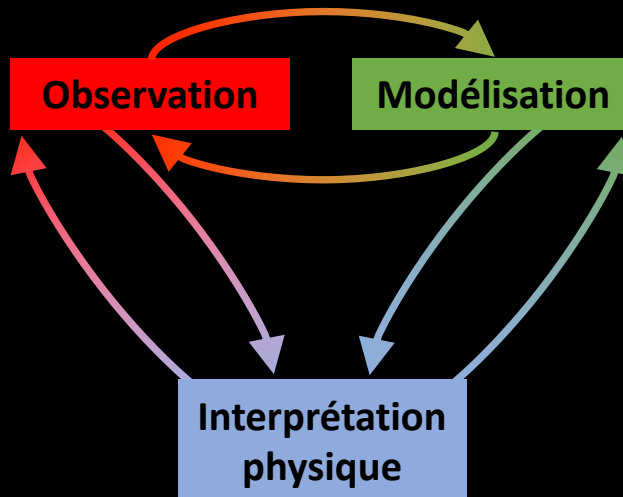
Observations et modélisation physique de l'océan : état des lieux et perspectives

Thierry Penduff
CNRS, IGE Grenoble



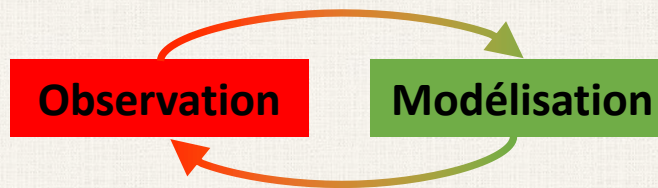
Observations et modélisation physique de l'océan : état des lieux et perspectives

Thierry Penduff
CNRS, IGE Grenoble



Evaluer les modèles

Guider les modèles



**Contextualiser, interpréter les
observations**

**Interpoler, extrapoler les
observations**

Jusqu'aujourd'hui

Biais=f(x,y,z,t)

Ajuster X_0 , F(t)

"Jumeau numérique"
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

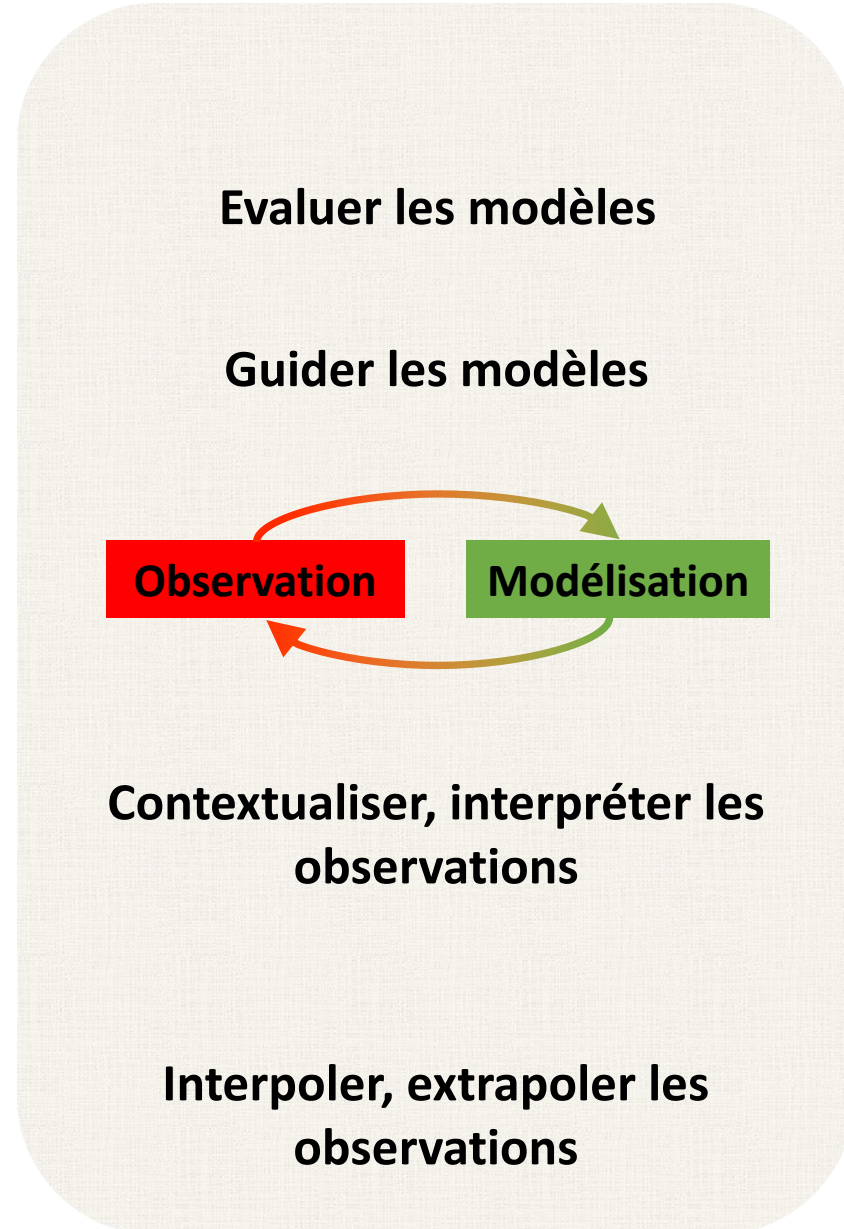
Plus récemment

Biais(x,y,z,t,état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL



Jusqu'aujourd'hui

Biais=f(x,y,z,t)

Ajuster X_0 , F(t)

"Jumeau numérique"

Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

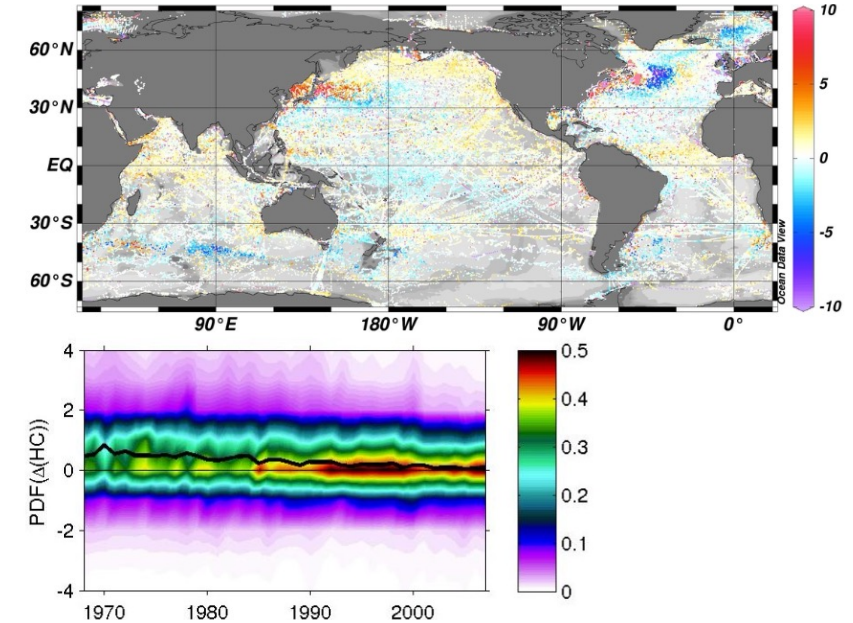
Evaluer les modèles

$$\text{Biais}=f(x,y,z,t)$$

NEMO 1/4° (DRAKKAR) colocalisé sur profils EN3.

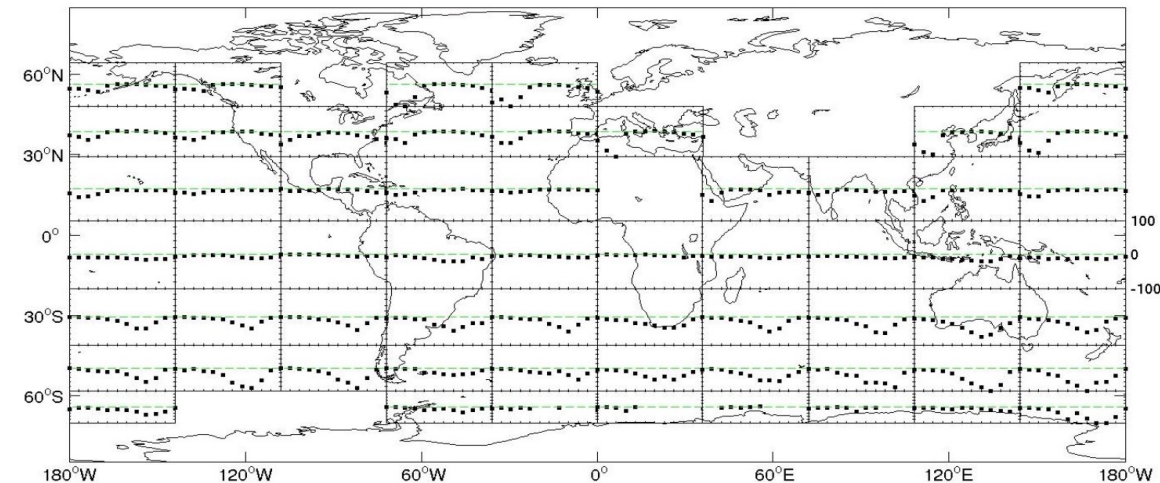
[Juza, 2011](#)

Différences locales et instantanées entre les contenus thermiques colocalisés (simulés – observés) sur la couche 10-300m et la période 2000–2004. En GJ/m^2 .



Evolution interannuelle de la PDF de ces différences à l'échelle globale. En GJ/m^2 .

Evolution mensuelle des différences régionales de MLD colocalisées (simulées – observées) sur la période 2002-2006. En m.



Jusqu'aujourd'hui

Biais= $f(x,y,z,t)$

Ajuster X_0 , $F(t)$

"Jumeau numérique"
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

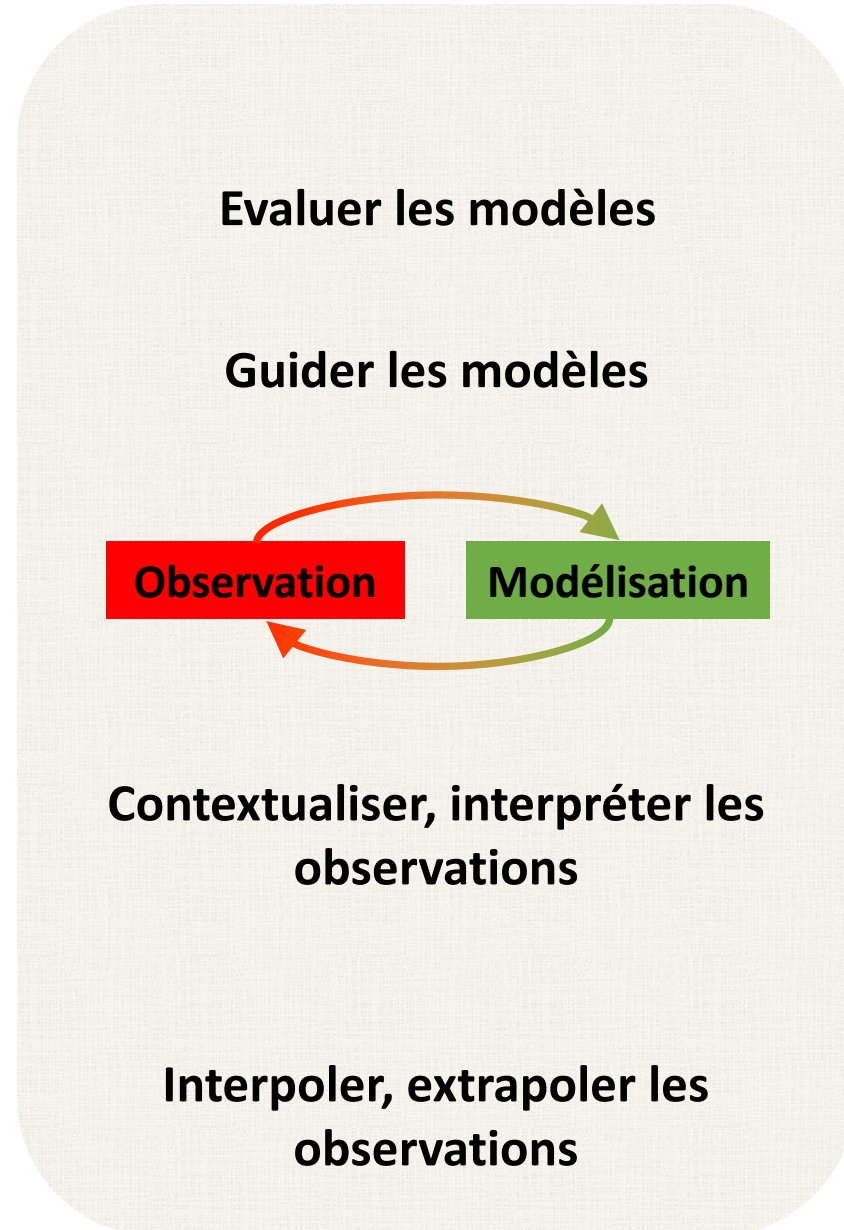
Plus récemment

Biais(x,y,z,t,état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL



Evaluer les modèles

Biais= $\langle f(x,y,z,t, \text{état initial}) \rangle$

Ensemble OCCIPUT : 50 membres NEMO global $\frac{1}{4}^\circ$ avec même physique et même forçage sur 56 ans, mais petites perturbations initiales.

Non-linéarités océaniques \rightarrow amplifient perturbations initiales \rightarrow qui cascaded vers les grandes échelles

Volume de STMW en Atlantique Nord dans ARMOR3D (couleurs) et dans OCCIPUT (gris).

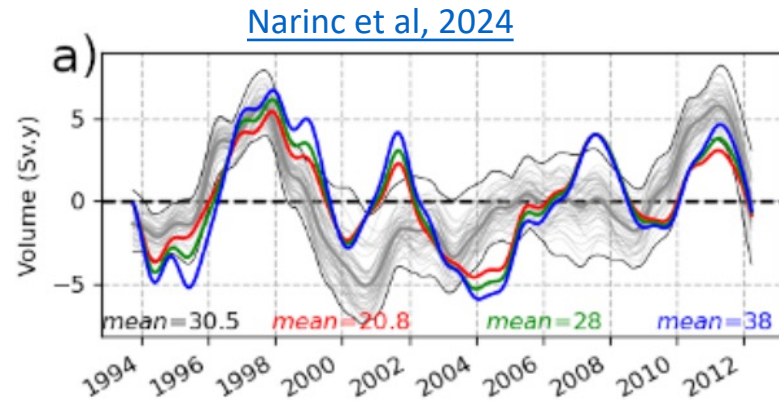
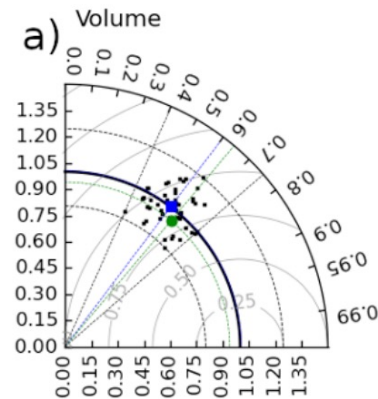


Diagramme de Taylor sur le volume de STMW : les points noirs montrent la disparité importante de la performance des 50 membres au regard d'ARMOR3D (corrélation mutuelle, et amplitude de la variabilité interannuelle).



\rightarrow Evaluation robuste d'un modèle : obs + ensemble + diags probabilistes

Plus récemment

Biais(x,y,z,t,état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL

Jusqu'aujourd'hui

Biais= $f(x,y,z,t)$

Ajuster X_0 , $F(t)$

"Jumeau numérique"
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

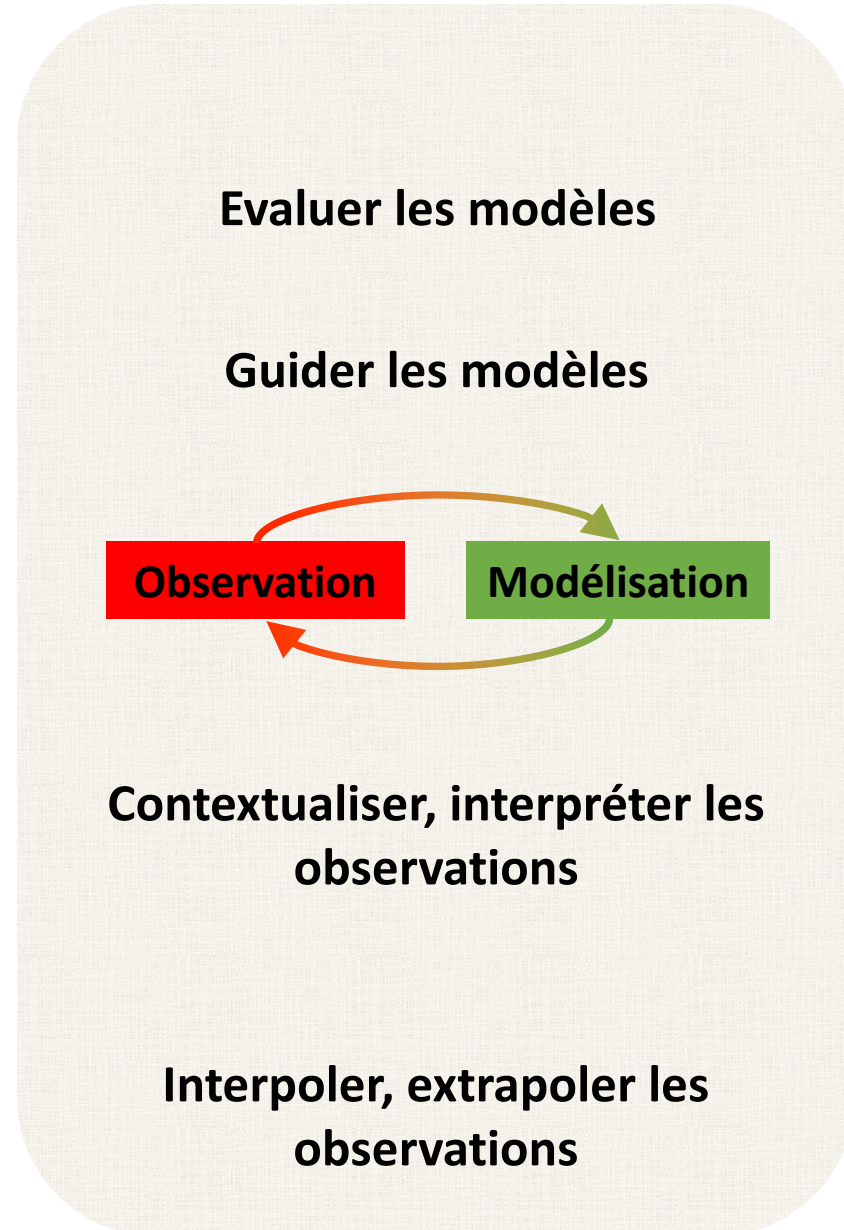
Plus récemment

Biais(x,y,z,t ,état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL



Jusqu'aujourd'hui

Biais= $f(x,y,z,t)$

Ajuster X_0 , $F(t)$

"Jumeau numérique"

Attribution variabilité observée

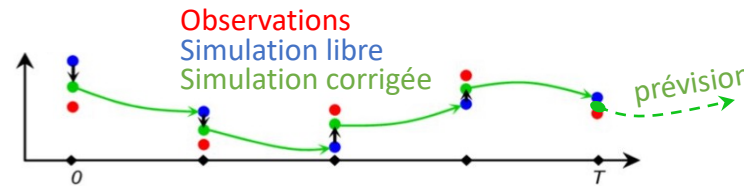
Analyses, réanalyses


Guider les modèles

Ajuster l'état initial (voire le forçage) de modèles pour réduire écart aux obs.

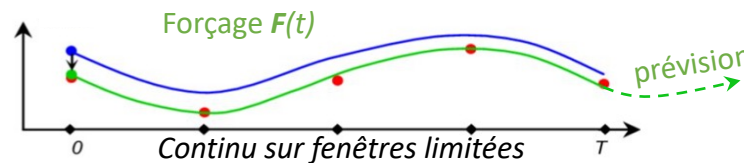
Applications principales :
Réanalyses, prévision opérationnelle

Assimilation
Séquentielle :
Corrections
successives $X_i(t)$



OGCM + KF/enKF/...
+ stats d'erreurs

↓
Incertitudes en sortie

Assimilation
Variationnelle :
Correction $X(t=0)$ et
du forçage $F(t)$ sur $0, T$



OGCM + modèle adjoint
+ stats d'erreurs

↓
Incertitudes en sortie

Il existe de nombreuses variantes de ces méthodes
Elles sont employées avec de nombreux OGCMs

Question : OGCM complet suffisamment contrôlable par obs disponibles ?

Jusqu'aujourd'hui

Biais= $f(x,y,z,t)$

Ajuster X_0 , $F(t)$

"Jumeau numérique"
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

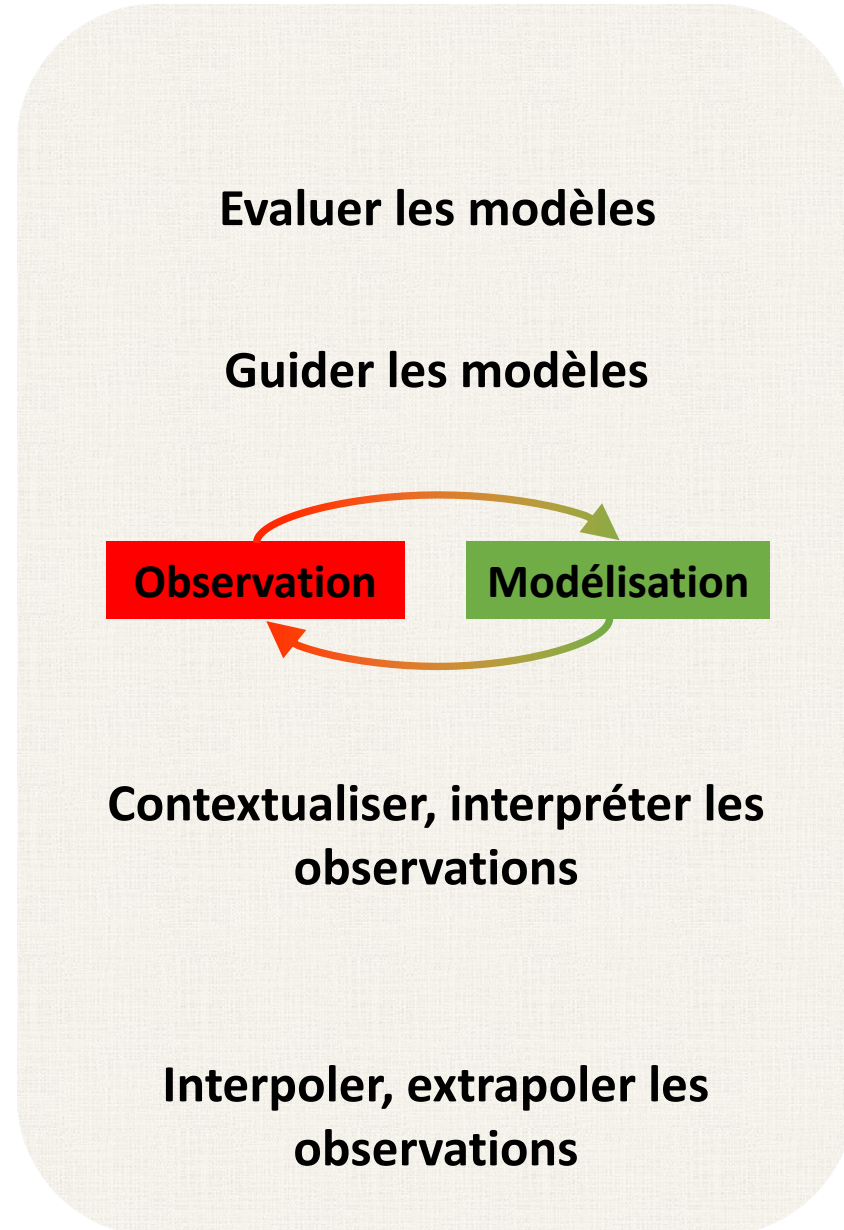
Plus récemment

Biais(x,y,z,t , état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL



Découplage simu./assim

[Popov et al, 2024](#)

Simulation (ensembliste) libre, puis conditionnement aux obs.

Monte Carlo Markov Chain

$$p^a(\mathbf{x}) = p[\mathbf{x}|\mathbf{y}^o] \propto p^b(\mathbf{x}) p[\mathbf{y}^o|\mathcal{H}(\mathbf{x})]$$

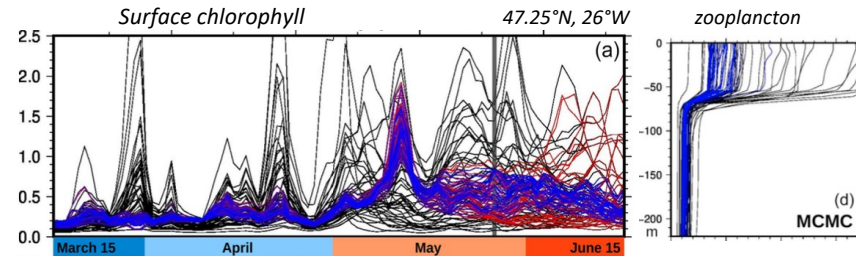
NEMO/PISCES contraint par obs satellite de Chla

Découplage

- 1) Ne contraindre que les variables contrôlables
- 2) Ne pas redémarrer le modèle après analyses

Ensembliste :

Statistiques a posteriori comparables aux obs.



Plus récemment

Biais(x,y,z,t,état initial)

Découplage simulation-assimilation

Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT

Sans modèle : DL

Découplage simu./assim

Popov et al, 2024

Simulation (ensembliste) libre, puis conditionnement aux obs.

Monte Carlo Markov Chain

$$p^a(x) = p[x|y^o] \propto p^b(x) p[y^o|\mathcal{H}(x)]$$

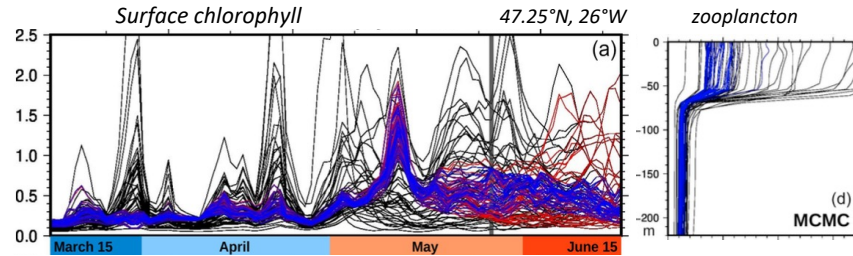
NEMO/PISCES contraint par obs satellite de Chla

Découplage

- 1) Ne contraindre que les variables contrôlables
- 2) Ne pas redémarrer le modèle après analyses

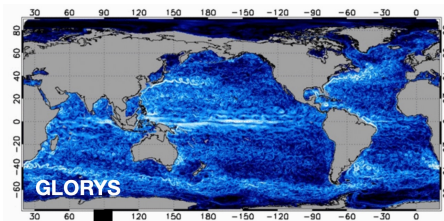
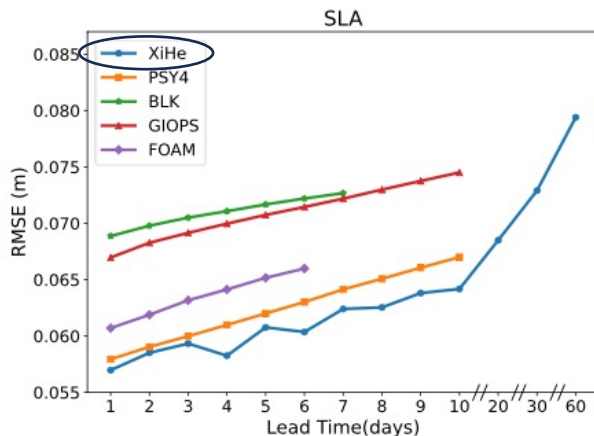
Ensembliste :

Statistiques a posteriori comparables aux obs.

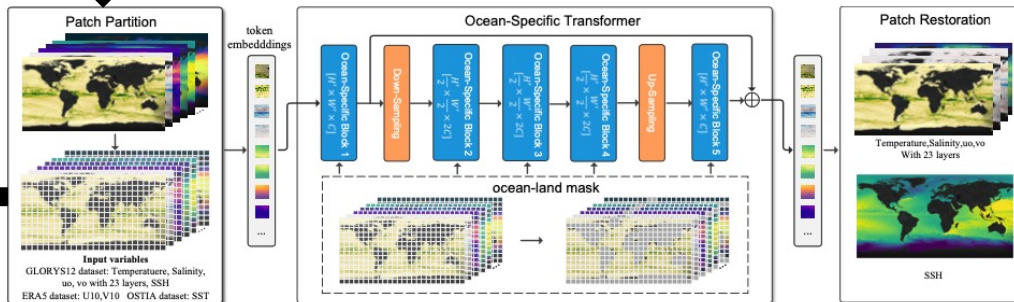


Prévisions basées IA

Wang et al, 2024



- 😊 : Skill amélioré, cout ÷ 1000
- ❓ : Explicabilité, quid sans GLORYS ?



Plus récemment

Biais(x,y,z,t,état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL

Jusqu'aujourd'hui

Biais= $f(x,y,z,t)$

Ajuster X_0 , $F(t)$

"Jumeau numérique"
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

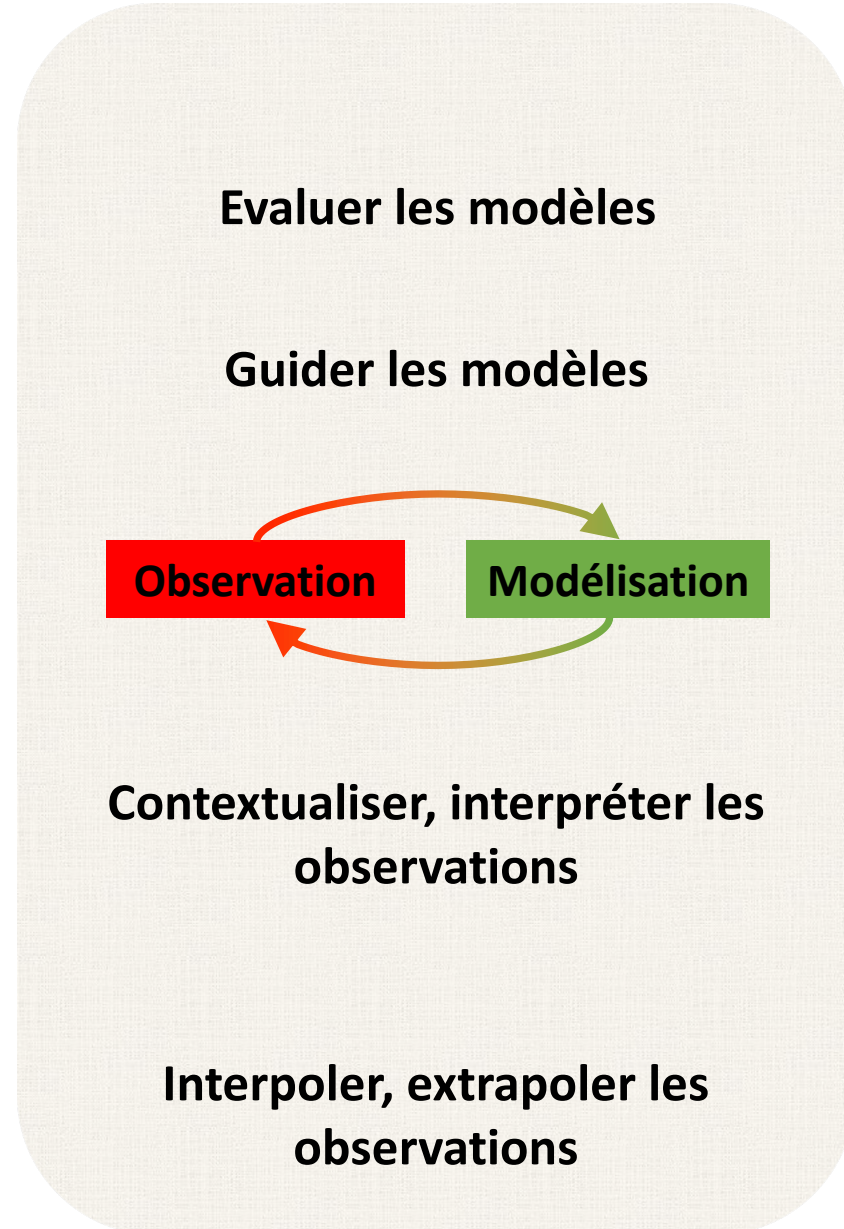
Plus récemment

Biais(x,y,z,t , état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL



Jusqu'aujourd'hui

Biais=f(x,y,z,t)

Ajuster X_0 , F(t)

"Jumeau numérique"

Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

Contextualiser, interpréter les observations

« Jumeau numérique » vintage

[de Miranda et al, 1999](#)

Anticyclone de Zapiola. Des simulations SPEM 1/3° :

- ont contextualisé en multivarié 3D des obs.

indirectes de courant profond à 45°S (*Sanders & King, 1995*) et d'EKE T/P.

- ont donné un fort crédit à l'explication de *Dewar (1998)* sur la dynamique non-linéaire de cet anticyclone persistant

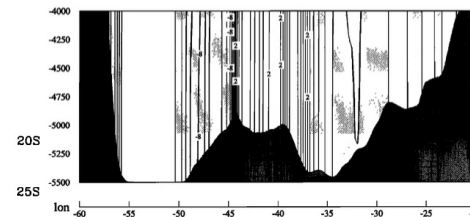
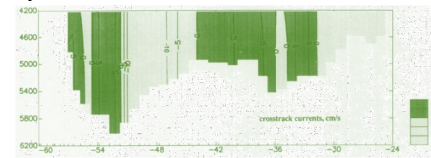
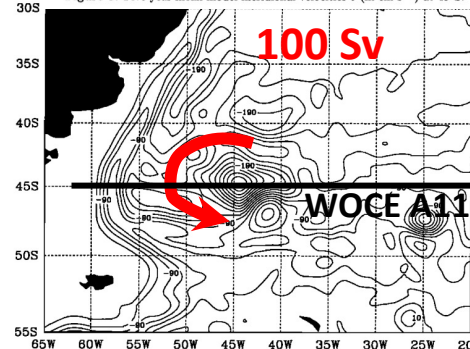


Figure 5. Five year mean model meridional velocities v (in cm s^{-1}) at 45°S.



Jusqu'aujourd'hui

Biais=f(x,y,z,t)

Ajuster X_0 , F(t)

"Jumeau numérique"

Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

Contextualiser, interpréter les observations

« Jumeau numérique » vintage
[de Miranda et al, 1999](#)

Anticyclone de Zapiola. Des simulations SPEM 1/3° :
- ont contextualisé en multivarié 3D des obs. indirectes de courant profond à 45°S ([Sanders & King, 1995](#)) et d'EKE T/P.
- ont donné un fort crédit à l'explication de [Dewar \(1998\)](#) sur la dynamique non-linéaire de cet anticyclone persistant

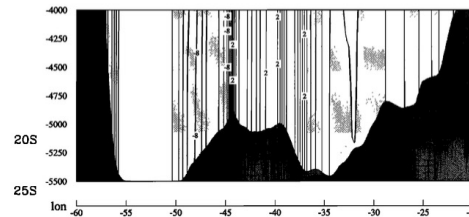
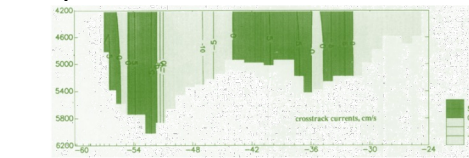
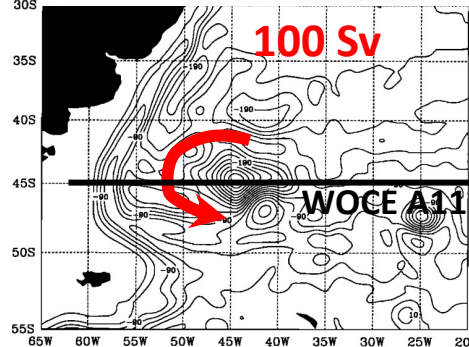
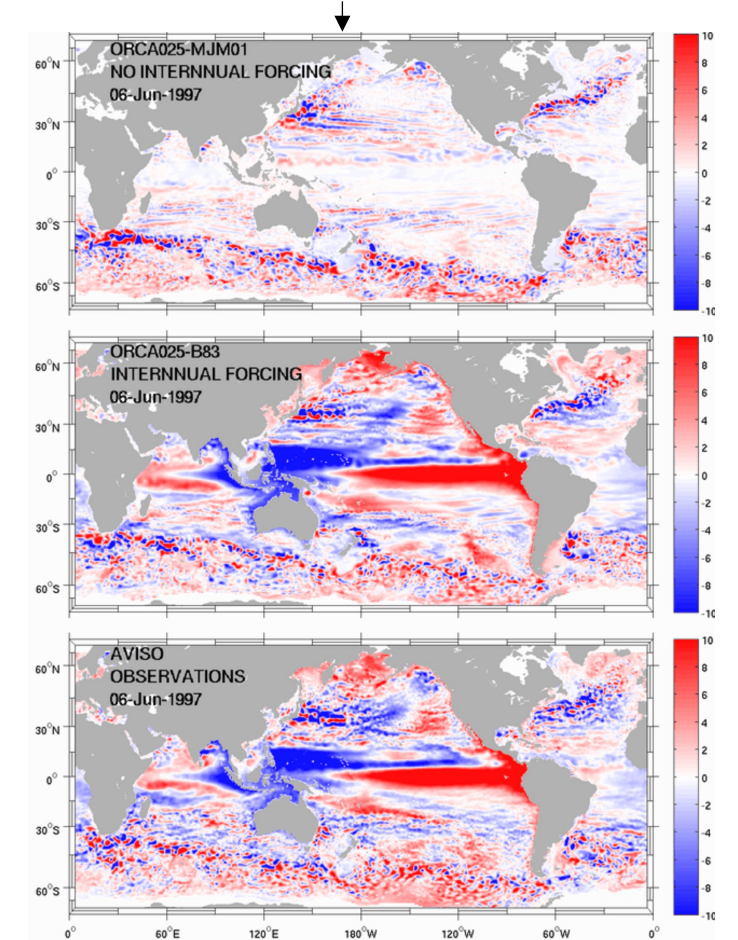


Figure 5. Five year mean model meridional velocities v (in cm s^{-1}) at 45°S.



Attribution de la variabilité observée
[Penduff et al, 2011](#)

Variabilité intrinsèque. Des simulations NEMO 1/4° ont montré l'origine **intrinsèque** d'une grande part de la **variabilité interannuelle de SLA**



Jusqu'aujourd'hui

Biais= $f(x,y,z,t)$

Ajuster X_0 , $F(t)$

"Jumeau numérique"
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

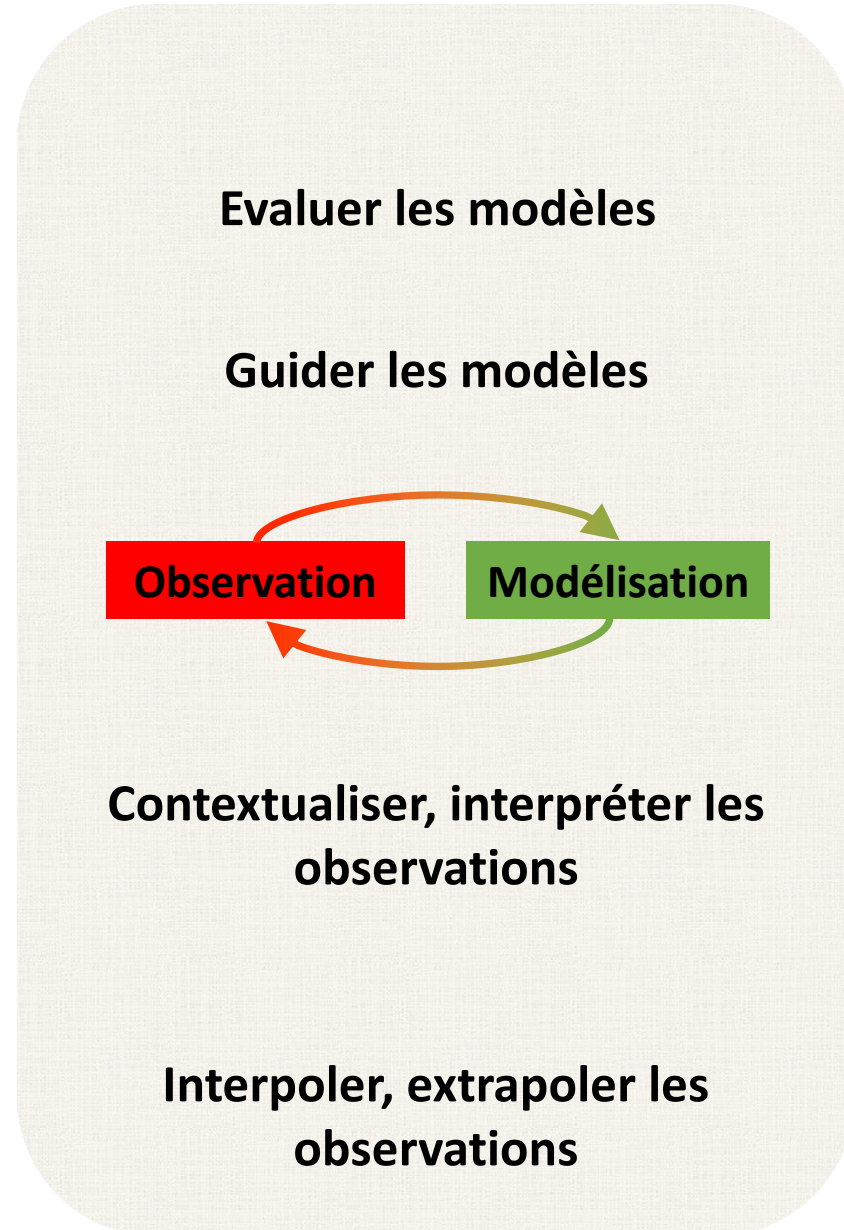
Plus récemment

Biais(x,y,z,t , état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL



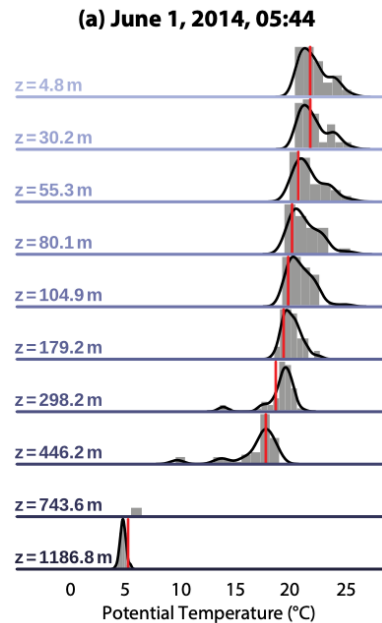
Contextualiser, interpréter les observations

Représentativité des observations

La **variabilité intrinsèque** affecte simul et obs [de la mésoéchelle à plusieurs décennies / milliers de kms].
Sa **phase aléatoire** modère localement la représentativité des obs (i.e. leur caractère déterministe).

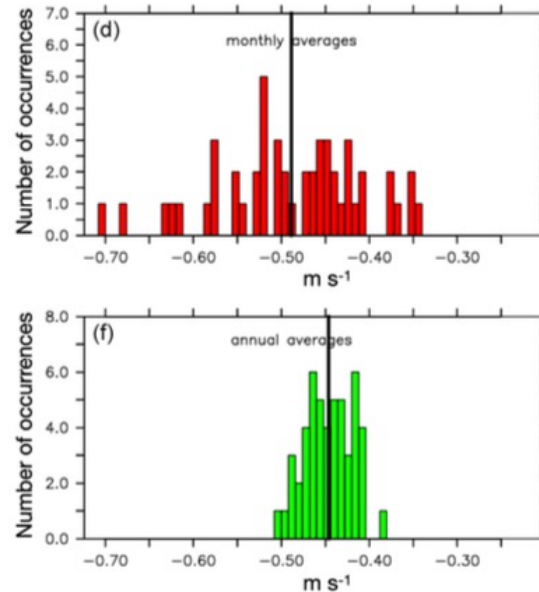
[Penduff et al, 2018](#)

Profil T(z) instantané dans le Gulf Stream :
Argo et PDF ensembliste au même endroit/instant



[Cravatte et al, 2021](#)

PDF ensembliste des vitesses
méridiennes en moyenne **mensuelle** et
annuelle dans le courant Est Australien



➔ Les observations sont inestimables, mais leur part aléatoire doit être considérée

Plus récemment

Biais(x,y,z,t,état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL

Jusqu'aujourd'hui

Biais= $f(x,y,z,t)$

Ajuster X_0 , $F(t)$

"Jumeau numérique"
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

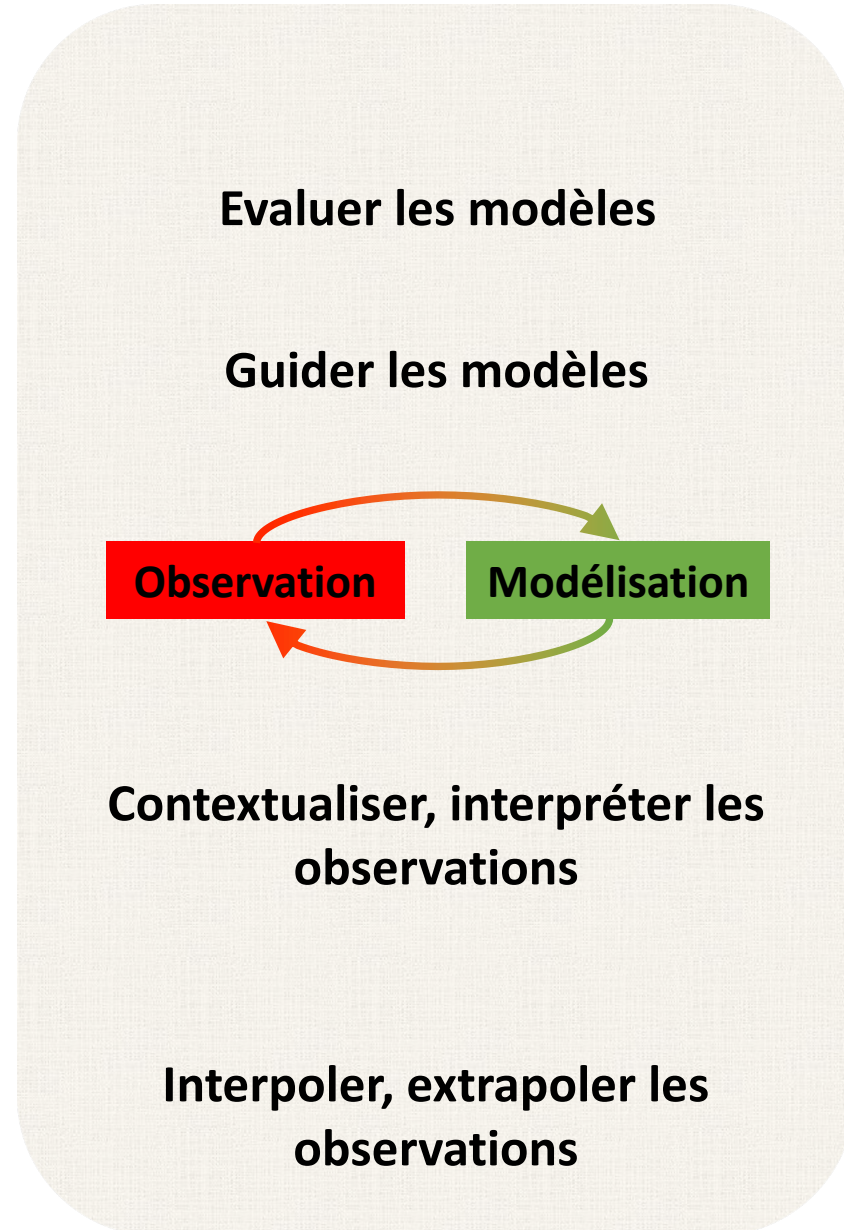
Plus récemment

Biais(x,y,z,t , état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL



Jusqu'aujourd'hui

Biais=f(x,y,z,t)

Ajuster X_0 , F(t)

"Jumeau numérique"

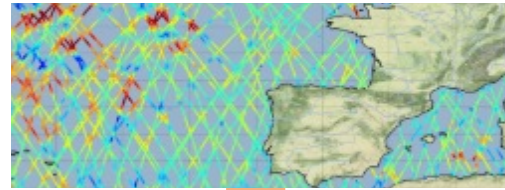
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

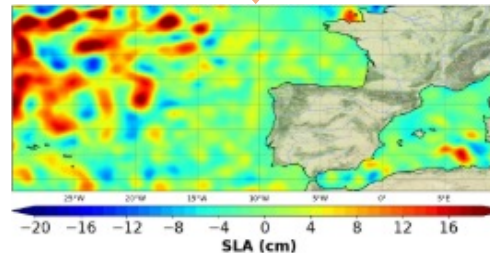
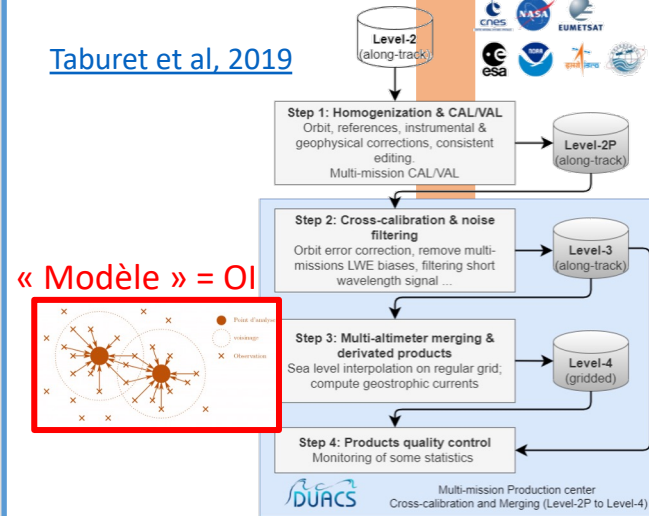
Interpoler, extrapoler les observations

Analyses par interpolation optimale (OI)

Ex : Traces altimètres → DUACS → cartes SSH(x,y,t)



Taburet et al, 2019



Jusqu'aujourd'hui

Biais=f(x,y,z,t)

Ajuster X₀, F(t)

"Jumeau numérique"

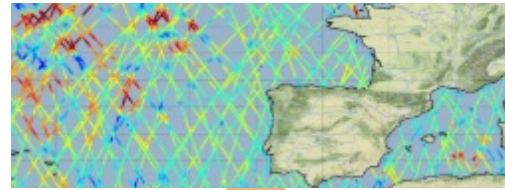
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

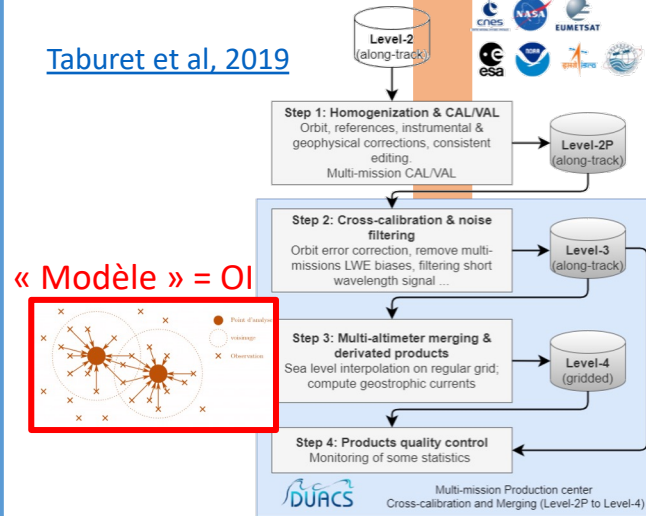
Interpoler, extrapoler les observations

Analyses par interpolation optimale (OI)

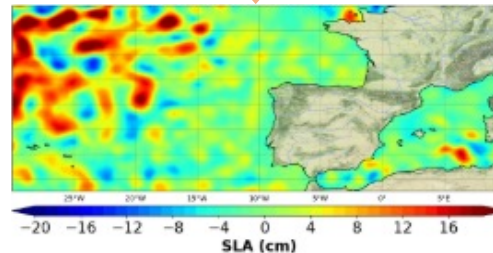
Ex : Traces altimètres → DUACS → cartes SSH(x,y,t)



Taburet et al, 2019

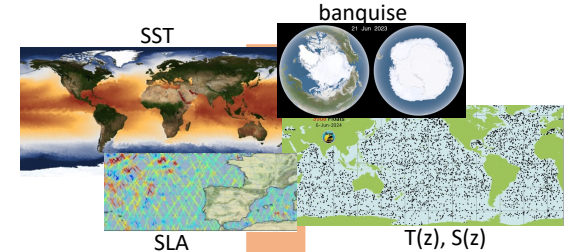


« Modèle » = OI



Réanalyses via OGCMs

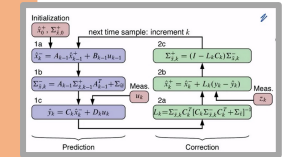
Obs sat & insitu → OGCM → u,v,T,S...(x,y,z,t)



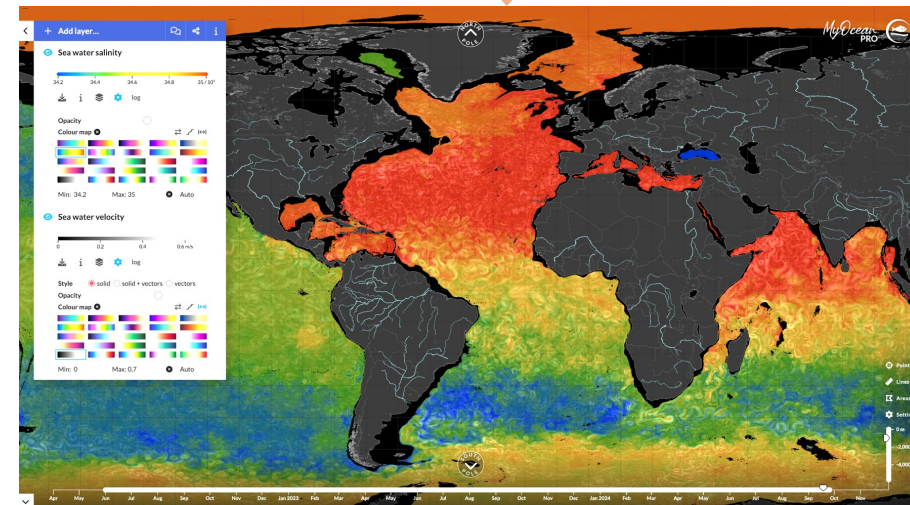
Modèle = OGCM

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u - f v &= -\frac{1}{\rho_0} p_x + \nu \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \nabla v + f u &= -\frac{1}{\rho_0} p_y + \nu \nabla^2 v \\ p_x &= -\rho g \\ u_x + v_y + w_z &= 0 \\ T_t + u \nabla T &= K \nabla^2 T + Sources \\ S_t + u \nabla S &= K \nabla^2 S + Sources \\ \rho &= \rho(T, S, p) \end{aligned}$$

Assimilation



S, |u| @ 1000m, 18/09/2024



Jusqu'aujourd'hui

Biais= $f(x,y,z,t)$

Ajuster X_0 , $F(t)$

"Jumeau numérique"
Attribution variabilité observée

Analyses, réanalyses

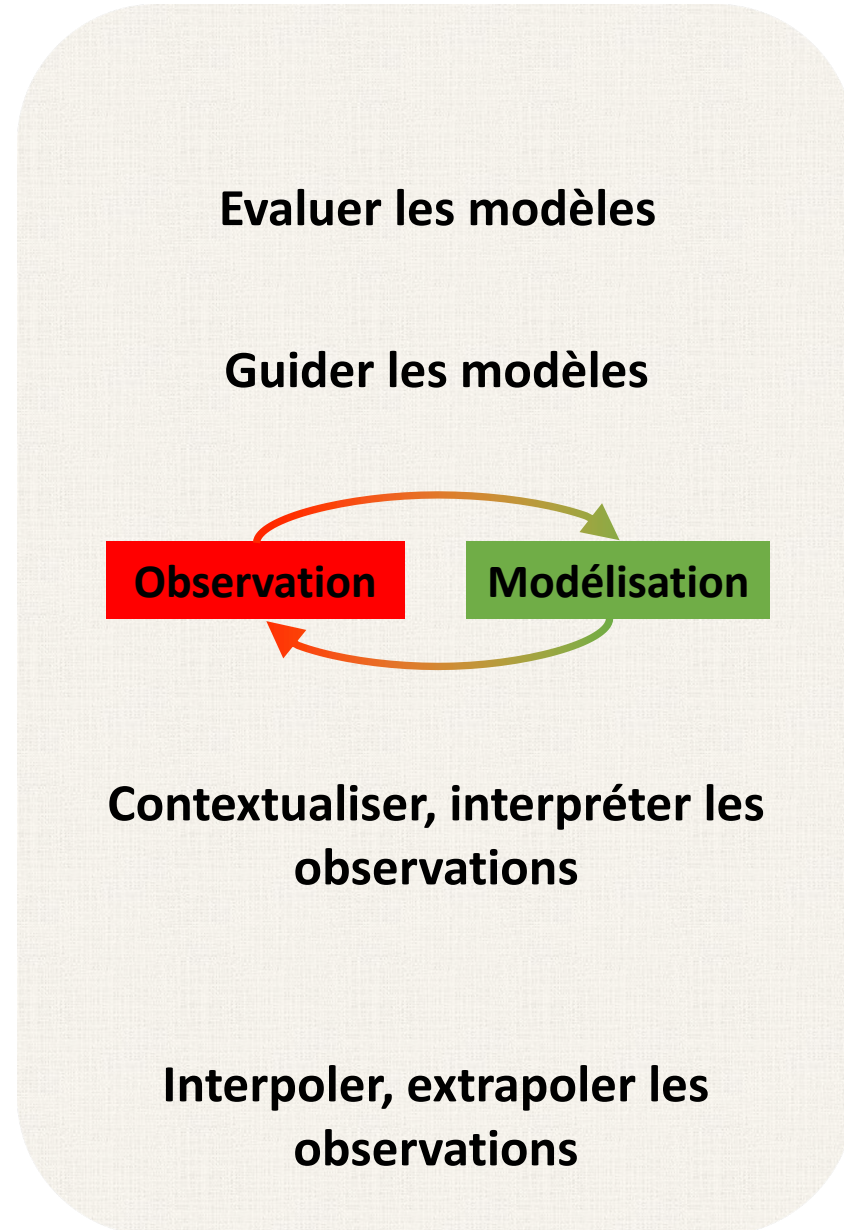
Plus récemment

Biais(x,y,z,t , état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

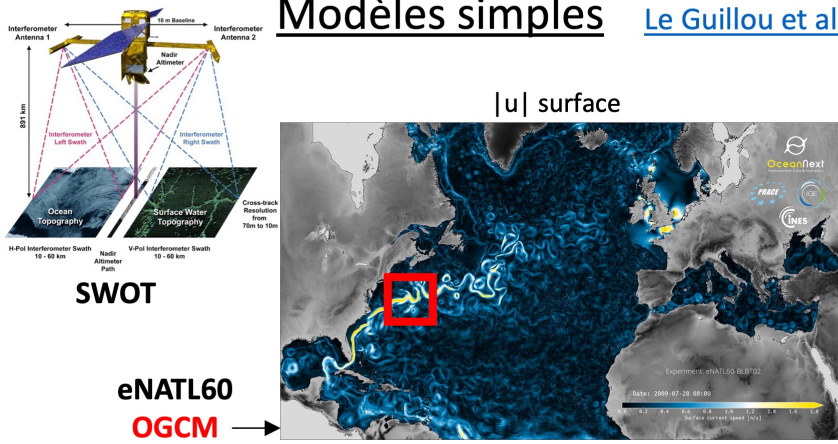
Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL



Interpoler, extrapoler les observations

Modèles simples [Le Guillou et al, 2021](#)



eNATL60
OGCM →
(NEMO)
 $\Delta x=1\text{km}$

Plus récemment

Biais(x,y,z,t,état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

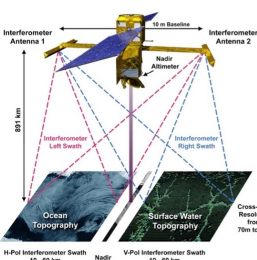
Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL

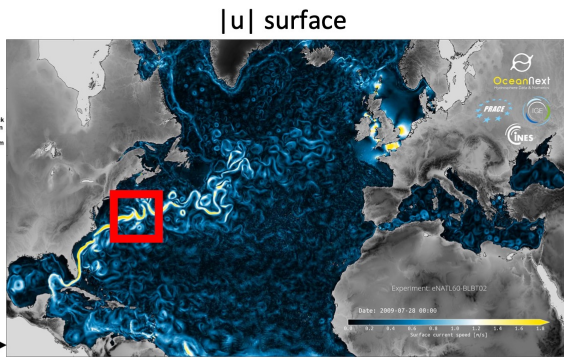
Interpoler, extrapoler les observations

Plus récemment

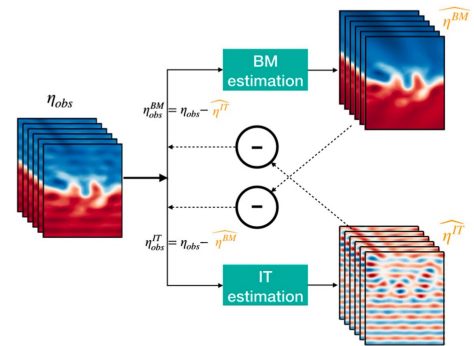
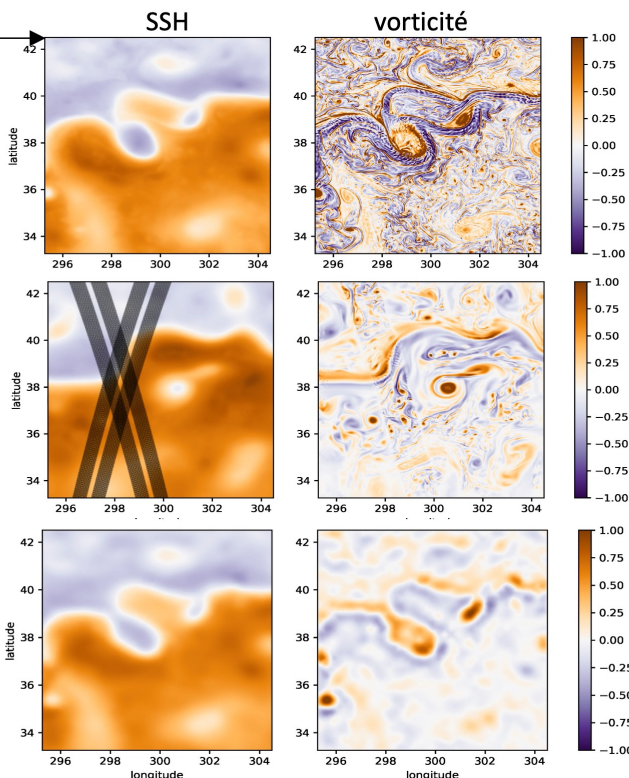
Modèles simples [Le Guillou et al, 2021](#)



SWOT



eNATL60
OGCM
(NEMO)
 $\Delta x=1\text{km}$



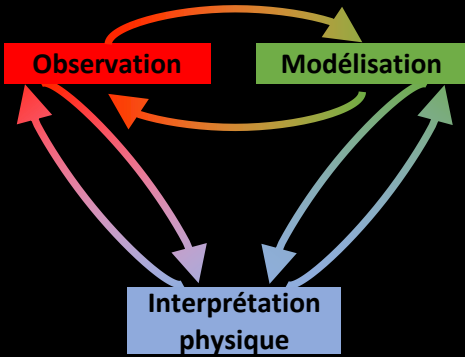
Biais(x,y,z,t,état initial)

Découplage simulation-assimilation
Prévisions basées IA

Représentativité des observations

Modèles simples : OSSE SWOT
Sans modèle : DL

Conclusion



Multiple synergies and applications

Observations + modèles phys. (OGCMs, simple) + modèles stat. (OI, assim, IA/DL)

A retenir

Ajuster la complexité du modèle à l'objectif

Evaluation probabiliste des modèles

Part aléatoire des signaux observés

Besoins des modélisateurs en observations

Spatiales et in-situ

Multivariées (océan certes, mais aussi atmo, banquise, topo...)

Abondantes, Validées, Accessibles

Homogènes (lat, lon, profondeur, temps)