

Système Climatique IENM 3/10 (1A)

## Variabilité interne

Julien Cattiaux

Centre National de Recherches Météorologiques  
CNRS / Météo-France

Retrouver ce cours sur ma page web : <https://www.umn-cnrm.fr/spip.php?article629>

Contact : [julien.cattiaux@meteo.fr](mailto:julien.cattiaux@meteo.fr)

2021-22

## Un peu de terminologie

Climat = état moyen + variabilité climatique.

Variabilité climatique = variabilité interne + forçages externes.

Forçages externes = forçages naturels + forçages anthropiques.

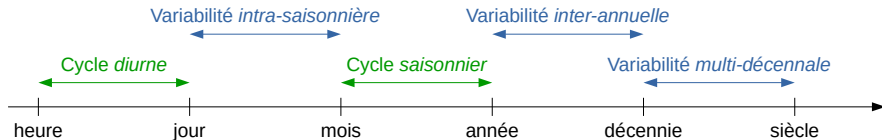
Variabilité interne + forçages naturels = variabilité naturelle.

—

N.B. La définition du **système** est capitale pour distinguer interne/externe !

# Variabilité interne – Généralités

- ▶ Même à l'équilibre énergétique, les variables climatiques fluctuent dans le temps et l'espace, et ce à **différentes échelles**.



N.B. Les cycles **diurne** et **saisonnier** (variations énergétiques) ne sont pas de la *variabilité interne*.

- ▶ Cette variabilité résulte des **échanges d'énergie** entre composantes, ainsi que de la **dynamique interne** à chaque composante.

—  
N.B. En théorie, la **variabilité interne** n'est pas *directement* observable, car le système climatique n'est jamais à l'équilibre (présence de **forçages externes**).

# Expérience : comment isoler la variabilité interne ?

## Recette :

- un modèle de climat ;
- des forçages externes (insolation, GES, etc.) constants.

Résultat : une simulation de climat **stationnaire** ...

... mais qui bouge sous l'effet de la **variabilité interne**.

T moyenne climatologique

T simulée

Tracé à partir d'une simulation *pré-industrielle* CNRM-CM5.



# Expérience : comment isoler la variabilité interne ?

## Recette :

- un modèle de climat ;
- des forçages externes (insolation, GES, etc.) constants.

Résultat : une simulation de climat **stationnaire** ...

... mais qui bouge sous l'effet de la **variabilité interne**.

T moyenne climatologique

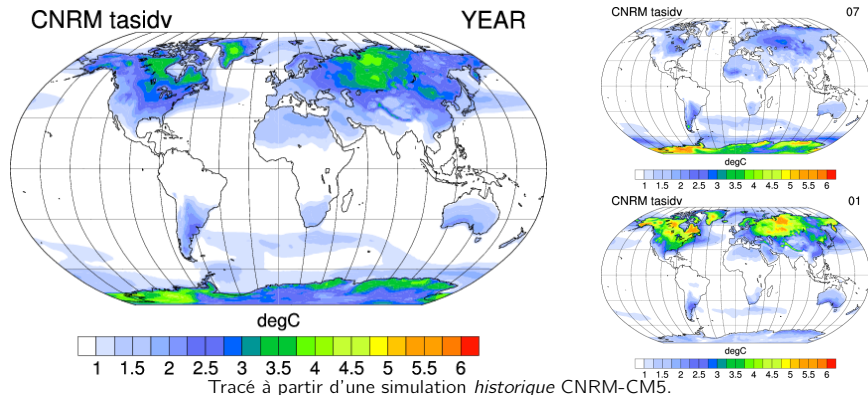
T simulée (anomalies)

Tracé à partir d'une simulation *pré-industrielle* CNRM-CM5.

Variabilité interne  
intra-saisonnière  
inter-annuelle  
multi-décennale

# Variabilité intra-saisonnière

Exemple : Variations jour à jour moyennes de  $T$  (i.e.  $\frac{1}{N} \sum |T_{j+1} - T_j|$ ).



- ▶ Cette variabilité résulte principalement de la **dynamique atmosphérique**.
- ▶ Elle est plus forte (i) sur continents, (ii) aux hautes latitudes et (iii) en hiver.

## Variabilité intra-saisonnière – Moyennes latitudes

Exemple : Circulation atmosphérique jour à jour en Europe (Z500).

État moyen de janvier

Circulation de janvier 2003

Tracé à partir des données [ERA-Interim](#).

Variabilité liée à l'activité synoptique.

## Variabilité intra-saisonnière – Moyennes latitudes

Exemple : Circulation atmosphérique jour à jour en Europe (Z500).

État moyen de janvier

Circulation de janvier 2003 (anomalies)

Tracé à partir des données [ERA-Interim](#).

Une façon de décrire cette variabilité est de la classier en *régimes de temps*.

## Régimes de temps – Méthode 1/2

$X(s, t)$  variable aléatoire (pression de surface, Z500, etc.).

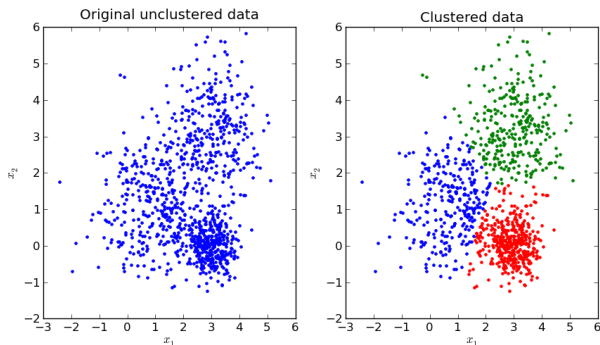
$X(s, t)$  s'agglomère-t-elle autour d'un petit nombre d'états *préférentiels* ?

- ▶ On cherche à regrouper les  $X(s, t)$  en  $k$  classes en tâchant de :
  - minimiser la variance *intra*-classes ;
  - maximiser la variance *inter*-classes ;
  - optimiser le nombre de classes.
- ▶ Cela revient à déterminer les maxima de la distribution de  $X$ .
- ▶ Exemples de techniques :
  - Algorithme *k-means*, groupement de  $X$  par itérations dynamiques ;
  - *Mixture modeling*, modélisation de  $X$  par juxtaposition de gaussiennes.

# Régimes de temps – Méthode 2/2

Exemple de l'algorithme k-means :

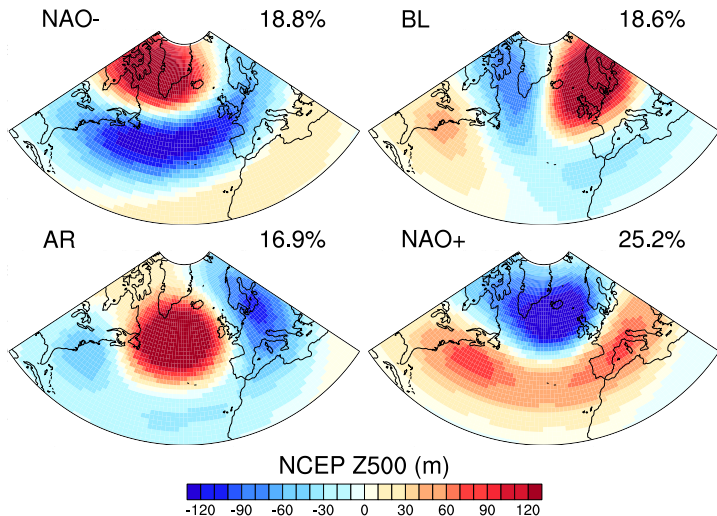
1. Choix du nombre  $k$  classes a priori.
2. Initialisation (aléatoire ou non) des  $k$  centres de classe (*centroïdes*).
3. Itérations :
  - Chaque observation est rangée avec le centroïde *le plus proche* ;
  - Les centroïdes sont recalculés (e.g., moyenne de la classe) ;
  - Itérations jusqu'à convergence du centroïde.



Code source et  
infos [ici](#).

# Régimes de temps européens d'hiver

- ▶ On utilise en général  $k = 4$  régimes de temps en Europe.



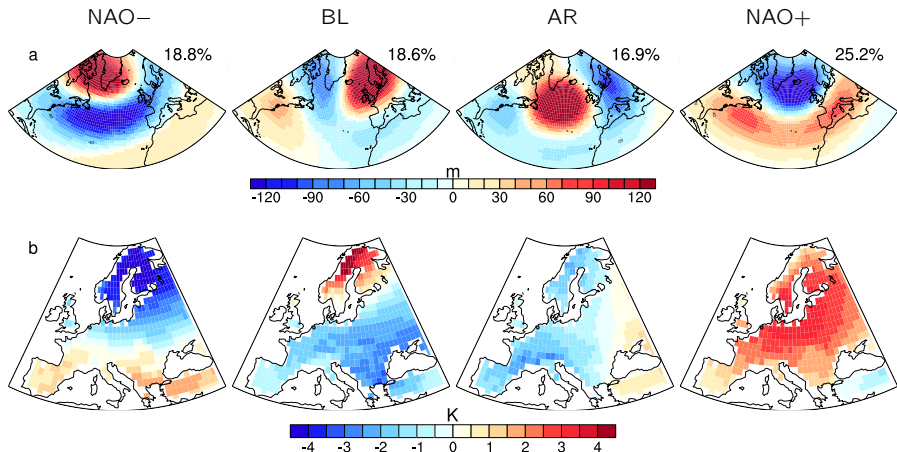
Données : Z500 NCEP2 (DJFM 1979–2008) | Source : Cattiaux et al. (2013).  
N.B. Ici, certains jours n'ont pas été attribués (i.e. présence d'un régime *poubelle*).



# Régimes de temps européens d'hiver & T associées

► À chaque régime correspond une anomalie *type* de  $T$ .

Exemple : Le régime zonal advecte de l'air **chaud** océanique sur l'Europe.

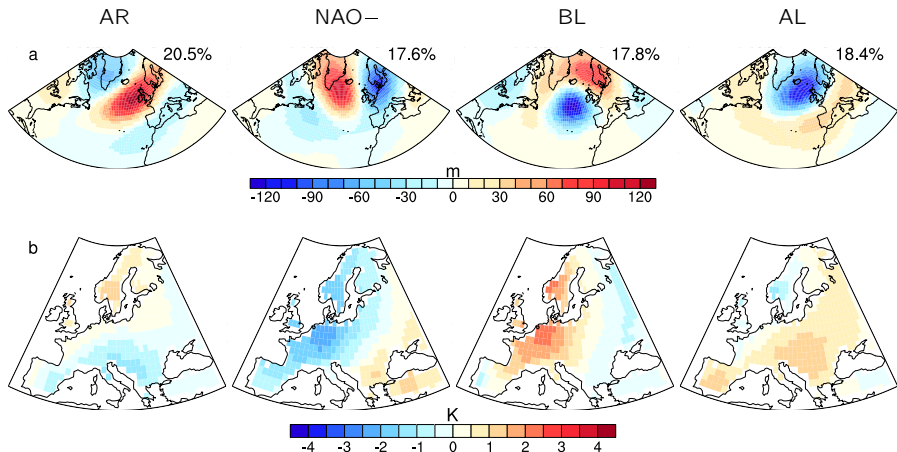


Données : Z500 NCEP2 & T EOBS (DJFM 1979–2008) | Source : Cattiaux et al. (2013).

# Régimes de temps européens d'été & T associées

► En été, la dynamique atmosphérique est moins intense.

Mais on utilise également 4 régimes de temps pour la décrire.

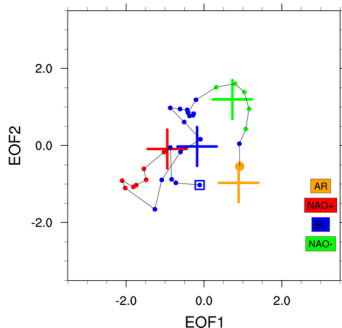
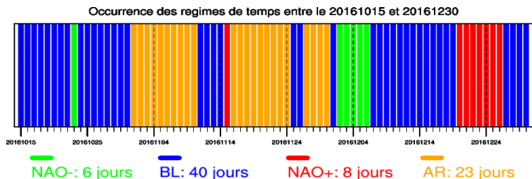


Données : Z500 NCEP2 & T EOBS (DJFM 1979–2008) | Source : Cattiaux et al. (2013).

# Suivi météo de la variabilité européenne - 1/2

- ▶ La météo européenne peut se décrire via une **alternance entre régimes**.
  - Chaque régime persiste entre quelques jours et quelques semaines.
  - Pas vraiment de transition privilégiée, peu de **prévisibilité**, beaucoup de hasard.

Exemple de la fin d'année 2016  
(zoom sur les 30 derniers jours à droite)



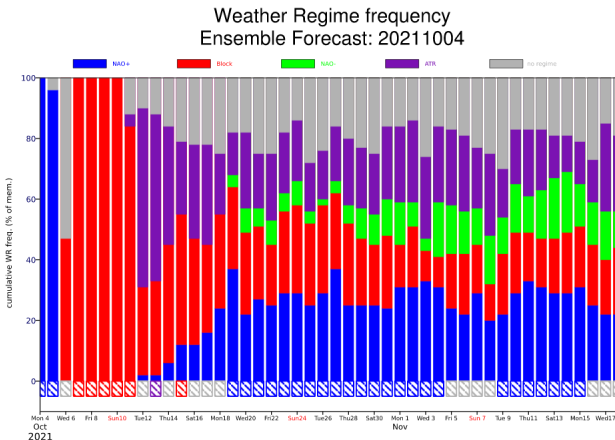
Source : suivi *live* des régimes de temps sur le [site](#) de Christophe Cassou (CERFACS).

N.B. À droite chaque carte de Z500 est réduite à 2 dimensions (par une technique d'ACP, voir suite du cours) et on peut visualiser à quel point on est proche, ou non, du centroïde.

# Suivi météo de la variabilité européenne – 2/2

- ▶ La météo européenne peut se décrire via une **alternance entre régimes**.
  - Chaque régime persiste entre quelques jours et quelques semaines.
  - Pas vraiment de transition privilégiée, peu de **prévisibilité**, beaucoup de hasard.

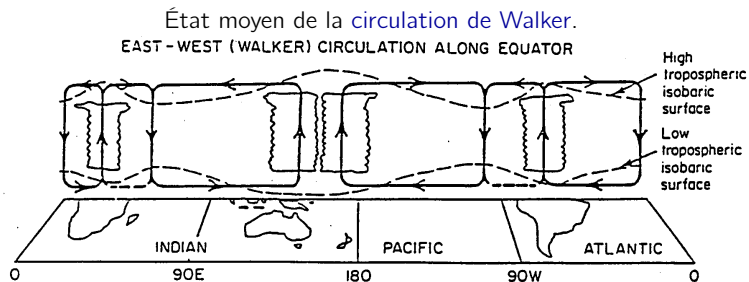
Exemple des prévisions probabilistes pour oct. 2021



Source : site de l'ECMWF.

# Variabilité intra-saisonnière – Tropiques

- ▶ Dans les tropiques, la **circulation méridienne** est bien établie (Hadley), mais présence d'une variabilité intra-saisonnière dans la **circulation zonale** (Walker).



Source : Webster (1983).

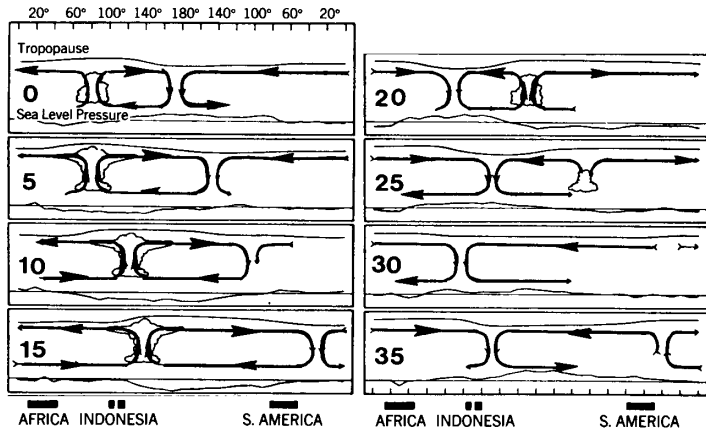


G. Walker  
(1868-1958).

# Madden and Julian (1972)

- Découverte d'un mode propagatif vers l'est (40–50 jours).

Madden-Julian Oscillation (MJO)



Source : Madden and Julian (1972).



P. Julian & R. Madden  
(en 2013).

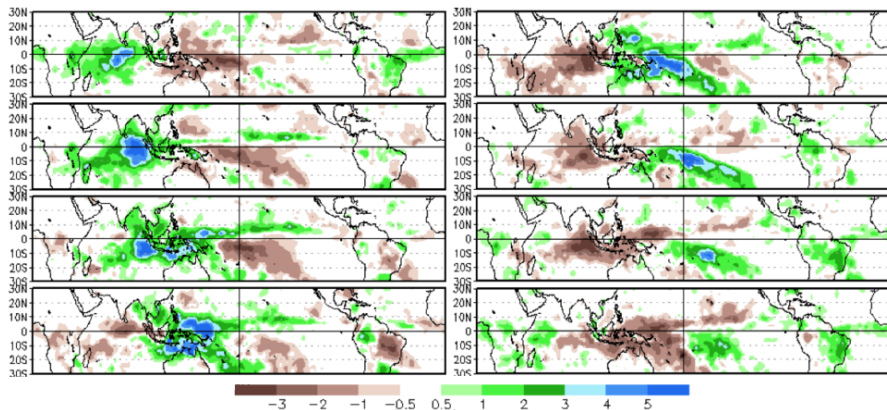
- La circulation de Walker peut être vue comme la moyenne clim. de la MJO.

Voir aussi : Cours de Roger Smith (Uni Munich).

# La MJO vue par les précipitations

- ▶ On distingue 8 phases de MJO, pendant lesquelles les zones de convection et de subsidence se propagent vers l'est.

Anomalies de précipitation associées aux 8 phases MJO



Moyenne sur tous les événements MJO de Novembre–Mars sur 1979–2012.

Source : [blog](#) de Jon Gottschalck (NOAA).

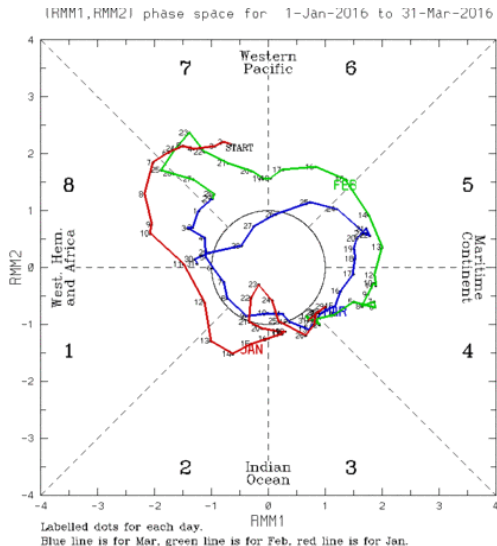
# Suivi météo de la variabilité tropicale

## ► Exemple de Janvier – Février – Mars 2016

- La MJO n'est pas toujours active.
- Une fois activée, elle suit les phases dans l'ordre croissant (propagation vers l'est).  
→ Davantage de **prévisibilité** qu'aux extra-tropiques.
- Elle ne fait pas nécessairement un cycle entier.

—  
N.B. À droite on réduit l'information à 2 dimensions qui discriminent les 8 phases MJO.

Source : Suivi *live* par l'[Australian Bureau of Meteorology](#).

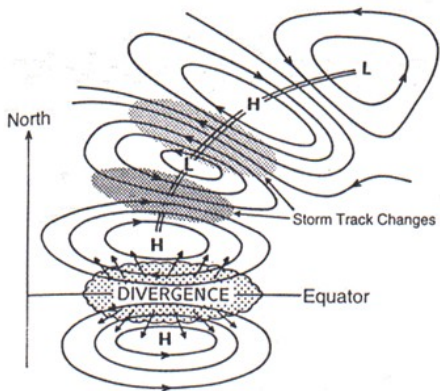




# Influence de la MJO sur les extra-tropiques

## Mécanisme de téléconnexion

Une anomalie de chauffage tropical peut déclencher la propagation d'une *onde de Rossby* impactant la circulation des moyennes latitudes.



Source : Trenberth et al. (1998).

## ► Exemples de téléconnexions liées à la MJO :

- Pacifique : *Pineapple Express* en Californie.
  - Atlantique : possibles liens avec les régimes de temps (voir Cassou, Nature, 2008).
- source potentielle de prévisibilité pour les extra-tropiques.

## Variabilité interne

intra-saisonnière

**inter-annuelle**

multi-décennale

# Variabilité inter-annuelle

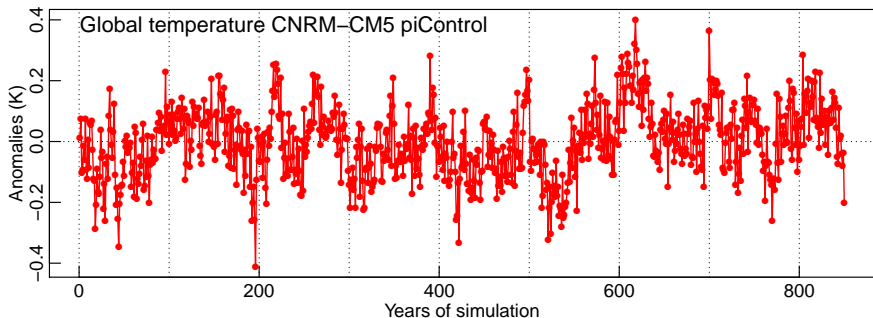
Exemple : Variations de  $T$  d'une année sur l'autre.

Tracé à partir d'une simulation *pré-industrielle* CNRM-CM5.

# Variabilité inter-annuelle – Température globale

Exemple : Variations de  $T$  d'une année sur l'autre.

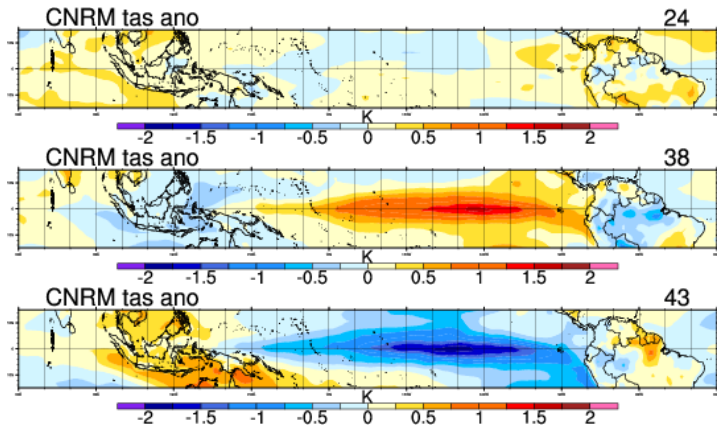
À l'équilibre énergétique, la  $T$  globale fluctue de quelques dixièmes de degrés à l'échelle inter-annuelle.



Tracé à partir d'une simulation *pré-industrielle* CNRM-CM5.

# Variabilité inter-annuelle – Zoom sur le Pacifique Tropical

Exemple de 3 années caractéristiques :

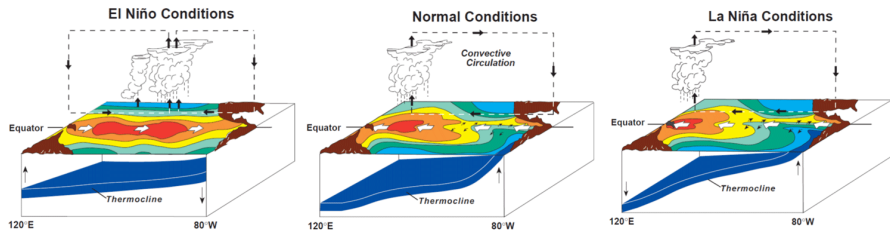


Tracé à partir d'une simulation *pré-industrielle* CNRM-CM5.

Cette variabilité est appelée **El Niño Southern Oscillation (ENSO)**.

# ENSO – Généralités

- ▶ Oscillation couplée **océan-atmosphère**, fréquence 2 à 7 ans :



Source : NOAA.

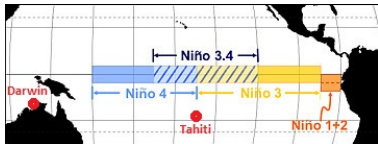
- ▶ À la différence de la MJO, l'ENSO n'est **pas propagative**, et ses anomalies **persistent** plusieurs mois (car maintenues par l'océan).  
→ **Prévisibilité à l'échance saisonnière.**
- ▶ La MJO peut jouer sur le déclenchement de l'ENSO.
- ▶ En retour l'ENSO module l'activité MJO (peu en Niño, plus en Niña).

# ENSO – Description statistique

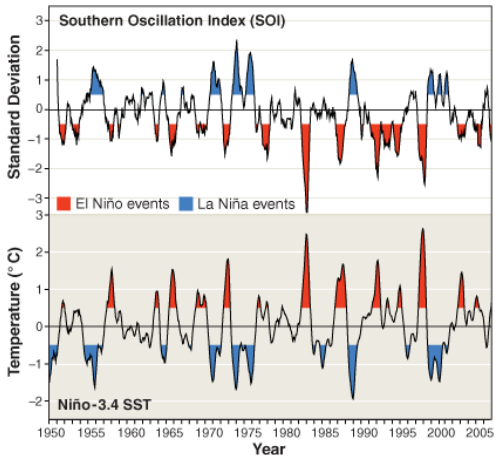
- **Indices** basés sur des observations atmosphériques et/ou océaniques.

Exemple 1 – **Southern Oscillation Index** : différence de pression entre Tahiti – Darwin.

Exemple 2 – **Indice Niño 3.4** : moyenne de SST dans la région 120°–150°W et 5°N–5°S.



Source : NOAA, [ici](#) et [ici](#).



- Ou bien **analyse en composantes principales** (cf. la suite).

# Analyse en composantes principales

$X(s, t)$  champ  $N_t \times N_s$  (température, pression, etc.).

Quels sont les principaux modes de variabilité spatio-temporelle de  $X(s, t)$  ?

- Séparation espace-temps ( $s$  et  $t$ ) par décomposition en valeurs propres de la matrice de covariance de  $X$  (notée  $C$ , symétrique et semi-définie positive) :

$$X(s, t) = \sum_{k=1}^K p_k(t) e_k(s) .$$

## Composantes Principales (PCs)

- coefficients temporels pour recombinaison des  $e_k(s)$  ;
- variances = valeurs propres de  $C$  ;
- non-corrélées,  $\text{cor}(p_k, p_{k'}) = \delta_{kk'}$  .

## Fonctions Orthogonales Empiriques (EOFs)

- vecteurs spatiaux (cartes) à partir desquels les données sont combinées ;
- vecteurs propres de  $C$  ;
- orthonormales,  $e_k' e_{k'} = \delta_{kk'}$  .



# Analyse en composantes principales – Calcul

$$X(s, t) = \sum_{k=1}^K p_k(t) e_k(s) .$$

1. On cherche  $e_1$  unitaire qui maximise la variance de  $X$  expliquée par  $e$  :

$$\text{Max} \left( V_e^X = e' X' X e = e' C e \right) \quad \text{tq.} \quad e' e = 1 .$$

2. Algèbre : si on note  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N$  les valeurs propres de  $C$ , on montre que  $e_1$  est le vecteur propre de  $C$  associé à  $\lambda_1$  :

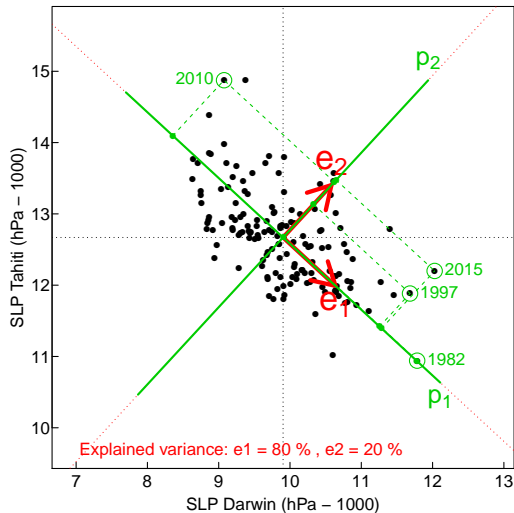
$$C e_1 = \lambda_1 e_1 .$$

3. On cherche  $e_2$  de façon similaire (contraintes  $e' e = 1$  et  $e' e_1 = 0$ ).
4. On montre que  $e_2$  est le vecteur propre de  $C$  associé à  $\lambda_2$ , et ainsi de suite.
5. On en déduit les PCs par projections orthogonales :

$$\forall k \quad p_k = X e_k .$$

# Analyse en composantes principales – Illustration en 2D

Tahiti vs. Darwin yearly SLP



- $e_1$  direction principale du nuage de points (i.e. qui maximise la variance expliquée);
- $e_2$  direction orthogonale ;
- $p_1, p_2$  coordonnées dans la base  $(e_1, e_2)$  (i.e. dans l'espace des phases).

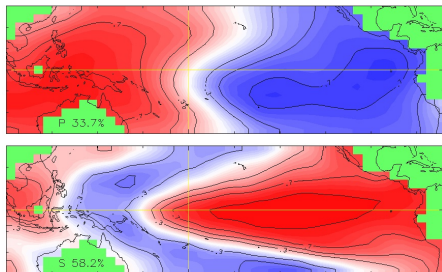
→ La première EOF ( $e_1$ ) décrit la structure spatiale du premier mode de variabilité; la première PC ( $p_1$ ) décrit son évolution temporelle.

Tracé à partir des données du [Climate Data Guide](#).  
Moyennes annuelles calculées sur Juillet-Juin.

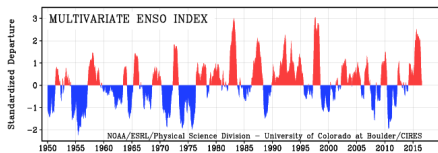
# ENSO – Description par ACP

- ▶ L'ENSO est le **premier mode de variabilité** pression / SST.
- ▶ On retrouve les centres d'action du **SOI** et de l'indice **Niño 3.4**.

Cartes  $e_1$  de pression (haut) et SST (bas)



Série temporelle  $p_1$  associée



Source : [site de la NOAA](#).  
Données HadSLP2 et HadSST2,  
voir [Wolter and Timlin \(2011\)](#).

- ▶ Récents **Niños** marquants : 1982/83, 1997/98, et 2015/2016.

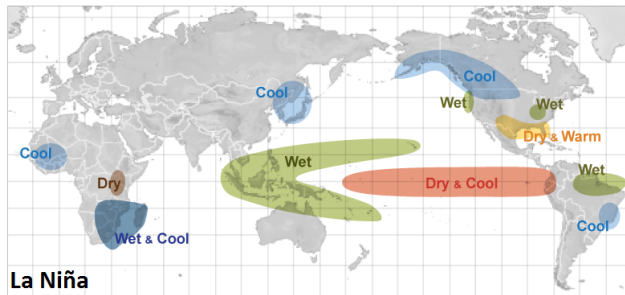
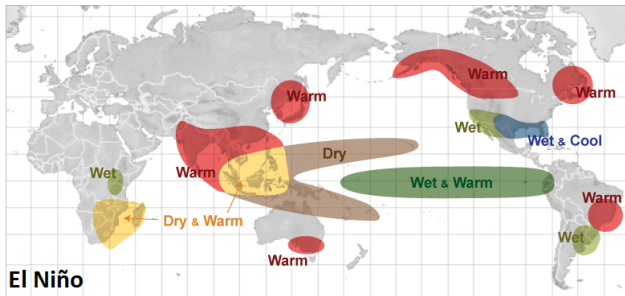
# ENSO – Téléconnexions

Influence ENSO à l'échelle globale

(années Niño chaudes, années Niña froides)

...

sauf en Europe.



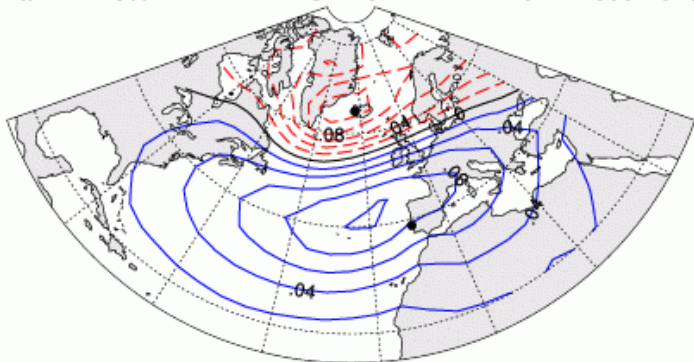
# Variabilité inter-annuelle – Europe

Exemple : Vecteur  $e_1$  de la pression de surface hivernale.

Var. = 42.8%

EOF1 SLP

DJFM 1899-2016



Source : [Climate Data Guide](#), Jim Hurrell (NCAR).

En Europe, le 1<sup>er</sup> mode de variabilité inter-annuelle implique l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande : c'est l'**Oscillation Nord-Atlantique** (NAO).

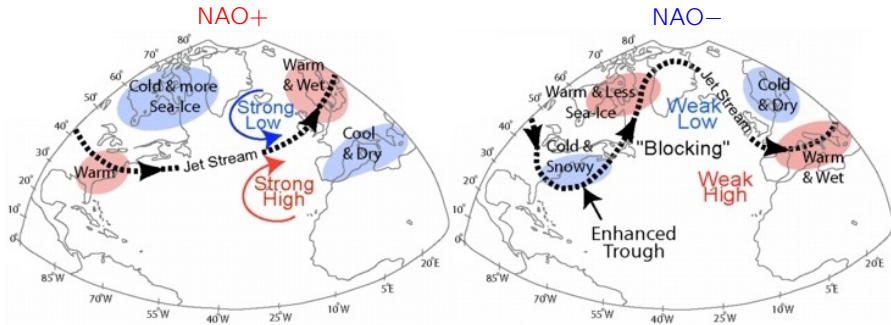
# NAO – Généralités

- ▶ Mode principalement **atmosphérique**.

**NAO+** : jet stream renforcé, resserré et dévié au nord de l'Europe, fortes tempêtes.

**NAO-** : jet stream affaibli, sinueux et dévié au sud de l'Europe, occurrence de blocages.

- ▶ Influence en Europe et Amérique du Nord (quadrupôle **froid/chaud**).

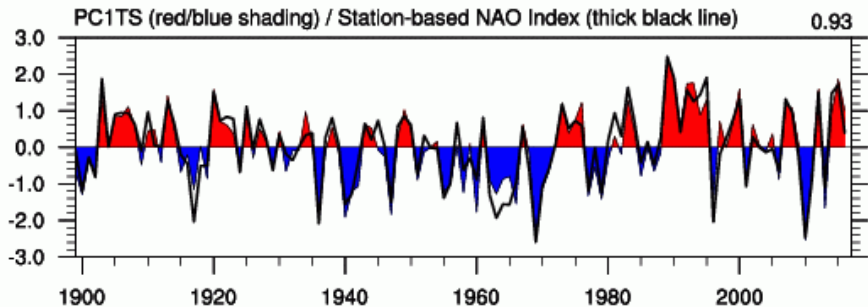


Source : [Université du Michigan](#).

- ▶ La NAO peut être vue comme l'intégration annuelle des **régimes de temps**. On parle d'**hiver NAO+** ou d'**hiver NAO-** selon le(s) régime(s) dominant(s).

## NAO – Description par indices

- Par **ACP** : vecteur  $p_1$  de la pression de surface (ou du Z500).
- À partir d'observations *station* :  $P_{Lisbonne} - P_{Reykjavik}$ .



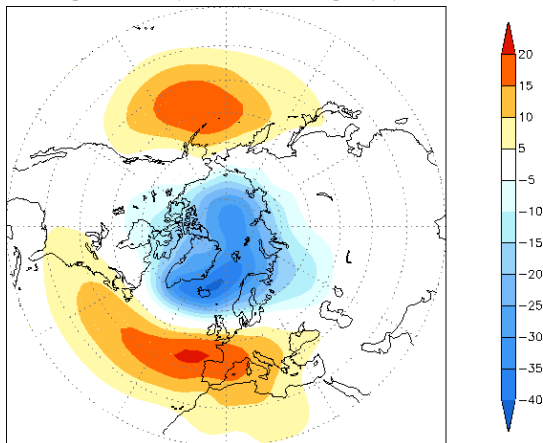
Source : [Climate Data Guide](#), Jim Hurrell (NCAR).

- ▶ Présence d'une **basse fréquence** : possible mémoire via l'océan (débatu). Notamment tendance **positive** sur 1965–1995, et **négative** sur 1995–2010.
- ▶ Faible **prévisibilité** à l'échéance saisonnière.

# Variabilité inter-annuelle – Hautes latitudes (Nord)

- Premier mode de l'ACP sur l'hémisphère Nord entier :

Leading EOF (19%) shown as regression map of 1000mb height (m)



EOF1 du Z1000 | Source : [Climate Prediction Center](#) (NOAA).

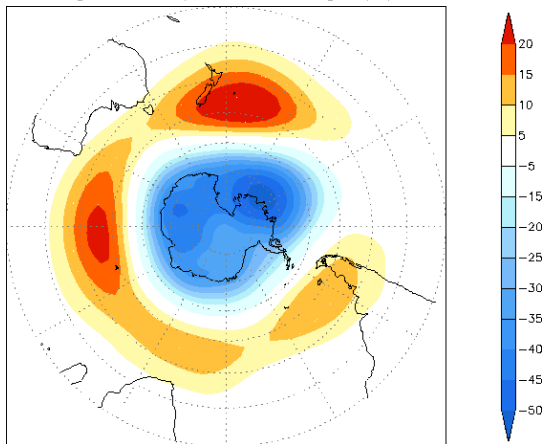
Mode Annulaire Nord (NAM) ou Oscillation Arctique (AO).



## Variabilité inter-annuelle – Hautes latitudes (Sud)

- Premier mode de l'ACP sur l'hémisphère Sud entier :

Leading EOF (27%) shown as  
regression map of 700mb height (m)

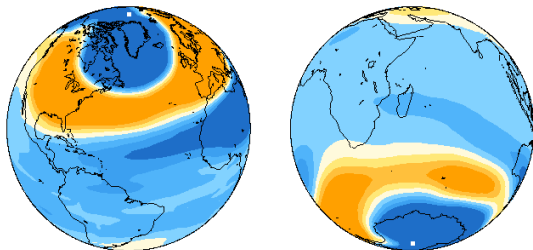


EOF1 du Z700 | Source : [Climate Prediction Center](#) (NOAA).

Mode Annulaire Sud (SAM) ou Oscillation Antarctique (AAO).

## Modes annulaires – Généralités

- ▶ Modes principalement **atmosphériques**.



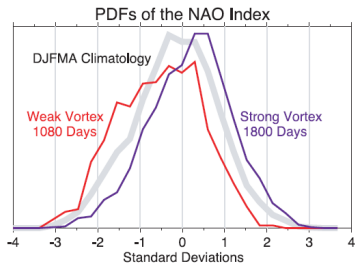
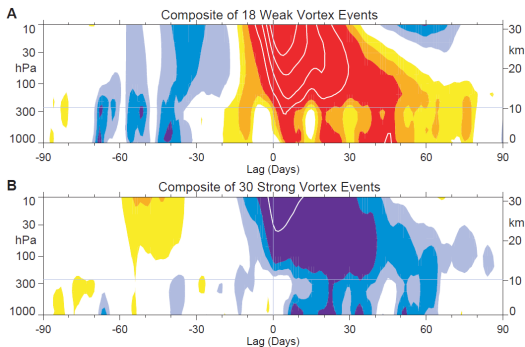
Source : [Cours](#) de John Wallace (Washington University).

- ▶ Phase **positive** : *jet stream* renforcé et décalé vers le pôle.
- ▶ Phase **négative** : *jet stream* affaibli et décalé vers l'équateur.
- ▶ Hémisphère Nord : **NAM** ~ **NAO**.
- ▶ Liens avec les **vortex polaires stratosphériques** (cf. suite).

—  
Voir aussi : [site](#) de David Thompson (Colorado State University).

# Liens avec la stratosphère – Vortex polaire et SSW

- ▶ Présence d'une variabilité *rapide* dans le **vortex polaire stratosphérique**.
- ▶ Les affaiblissements du vortex — ou **réchauffements stratosphériques soudains** (SSW) — tendent à favoriser des phases NAM/NAO négatives.
- ▶ Mécanisme de propagation encore mal compris.

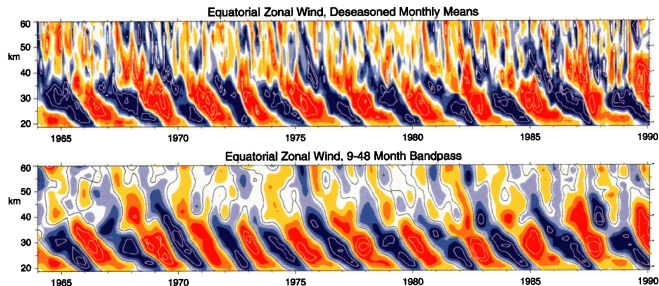


← Contours : 0.25 s.d (rouge = NAM-).  
Source : Baldwin and Dunkerton (2001).

# Liens avec la stratosphère – Influence de la QBO

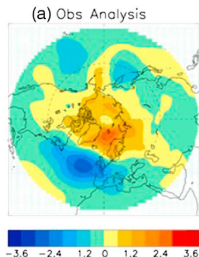
- ▶ Dans la stratosphère équatoriale, on observe un retournement périodique des vents zonaux : c'est l'**Oscillation Quasi-Biennale (QBO)**.
- ▶ Les phases **est** semblent plus propices à un vortex polaire affaibli, ce qui tend à favoriser les phases NAM/NAO– (mal compris).

Vent zonal équatorial moyen (gauche) et composite SLP “**est** – **ouest**” (droite)



Contours :  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (rouge = vents d'ouest, blanc entre -3 et 3).

Source : Baldwin et al. (2001).



Unités : hPa. Source : Scaife et al. (2014).

## Variabilité interne

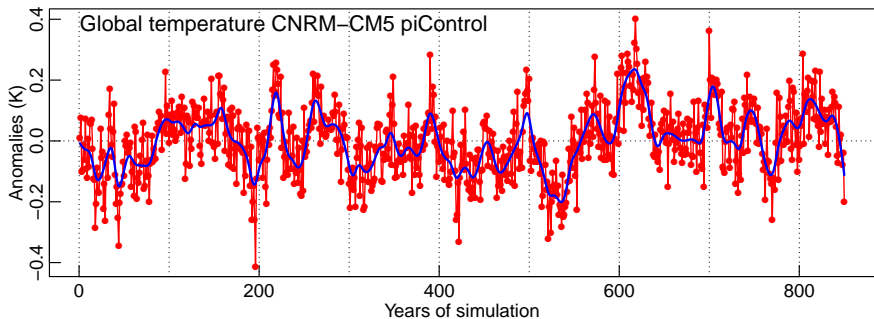
intra-saisonnière

inter-annuelle

multi-décennale

# Variabilité multi-décennale

Exemple (toujours le même) :



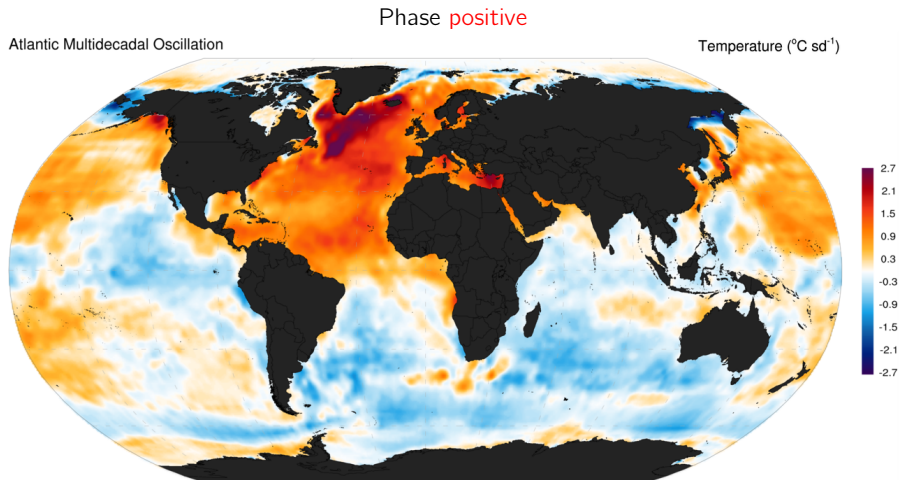
Tracé à partir d'une simulation *pré-industrielle* CNRM-CM5.

À l'équilibre énergétique, la  $T$  globale fluctue de quelques centièmes, voire dixièmes, de degrés à l'échelle multi-décennale.

- L'origine de cette variabilité est principalement **océanique**.
- Vue l'échelle de temps, il est difficile de l'étudier dans les observations.

# AMV – Atlantic Multidecadal Variability (ou Oscillation)

- ▶ Variabilité lente ( $\sim 50\text{--}80$  ans) et spatialement uniforme de la SST Nord-Atlantique, en partie liée à l'intensité de la circulation thermohaline.



Source : [Blog](#) de l'AGU.

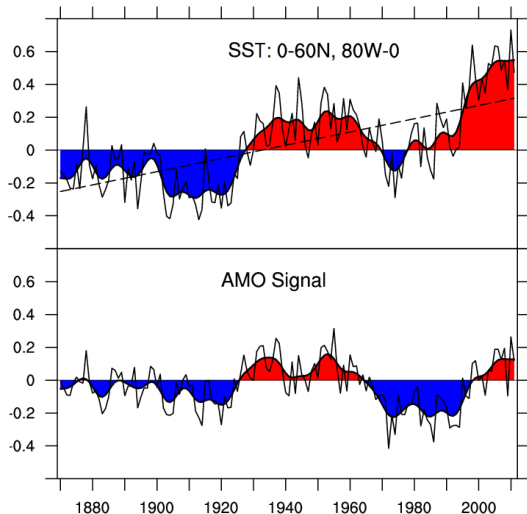
# AMV – Évolution récente

► Pas d'observation directe, car AMV mélangée à l'effet des **forçages externes** (en l'occurrence au réchauffement anthropique).

► Phase **négative** dans les 1970s–1980s, puis **positive** dans les 2000s.

Source : [Climate Data Guide](#), Kevin Trenberth (NCAR).

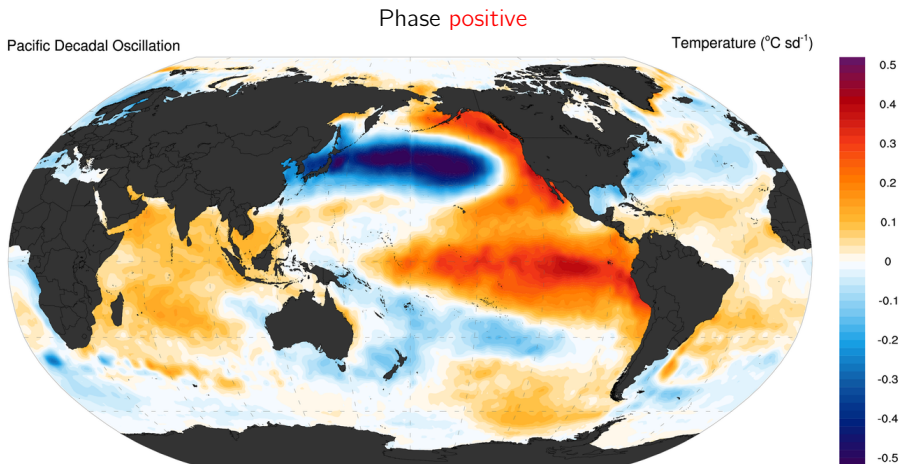
## Atlantic Multi-Decadal Oscillation: 1870-2011





## PDV – Pacific Decadal Variability (ou Oscillation)

- Variabilité lente ( $\sim 40\text{--}60$  ans) dans le **Pacifique**, intégrant notamment la basse fréquence de l'**ENSO**.

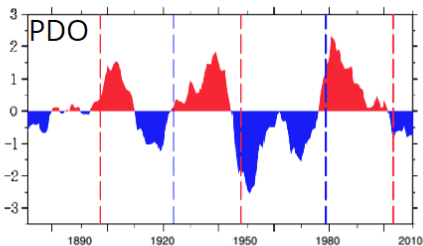
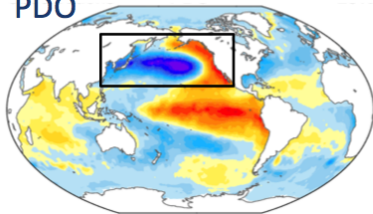


Source : [Blog](#) de l'AGU.

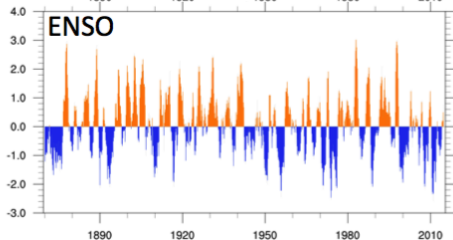
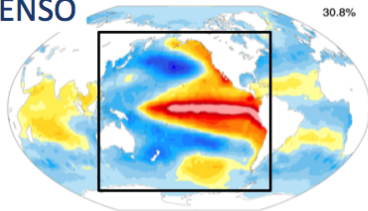
## PDV vs ENSO – Évolution récente

- ▶ PDV vs ENSO : la principale différence est l'échelle de temps.
- ▶ PDV : phase **positive** dans les 1980s–1990s, puis **négative** dans les 2000s.

PDO



ENSO



Source : [Climate Data Guide](#), Clara Deser (NCAR) & Chen et al. (2016).

# Importance de la variabilité multi-décennale – 1/2

- ▶ Capital pour la détection de **changements climatiques**.

La présence d'une variabilité "basse-fréquence" impacte la distribution des tendances qui peuvent être obtenues *par hasard* sur une certaine période de temps.

**Exemple** :  $X(t)$  série climatique de 50 ans.  $X(t)$  est-elle non stationnaire ?

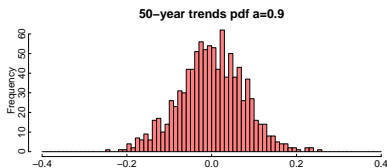
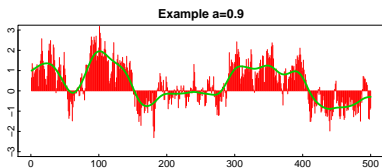
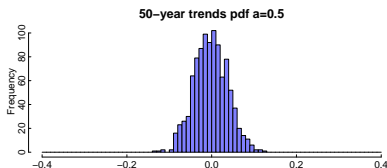
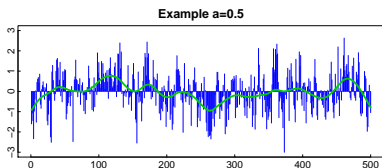
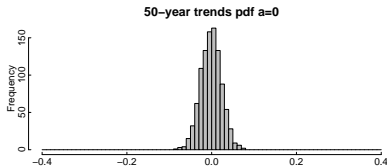
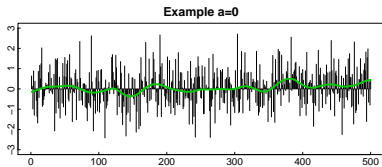
→ Réponse par test d'hypothèse :

1. **Modélisation** (statistique) des données (e.g., i.i.d., loi normale).
2. Formulation de **l'hypothèse nulle**  $H_0$  (ici, stationnarité).
3. Formulation de **l'hypothèse alternative**  $H_1$  (ici, non-stationnarité).
4. Choix d'une statistique  $r$  pertinente (ici, tendance = coefficient de régression linéaire).
5. Estimation de la **distribution sous  $H_0$**  de cette statistique  $r$ .
6. Définition d'une région dans laquelle on pense pouvoir accepter  $H_0$  **avec un certain niveau de confiance  $\alpha$** .
7. Calcul de  $r$  à partir des données et *décision*.

**L'étape 1 est cruciale !**

# Importance de la variabilité multi-décennale – 2/2

Exemple : Distributions des tendances sous  $H_0$  pour différents processus AR1\*.



\* Processus Auto-Régressif d'ordre 1 :  $X(t + 1) = \alpha X(t) + \varepsilon$ , avec  $\alpha$  entre 0 et 1, et  $\varepsilon$  bruit blanc.

# Le problème... autant de *variabilités* que de modèles !

Global Mean Surface Air Temperature – CMIP5 Pre-Industrial Controls

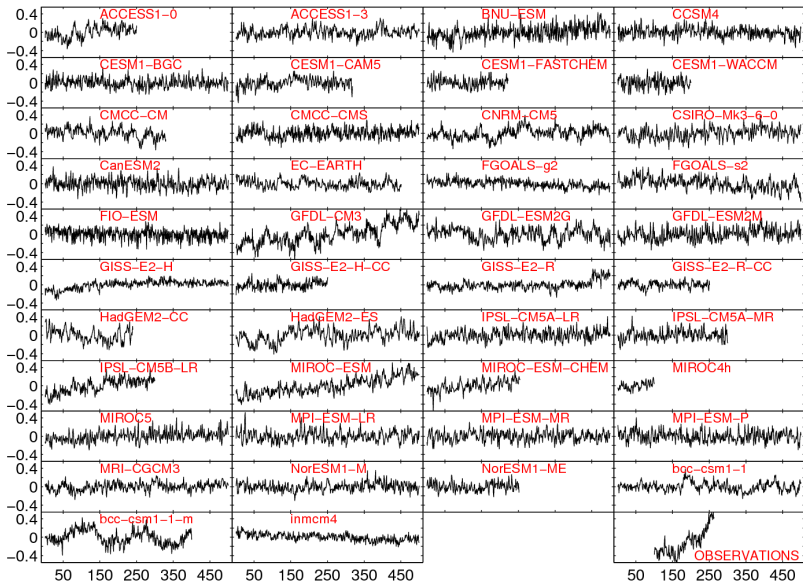
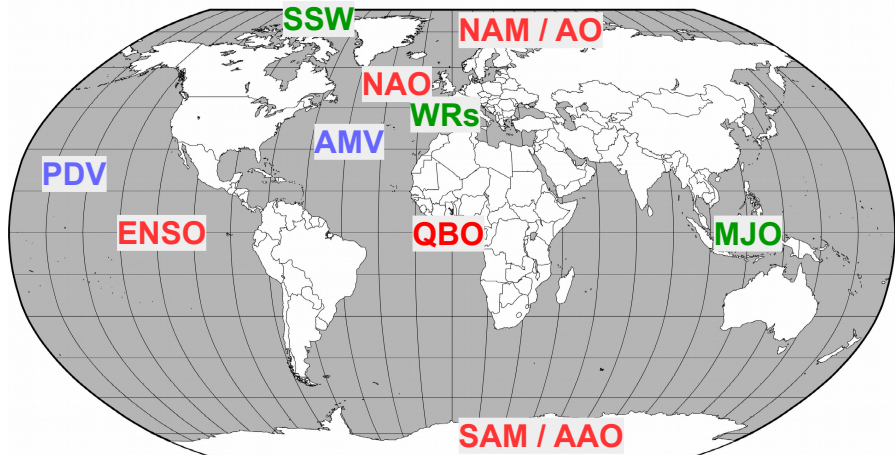


Figure d'Ed Hawkins (U. Reading). Source : Sutton et al. (2015).

# Résumé

WTF!



Variabilité **intra-saisonnière**, **inter-annuelle** et **multi-décennale**.

# Résumé

À l'équilibre énergétique, présence d'une **variabilité interne** à toutes les échelles, due aux échanges d'énergie & à la dynamique des composantes.

Origine **atmosphérique** pour petites échelles, **océanique** pour grandes.

Souvent décrite via ses principaux **modes** (méthodes d'*analyse statistique*).

Plus forte aux hautes latitudes qu'aux tropiques ; présence de **téléconnexions**.

Sa **prévisibilité** dépend de la région et de l'échéance temporelle considérées (ex. ENSO prévisible à échéance saisonnière, régimes de temps très peu au-delà de qq jours).

Capital de bien estimer / prendre en compte la **variabilité basse fréquence** pour l'étude des **changements climatiques** (cf. cours 2A).

# Références I

- ▶ M.P. Baldwin and T.J. Dunkerton, *Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes*, *Science* **294** (2001), no. 5542, 581.
- ▶ M.P. Baldwin, L.J. Gray, T.J. Dunkerton, K. Hamilton, P.H. Haynes, W.J. Randel, J.R. Holton, M.J. Alexander, I. Hirota, T. Horinouchi, et al., *The quasi-biennial oscillation*, *Reviews of Geophysics* **39** (2001), no. 2, 179–229.
- ▶ C. Cassou, *Intraseasonal interaction between the Madden–Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation*, *Nature* **455** (2008), no. 7212, 523–527.
- ▶ J. Cattiaux, H. Douville, and Y. Peings, *European temperatures in CMIP5: origins of present-day biases and future uncertainties*, *Clim. Dyn.* **41** (2013), no. 11–12, 2889–2907.
- ▶ R.A. Madden and P.R. Julian, *Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period*, *J. Atmos. Sci.* **29** (1972), no. 6, 1109–1123.
- ▶ A.A. Scaife, M. Athanassiadou, M. Andrews, A. Arribas, M. Baldwin, N. Dunstone, J. Knight, C. MacLachlan, E. Manzini, W.A. Müller, et al., *Predictability of the quasi-biennial oscillation and its northern winter teleconnection on seasonal to decadal timescales*, *Geophys. Res. Lett.* **41** (2014), no. 5, 1752–1758.
- ▶ R. Sutton, E. Suckling, and E. Hawkins, *What does global mean temperature tell us about local climate?*, *Phil. Trans. R. Soc. A* **373** (2015), no. 2054, 20140426.
- ▶ K.E. Trenberth, G.W. Branstator, D. Karoly, A. Kumar, N.-C. Lau, and C. Ropelewski, *Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures*, *J. Geophys. Res.* **103** (1998), no. C7, 14291–14324.



## Références II

- ▶ P.J. Webster, *Large-scale structure of the tropical atmosphere*, Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere (1983), 235–275.
- ▶ K. Wolter and M.S. Timlin, *El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI. ext)*, Int. J. Climatol. **31** (2011), no. 7, 1074–1087.