

Système Climatique IENM 1/10 (1A)

Climat et système climatique : introduction

Julien Cattiaux

Centre National de Recherches Météorologiques
CNRS / Météo-France

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

Contact : julien.cattiaux@meteo.fr

2021-22

Introduction au climat

Systeme climatique

De la météo au climat

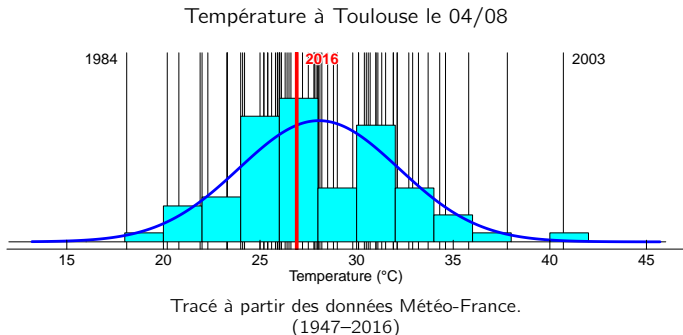
Climate is what you expect,
weather is what you get.



E. Lorenz
(1917–2008)

De la météo au climat – Exemple

- ▶ Le 04/08/2016 à Toulouse, il a fait 27°C .
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans le passé.
- ▶ Au final, on peut construire l'**histogramme** des T possibles.

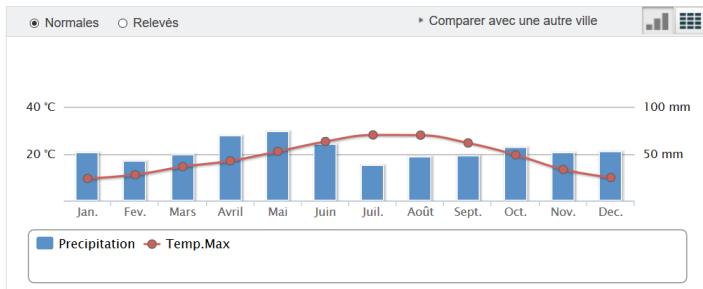


Le climat est l'ensemble des **météos** possibles, i.e. sa *distribution* statistique.
On l'estime souvent de manière *empirique* (convention OMM : 30 ans).

Les fameuses normales de saison

- ▶ Au premier ordre, le **climat** peut être décrit par sa **moyenne** (*normale*).
Espérance mathématique $\mathbb{E}[X]$, estimation via $\mu_x = \frac{1}{n} \sum_i x_i$.
- ▶ Les organismes météorologiques moyennent sur une **période de référence**.
Exemple : Météo-France définit actuellement les *normales* sur la période 1981-2010.

DONNEES CLIMATIQUES DE LA STATION DE TOULOUSE



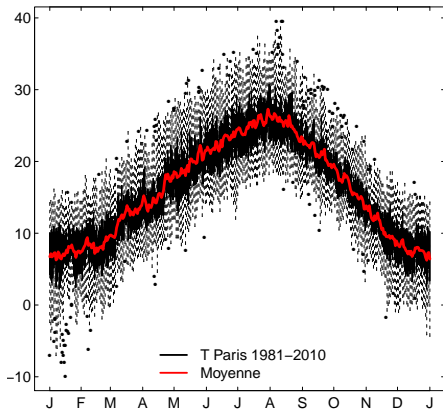
Source : site public de Météo-France, onglet [climat](#).

Calcul des normales

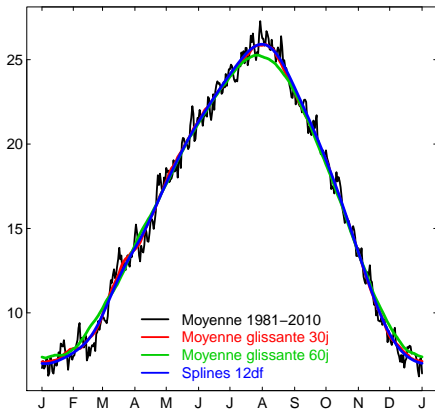
1. Moyenne des observations en chaque jour (ou mois).
2. Lissage temporel : estimateurs à noyaux (e.g. **moyenne glissante**), ou méthodes + sophistiquées (e.g. Fourier*, **splines**).

Exemple de calcul à la station Paris-Montsouris

Distrib. Tmax quotidienne Paris 1981–2010 (°C)



Normale Tmax quotidienne Paris 1981–2010 (°C)



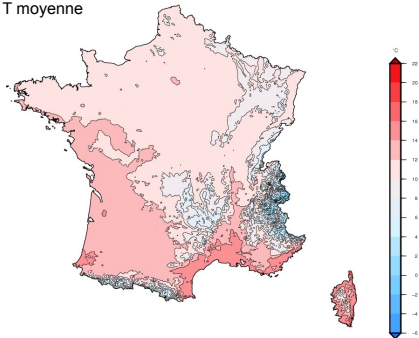
Tracé à partir des données Météo-France.

* Cf. **pseudo-normales quotidiennes** de Météo-France à partir de moyennes mensuelles.

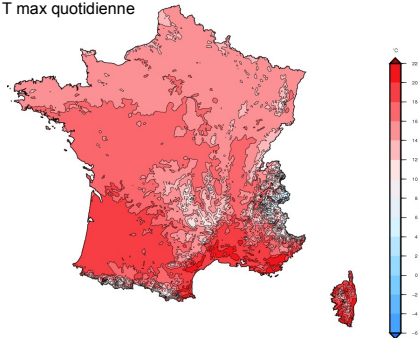
Normales France – Température

- Il fait plus chaud au sud qu'au nord.

T moyenne



T max quotidienne

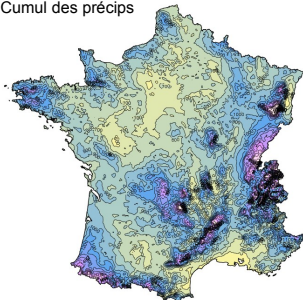


Source : Météo-France (normales 1981-2010).

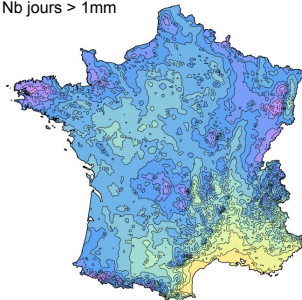
Normales France – Précipitations

- Il pleut autant à Menton qu'à Brest (mais moins souvent).

Cumul des précips



Nb jours > 1mm



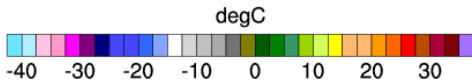
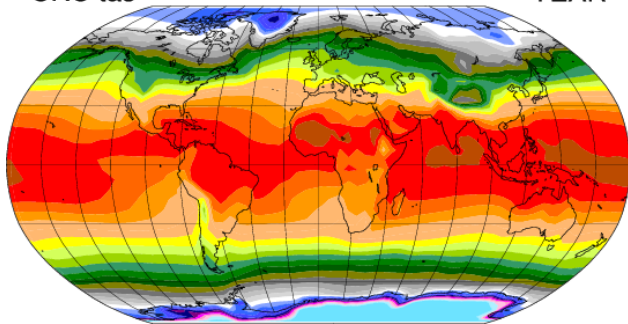
Source : Météo-France (normales 1981-2010).

Normales Monde – Température

- ▶ Il fait plus chaud aux tropiques qu'aux pôles.
- ▶ Il fait plus chaud en été qu'en hiver.

CRU tas

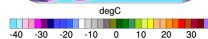
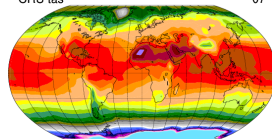
YEAR



Tracé à partir des données [CRU](#) 1961–1990.

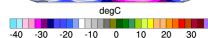
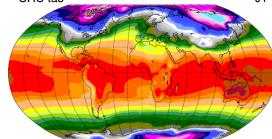
CRU tas

07



CRU tas

01

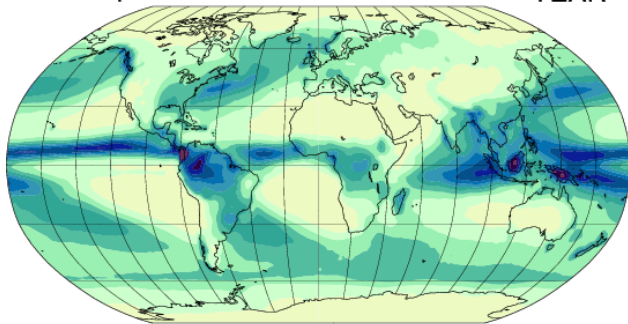


Normales Monde – Précipitations

- ▶ Il pleut plus aux tropiques qu'ailleurs : c'est l'**ITCZ**.
- ▶ L'ITCZ est légèrement décentrée et migre avec les saisons (moussons).

GPCP pr

YEAR

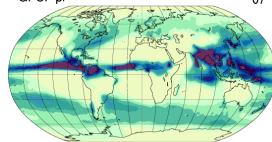


mm.day-1



GPCP pr

07

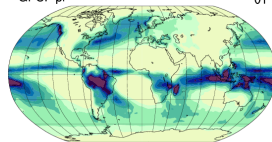


mm.day-1



GPCP pr

01



mm.day-1



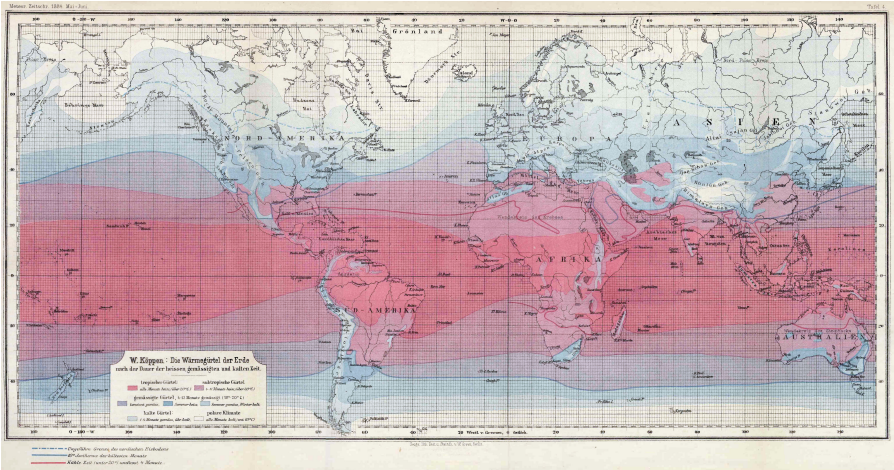
Tracé à partir des données **GPCP** 1981–2010.

Classification des climats



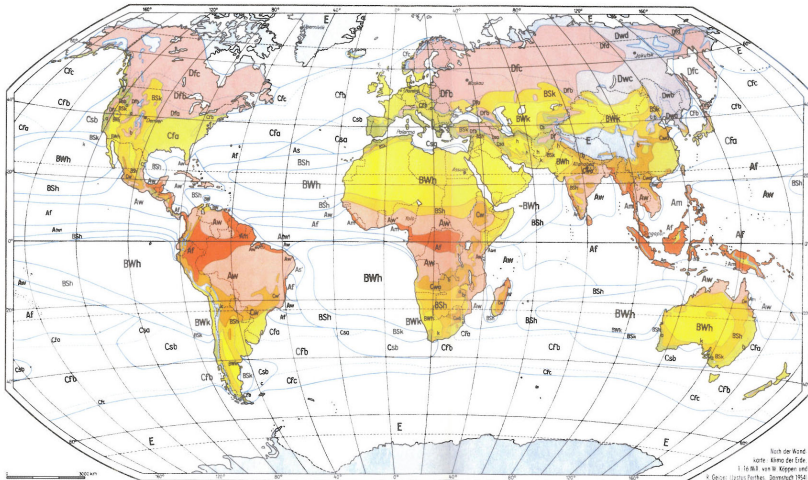
W.-P. Köppen
(1846–1940)

Classification des climats – Köppen (1884)



Source : Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet, Köppen (1884).

Classification des climats – Köppen & Geiger (1954)

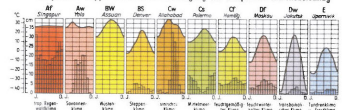


Nach der Karte: Klima der Erde, 1. Aufl. von W. Köppen und G. Geiger (1954).

KLIMAGEBIETE (Erläuterungen der Klimaformel)

- Erster Buchstabe:** A, C, D gemäß Wärme- u. Niederschlag für hochgelegene Baumwälder
- Zweiter Buchstabe:** w: weniger als 20 bei Winterregen, unter 2 (1-10) bei Sommerregen; W: Wüstenklima: w weniger als 1 bei Winterregen, weniger als 7-14 bei Sommerregen; f: alle Monate ausreichender Niederschlag (in Umvaldklima trotz Trockenk.); B: Monsunregen; s: Trockenzeit im Sommer d. betr. H. Halbkugel; w: Trockenzeit im Winter d. betr. H. Halbkugel; (w): d.egl., auf die andere Halbkugel übertragen; k: gleiche Regenzeit zum Herbst verrohden; h: kaltes Trockenklima (h über 10°); große Trockenzeit im Winter, klein im Sommer
- Dritter Buchstabe:** h: heißer Sommer, w: wärmerer Monat über 22°; w: wärmerer Sommer, w: wärmerer Monat unter 22°; m: milderer Sommer, m: milderer Monat über 10°; k: kühlerer Sommer, k: kühlerer Monat unter -30°; h: heißes Trockenklima (h über 10°); k: kaltes Trockenklima (k unter 10°)
- Klimagrenzlinien:** Grenzen von A, B, C, d im Bereich der A-, C- und D-Klimata; Grenzen von h und k im Bereich der Trockenklima
- Erklärung der Buchstaben:**
- A: Tropische Klimata: alle Monate über 18° Mitteltemperatur (°C)
 - B: Trockenklima: die Vegetation ändert unter Wassermangel
 - C: Warmgemäßigte Klimata: kältester Monat 18° bis -3°
 - D: Schneeklima: wärmerer Monat über 10°, kältester Monat unter -3°
 - E: Eisklima: wärmerer Monat unter 10°
- Temperatur:** Jahresmitteltemperatur (°C)
- Niederschlag:** Jahresniederschlag in mm

Beispiele für Köppens Klimazonen: Jahresgang von Temperatur und Niederschlag

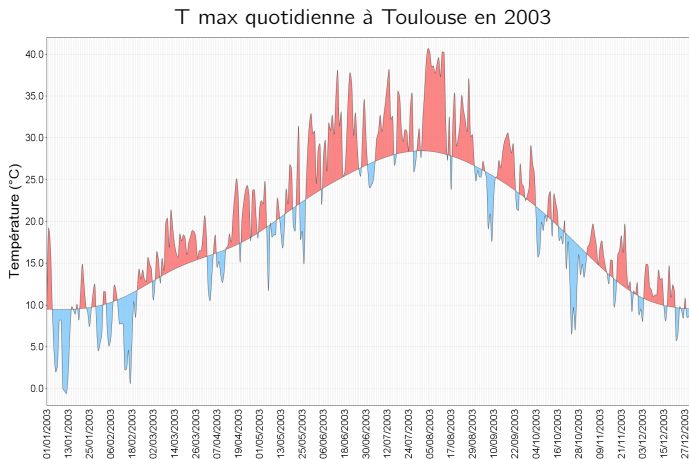


La notion de variabilité climatique

C'est pas normal, cette météo !



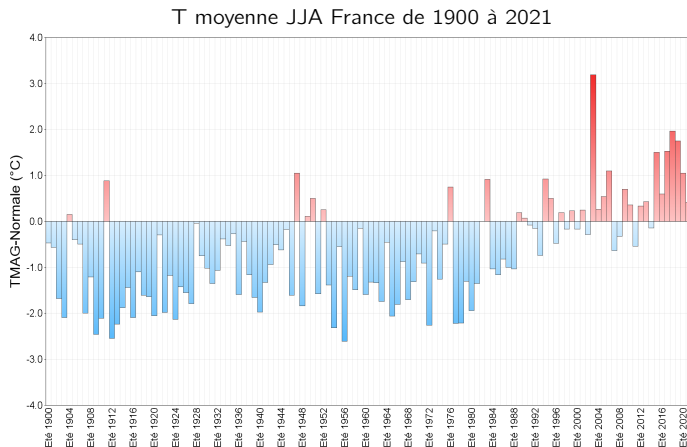
La notion de variabilité climatique – Jour à jour



Source : Météo-France.

À la normale se superpose une *variabilité* à toutes les échelles spatio-temporelles. Parfois, cette variabilité génère des *événements extrêmes* (ex. canicule 2003).

La notion de variabilité climatique – Inter-annuelle



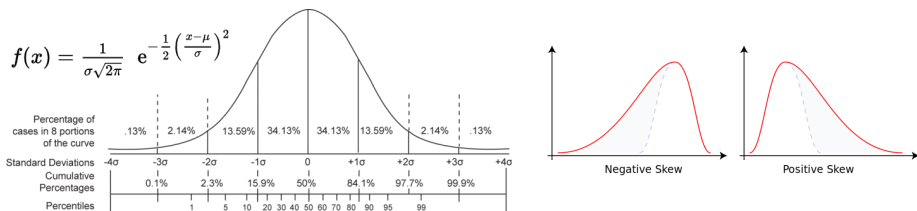
Source : Météo-France.

À la normale se superpose une *variabilité* à toutes les échelles spatio-temporelles. Parfois, cette variabilité génère des *événements extrêmes* (ex. canicule 2003).

Variabilité et extrêmes – Statistiques

- Pour quantifier la **variabilité**, on considère les **moments d'ordre > 1** .
 - **Variance** (écart-type²) : $\mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])^2]$, estimation via $\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i (x_i - \mu_x)^2$.
 - **Skewness** (asymétrie) : $\gamma_x = \mathbb{E}\left[\left(\frac{X - \mu_x}{\sigma_x}\right)^3\right]$.
 - **Kurtosis**, etc.

Exemple de la loi normale avec percentiles associés, et de l'effet du *skewness*



- Pour étudier les événements extrêmes observés :
 - quantiles (percentiles), nombre de déviations standards (σ) ;
 - théorie des valeurs records.

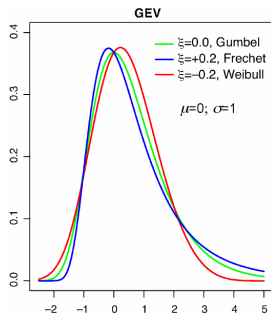
- Pour étudier les événements extrêmes **pas encore** observés :
 - théorie des valeurs extrêmes (EVT, cf. suite).

EVT – Familles de distributions

- Pour modéliser les valeurs maximales par *blocs*, on utilise la **Generalized Extreme Value Distribution*** :

$$\text{GEV}(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} .$$

- Regroupe 3 familles : **Gumbel** ($\xi = 0$), **Fréchet** ($\xi > 0$) et **Weibull** ($\xi < 0$).



- Pour modéliser les dépassements d'un seuil, on utilise la **Generalized Pareto Distribution*** :

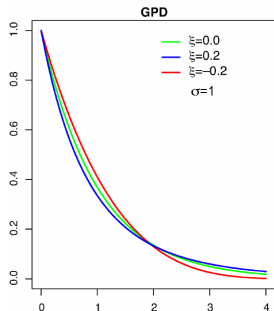
$$\text{GPD}(x; \mu, \sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} .$$

- Contient la loi **exponentielle** ($\xi = 0$) :

$$f(z) = 1 - e^{-z} \text{ avec } z = \frac{x - \mu}{\sigma} .$$

—

* cdfs où μ, σ, ξ paramètres de lieu, d'échelle et de forme.



- ▶ Ces lois sont utilisées pour le calcul de durées/niveaux de retour.

Exemple des P quotidiennes à Marignane

Ajustements Gumbel - GEV

DUREES DE RETOUR DE FORTES PRECIPITATIONS Episode : 1 jour - Loi GEV

Statistiques sur la période 1922-2006

DUREES DE RETOUR DE FORTES PRECIPITATIONS Episode : 1 jour - Méthode de Gumbel

Statistiques sur la période 1922-2006
sous-période : du 31 Janvier au 31 Décembre

MARIGNANE (13)

Inaltéif. 13004001, alt. 0 m., lat. 43°28'30" N, lon. 00°13'28"E

GRAPHIQUE D'AJUSTEMENT

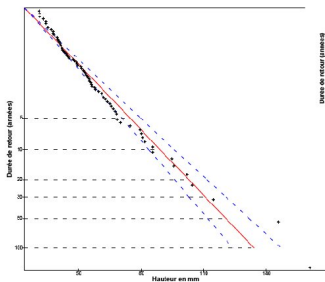
La droite donne la hauteur de précipitations estimée pour une durée de retour exprimée en années.
Les observations sont pointées. L'intervalle de confiance à 70 % est représenté en pointillés.

MARIGNANE (13)

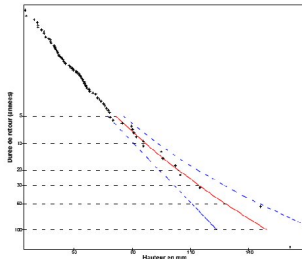
Inaltéif. 13004001, alt. 0 m., lat. 43°28'30"

GRAPHIQUE D'AJUSTEMENT

La droite donne la hauteur de précipitations estimée pour une durée de retour exprimée en années.
Les observations sont pointées. L'intervalle de confiance à 70 % est représenté en pointillés.



Page 2/2

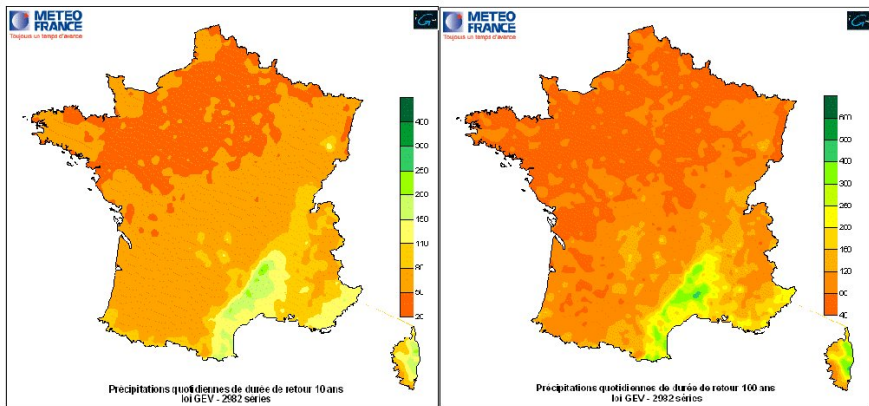


Page 2/2

EVT – Exemple d'application 2/2

- ▶ Ces lois sont utilisées pour le calcul de **durées/niveaux de retour**.

Exemple des niveaux de retour 10 et 100 ans des P quotidiennes (GEV + interpolation)



Source : Météo-France.

Projection climatique vs. prévision météo

Le climat ? Pff. On sait même pas prévoir la météo !



Projection climatique vs. prévision météo – Philosophie

Climat vs. météo = distribution vs. réalisation.

Prévision météo : déterminer une trajectoire.

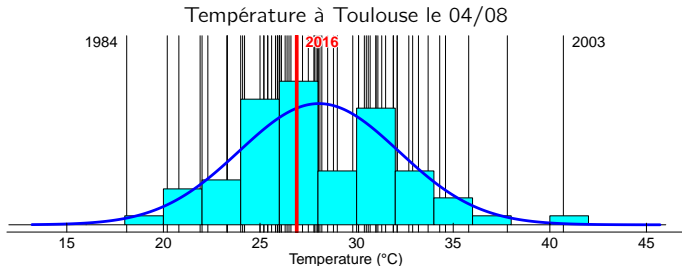
Importance des **conditions initiales** (limite théorique à qq jours, E. Lorenz).

→ *Quelle T fera-t-il le 04/08/2025 à Toulouse ? Réponse : ???.*

Projection climatique : estimer une distribution.

Importance des **grands équilibres physiques** (cf. suite du cours).

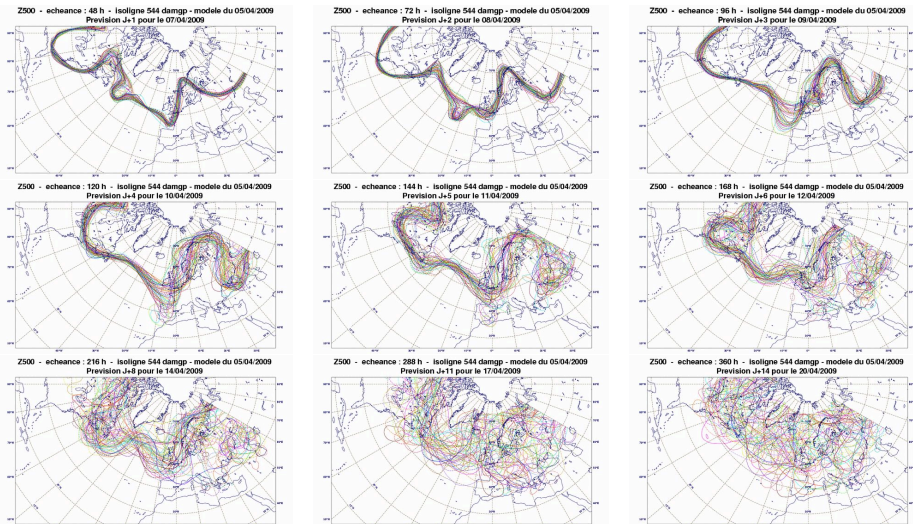
→ *A quelle T peut-on s'attendre ? Réponse : à la **distribution bleue**.*



Tracé à partir des données Météo-France (1947–2016).

Projection climatique vs. prévision météo – Illustration

Exemple : prévision ensembliste de 14 jours | Isocontour de Z500 à 5440 m

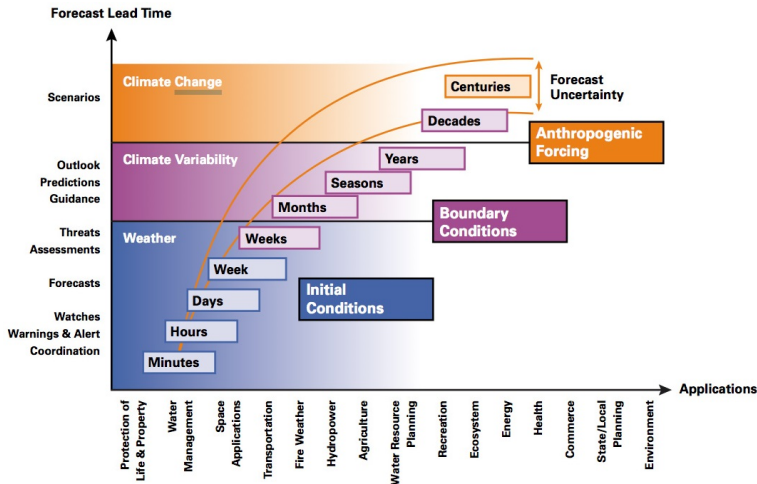


Source : Météo-France, figures empruntées au cours de B. Pohl (CRC).

Projection climatique vs. prévision météo – Continuum ?

De la météo au climat sans couture (*seamless*) ?

Modèles numériques de + en + proches, généralisation de l'utilisation d'ensembles (approche probabiliste), exploration d'échéances intermédiaires (e.g. saison), etc.



Source : OMM.

Résumé

Le **climat** est la distribution probabiliste des **météos** possibles (T, P, V etc.).

Au premier ordre, il peut être décrit par sa moyenne → par définition, la météo n'est jamais **normale** (notion de **variabilité**, cf. cours n°3).

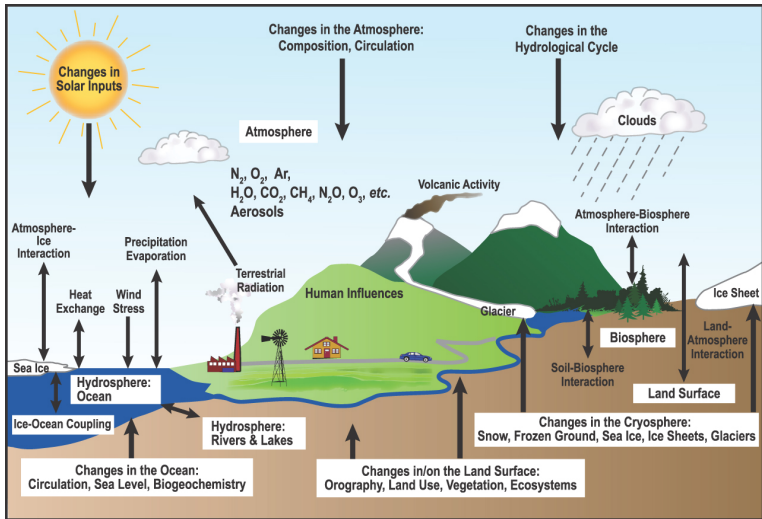
La prévision du temps (météo) est bornée à quelques jours (théorie du chaos), mais sa distribution de probabilité (climat) est déterminée par de **grands équilibres physiques** (cf. suite).

Introduction au climat

Systeme climatique

Composantes du système climatique

Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



Source : IPCC AR4 (2007) FAQ 1.2 Fig. 1.

Atmosphère – Composition

Air sec

Gaz	Fraction du volume
N ₂	78.1 %
O ₂	20.9 %
A	0.9 %
CO ₂ *	0.04 % = 400 ppm
Ne	18 ppm
He	5.2 ppm
CH ₄ *	1.8 ppm = 1800 ppb
Kr	1140 ppb
H ₂	550 ppb
NO	500 ppb
N ₂ O*	300 ppb
Xe	90 ppb
O ₃	50 ppb
...	

* évoluent actuellement rapidement.

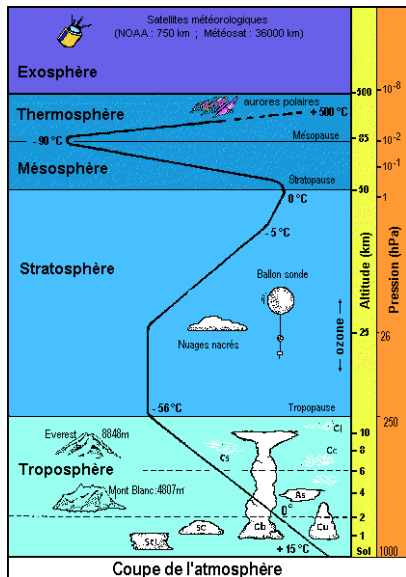
+ Vapeur d'eau

De 0 à 5 % selon le lieu et l'instant.

Exemple de contenu total en vapeur d'eau quotidien

Tracé à partir des données [ERA-Interim](#) (Janvier 2014).

Atmosphère – Structure verticale



Source : Cours de J.-L. Dufresne.

La pression diminue avec l'altitude.
Équilibre hydrostatique :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \Rightarrow p(z) = p_s e^{-z/H}$$

Dans la troposphère, la température diminue avec l'altitude.

Lapse rate (variable en temps & espace) :

$$\Gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} \sim 6.5 \text{ K.km}^{-1}$$

Dans la stratosphère, la température augmente avec l'altitude.

Absorption UV par O₃ vers 30–50 km.

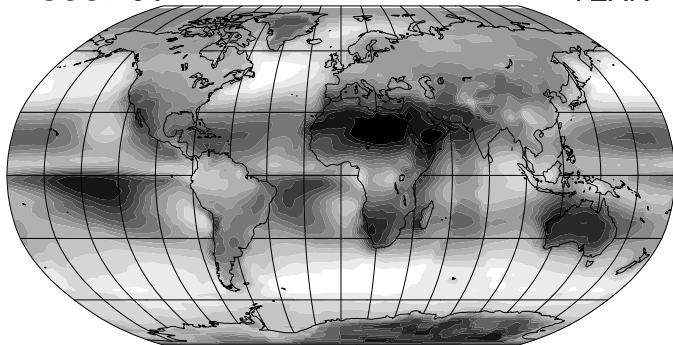
Atmosphère – Importance des nuages

- Les **nuages** influencent le bilan radiatif du système (cf. suite) : contribution à l'*albédo* planétaire et absorption dans l'infra-rouge.

Exemple de la couverture nuageuse

ISCCP clt

YEAR



%



30 40 50 60 70 80 90

Tracé à partir des données **ISCCP** 1983–2009.

Océans – Généralités

- ▶ 71 % de la surface du globe.
- ▶ 3700 m de profondeur moyenne.
- ▶ Composés à 96.5 % d'eau et à 3.5 % de matières dissoutes (principalement sels + particules, gaz, matière organique).

Définition de la *salinité*

Poids des matières dissoutes (en g) dans 1 kg d'eau de mer. Mesurée en ‰ ou *psu*.

La pression augmente avec la profondeur. Équilibre hydrostatique.

La densité augmente avec la pression et la salinité. Océan bien stratifié.

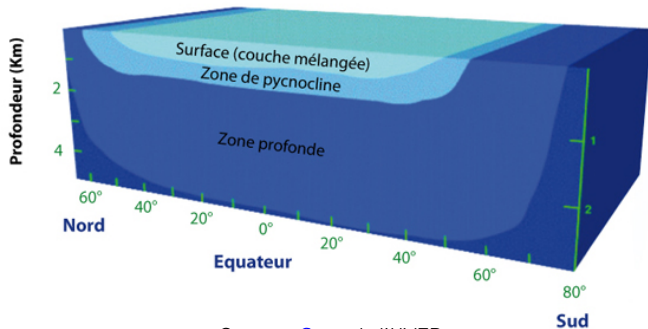
La salinité influence le point de congélation. $T = -1.8 \text{ °C}$ pour 35 *psu*.

Océans – Structure verticale

Mixed layer (~ 0 à 100 m) – En contact avec l'atmosphère, bien mélangée par vents de surface (surtout en hiver), présence d'une *thermocline* saisonnière.

Intermediate layer (~ 100 à 1500 m) – Bien stratifiée, très fort gradient vertical de T (~ 20 °C, *thermocline* permanente).

Deep layer (~ 1500 à 4000 m) – Bien stratifiée, très faible gradient vertical (~ 2 – 3 °C).



Source : Cours de l'UVED.

Cryosphère

- Fort *albédo*.
- Rôle d'isolant.
- Influence niveau marin.

Neige

NH : 4 à 47 10⁶ km²

SH : 0.1 à 1 10⁶ km²

Banquise (2 à 10 psu)

NH : 6 à 14 10⁶ km²

SH : 2 à 15 10⁶ km²

Calottes (+ shelves)

Antarctique : 14 10⁶ km²

→ 65 m de niveau marin

Groenland : 2 10⁶ km²

→ 6.6 m de niveau marin

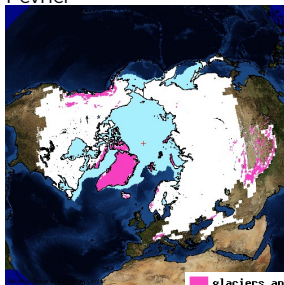
Glaciers

0.7 10⁶ km² → 0.5 m

+ Permafrost

11 à 23 10⁶ km²

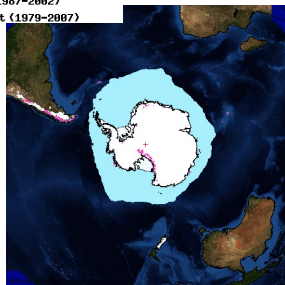
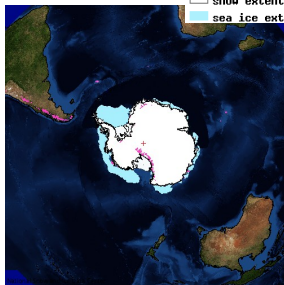
Février



Août



■ glaciers and permanent land ice
■ snow extent (1987-2002)
■ sea ice extent (1979-2007)

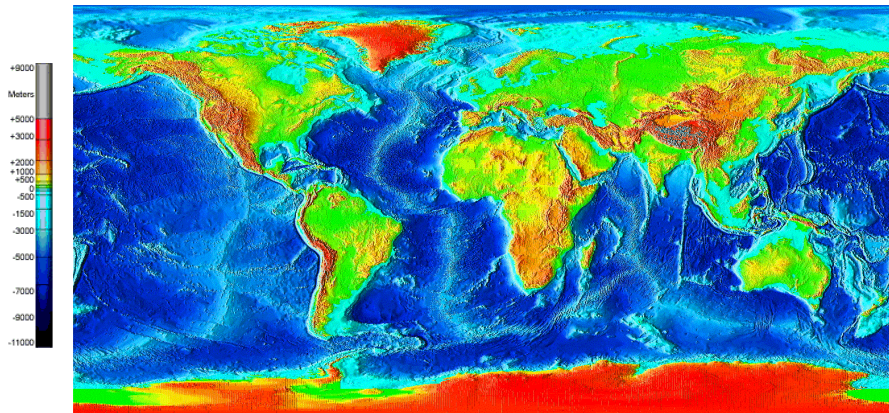


Source : Atlas of the Cryosphere ([NSIDC](#)).

Surfaces continentales et biosphère terrestre – Géographie

- ▶ Les continents sont principalement situés dans l'hémisphère Nord.
- ▶ Les reliefs influencent les circulations atmosphérique et océanique.

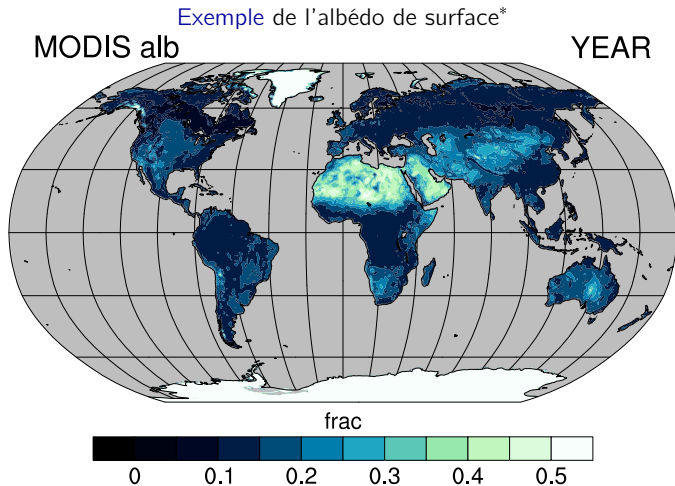
Relief continental et bathymétrie océanique



Source : [Etopo2v2](#).

Surfaces continentales et biosphère terrestre – Végétation

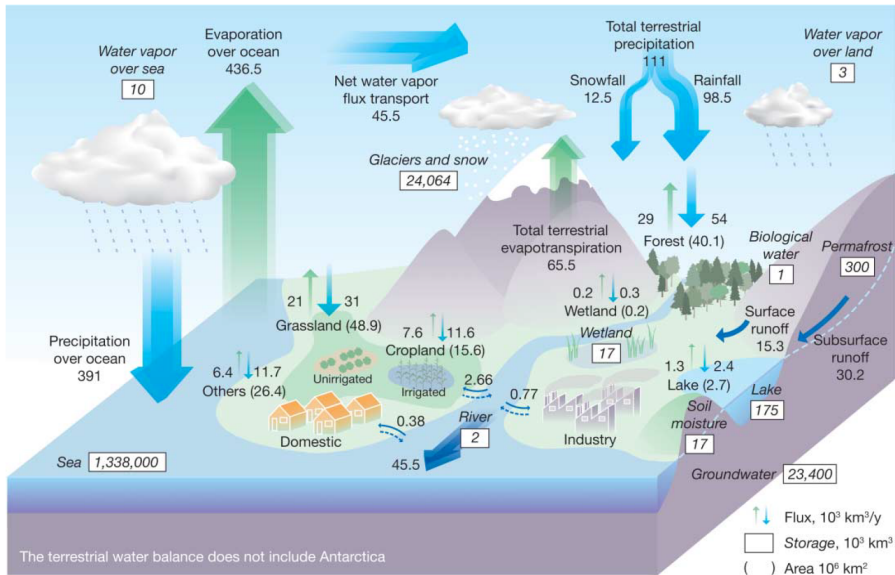
- ▶ La **végétation** influence l'*albédo* de surface, le cycle de l'eau, le cycle du carbone et la rugosité de surface.



Tracé à partir des données MODIS 2001–2013. Albédo océans : 0.05 à 0.1.

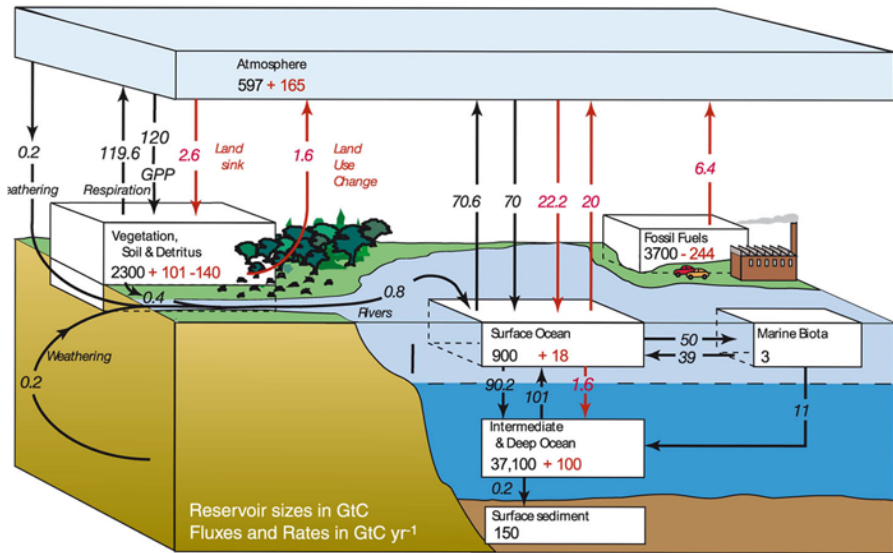
* **Attention** : ne pas confondre **albédo de surface** et **albédo planétaire** (vu de l'espace).

Interactions entre composantes – Exemple du cycle hydrologique



Source : Oki and Kanae (Science, 2006).

Interactions entre composantes – Exemple du cycle du carbone



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 7.3.

Résumé

Le **système climatique** regroupe les différentes enveloppes superficielles et leurs interactions.

Chaque **composante** a des caractéristiques propres : propriétés radiatives, inertie dynamique, capacité calorifique, etc.

On sait décrire chaque composante, et chaque interaction entre composantes, par des lois physiques, chimiques, biologiques, etc. ; cela permet de **modéliser** le système climatique (cf. cours n°2 [un peu] et 4 [beaucoup]).

Références I

- ▶ W.P. Köppen and R. Geiger, *Klima der Erde (map)*, Justus Perthes, Darmstadt (1954).
- ▶ W.P. Köppen, *Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet*.
- ▶ T. Oki and S. Kanae, *Global Hydrological Cycles and World Water Resources*, *Science* **313** (2006), no. 5790, 1068–1072.
- ▶ S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, et al., *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*, Cambridge University Press, 2007.