

# Attribuer un événement météorologique extrême au changement climatique : le problème de la définition

Julien Cattiaux

Aurélien Ribes

Centre National de Recherches Météorologiques  
(UMR CNRS/Météo-France)

[julien.cattiaux@meteo.fr](mailto:julien.cattiaux@meteo.fr) | [@julienc4ttiaux](https://twitter.com/julienc4ttiaux)

Séminaire MIAT, INRA, Auzeville | 16 mars 2018

Météo, climat, changement climatique

Évolution des événements météo extrêmes

Attribuer un événement singulier

Le problème de la définition

Météo, climat, changement climatique

Évolution des événements météo extrêmes

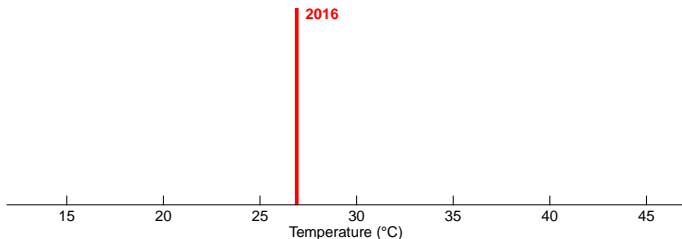
Attribuer un événement singulier

Le problème de la définition

# Météo vs. climat

Aujourd'hui (4 août 2016), à Toulouse, il fait **27 °C** : c'est la **météo**.

Température à Toulouse le 4 août



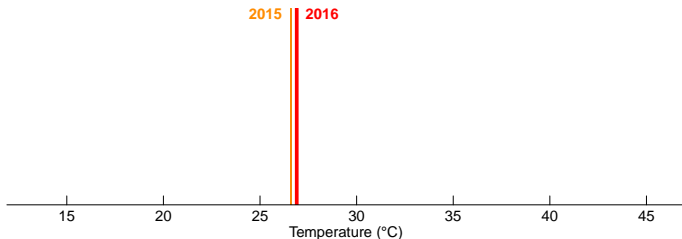
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo vs. climat

Aujourd'hui (4 août 2016), à Toulouse, il fait **27 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**) : c'est le **climat**.

Température à Toulouse le 4 août



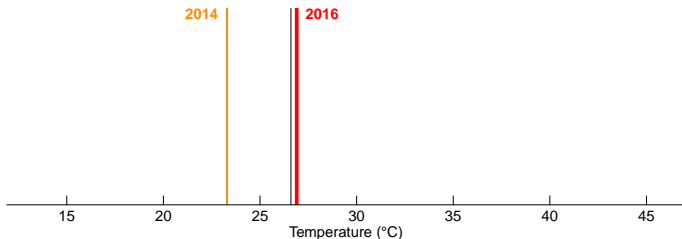
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo vs. climat

Aujourd'hui (4 août 2016), à Toulouse, il fait **27 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**) : c'est le **climat**.

Température à Toulouse le 4 août



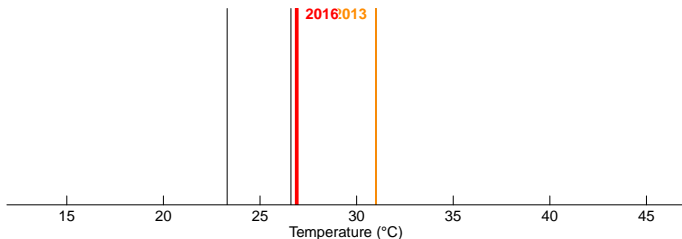
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo vs. climat

Aujourd'hui (4 août 2016), à Toulouse, il fait **27 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**) : c'est le **climat**.

Température à Toulouse le 4 août



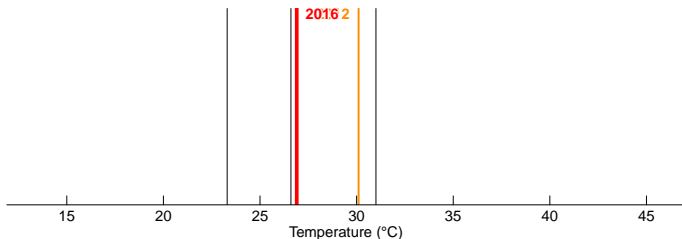
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo vs. climat

Aujourd'hui (4 août 2016), à Toulouse, il fait **27 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**) : c'est le **climat**.

Température à Toulouse le 4 août



Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

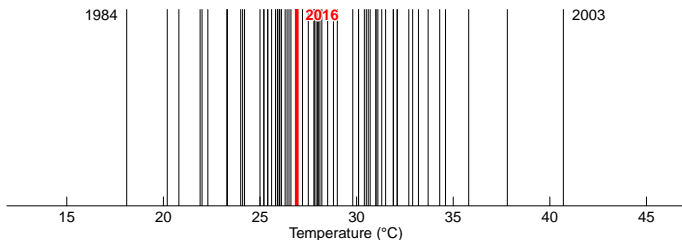


# Météo vs. climat

Aujourd'hui (4 août 2016), à Toulouse, il fait **27 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**) : c'est le **climat**.

Température à Toulouse le 4 août

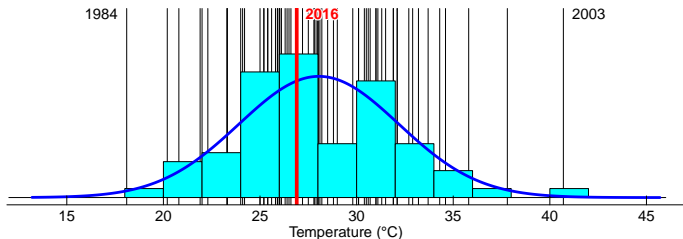


Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo vs. climat

Aujourd'hui (4 août 2016), à Toulouse, il fait **27°C** : c'est la **météo**.  
Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**) : c'est le **climat**.

Température à Toulouse le 4 août



Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

Le climat est la distribution de probabilité de la **météo**.

**Météo** : importance des **conditions initiales** (effet papillon, chaos).

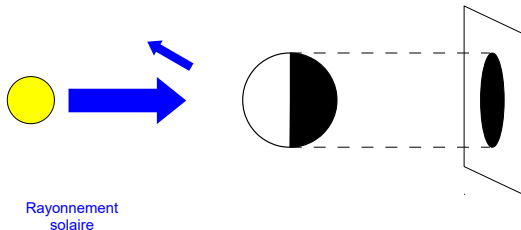
**Climat** : importance des **grands équilibres physiques** (conservation énergie, etc.).

# Physique du climat

Systeme = Atmosphere ↔ Océans ↔ Cryosphere ↔ Continents ↔ Biosphere

# Physique du climat

Systeme = Atmosphere ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère

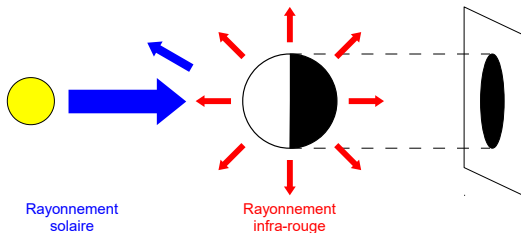


Énergie entrante :  $E_{solaire} = (1 - \alpha) S_0 \times \pi R^2$ .

avec  $\alpha$  albédo planétaire (0.3),  $S_0$  constante solaire ( $1368 \text{ W.m}^{-2}$ ), et  $R$  rayon terrestre.

# Physique du climat

Système = Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



Énergie entrante :  $E_{\text{solaire}} = (1 - \alpha) S_0 \times \pi R^2$ .

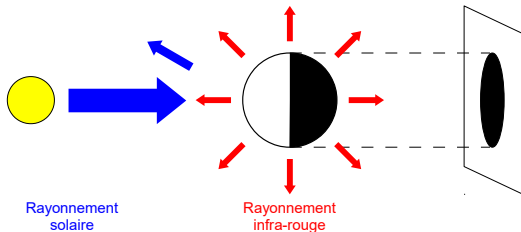
avec  $\alpha$  albédo planétaire (0.3),  $S_0$  constante solaire ( $1368 \text{ W.m}^{-2}$ ), et  $R$  rayon terrestre.

Énergie sortante :  $E_{\text{infra-rouge}} = \sigma T_e^4 \times 4\pi R^2$ .

avec  $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ), et  $T_e$  température d'émission.

# Physique du climat

Système = Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



Énergie entrante :  $E_{\text{solaires}} = (1 - \alpha) S_0 \times \pi R^2$ .

avec  $\alpha$  albédo planétaire (0.3),  $S_0$  constante solaire ( $1368 \text{ W.m}^{-2}$ ), et  $R$  rayon terrestre.

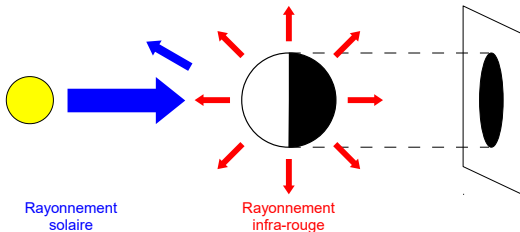
Énergie sortante :  $E_{\text{infra-rouge}} = \sigma T_e^4 \times 4\pi R^2$ .

avec  $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ), et  $T_e$  température d'émission.

À l'équilibre, le système doit donc émettre à  $T_e = 255 \text{ K}$ .

# Physique du climat

Système = Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



Énergie entrante :  $E_{\text{solaires}} = (1 - \alpha) S_0 \times \pi R^2$ .

avec  $\alpha$  albédo planétaire (0.3),  $S_0$  constante solaire ( $1368 \text{ W.m}^{-2}$ ), et  $R$  rayon terrestre.

Énergie sortante :  $E_{\text{infra-rouge}} = \sigma T_e^4 \times 4\pi R^2$ .

avec  $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ), et  $T_e$  température d'émission.

À l'équilibre, le système doit donc émettre à  $T_e = 255 \text{ K}$ .

Or  $T_s = 288 \text{ K}$  à la surface... la différence est due à l'**effet de serre**.

# Effet de serre



J.-B.-J. Fourier  
(1768–1830)



J. Tyndall  
(1820–1893)



# Effet de serre

La température [de surface] peut être augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacle pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure.

Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires (Annales de Chimie et de Physique, 1824).



J.-B.-J. Fourier  
(1768–1830)



J. Tyndall  
(1820–1893)

# Effet de serre

La température [de surface] peut être augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacle pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure.

Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires (Annales de Chimie et de Physique, 1824).



J.-B.-J. Fourier  
(1768–1830)



J. Tyndall  
(1820–1893)

Aqueous vapour is an invisible gas [but] no doubt can exist on the extraordinary opacity of this substance to the rays of obscure heat. [...] Similar remarks would apply to the carbonic acid diffused through the air [and] any of the stronger hydrocarbon vapours.

On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours (1859)  
et On radiation through the Earth's atmosphere (1863).

# Changement climatique – De la théorie aux premières observations

Every variation of these constituents (aqueous vapour, carbonic acid, hydrocarbon vapours) must produce a change of climate.

On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours (1859)  
et On radiation through the Earth's atmosphere (1863).



J. Tyndall  
(1820–1893)



S. Arrhenius  
(1859–1927)

If the quantity of carbonic acid increases in geometric progression, the augmentation of the temperature will increase nearly in arithmetic progression.

On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground  
(Philosophical Magazine and Journal of Science, 1896).

By fuel combustion man has added about 150,000 million tons of carbon dioxide [41 GtC] to the air during the past half century [...] world temperatures have increased at a rate of 0.005 °C. per year.

The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature (1938).



G. Callendar  
(1898–1964)

# Changement climatique – Observations actuelles

Depuis l'ère pré-industrielle, l'Homme a émis  $\sim 600$  GtC.

→ La concentration de  $\text{CO}_2$  est passée de 280 à 400 ppm.

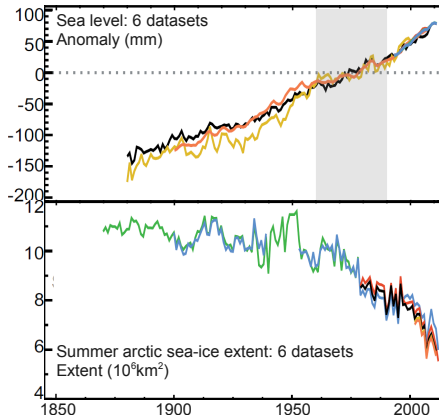
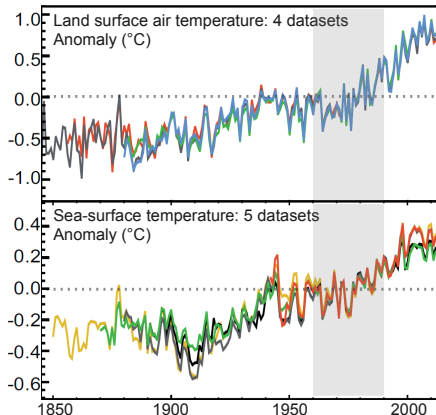
# Changement climatique – Observations actuelles

Depuis l'ère pré-industrielle, l'Homme a émis  $\sim 600$  GtC.

→ La concentration de  $\text{CO}_2$  est passée de 280 à 400 ppm.

L'excès d'énergie par effet de serre additionnel réchauffe le système climatique.

→ Augmentation de  $T_s$ , élévation du niveau marin, fonte de la cryosphère, etc.



IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

# Changement climatique – Attribution

Question : le changement climatique est-il causé par l'Homme ?

# Changement climatique – Attribution

**Question** : le changement climatique est-il causé par l'Homme ?

**Réponse** : avec les modèles, on peut rejouer le climat du monde **factuel** et celui d'un monde **contrefactuel** sans perturbation anthropique.

Tests statistiques, problématique de rapport signal sur bruit.

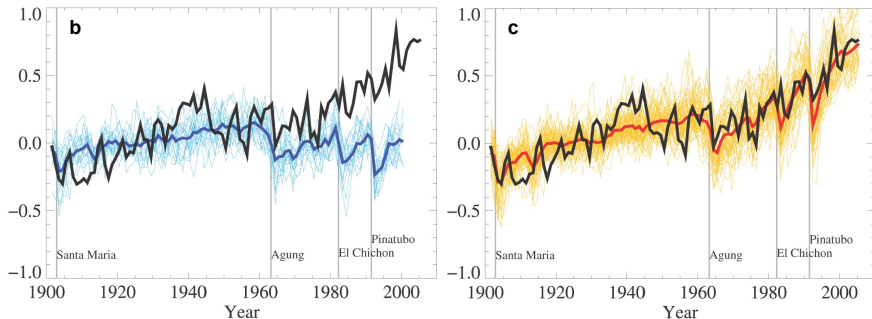
# Changement climatique – Attribution

**Question :** le changement climatique est-il causé par l'Homme ?

**Réponse :** avec les modèles, on peut rejouer le climat du monde **factuel** et celui d'un monde **contrefactuel** sans perturbation anthropique.

Tests statistiques, problématique de rapport signal sur bruit.

**Exemple :** T moyenne globale annuelle (obs en noir)



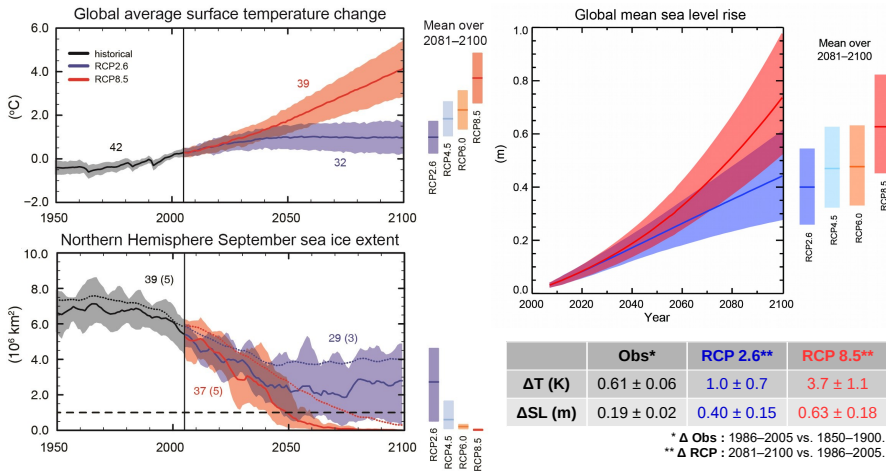
IPCC AR4 (2007) Figure 9.5.



# Changement climatique – Projections futures

Selon le scénario d'évolution des GES, un climat à la carte.

À scénario donné, incertitude due à la modélisation et à la variabilité interne.

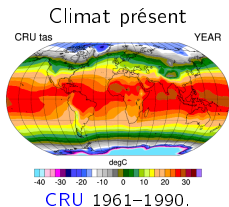


IPCC AR5 (2013) Figs. SPM7 & SPM9 et Table TS1.

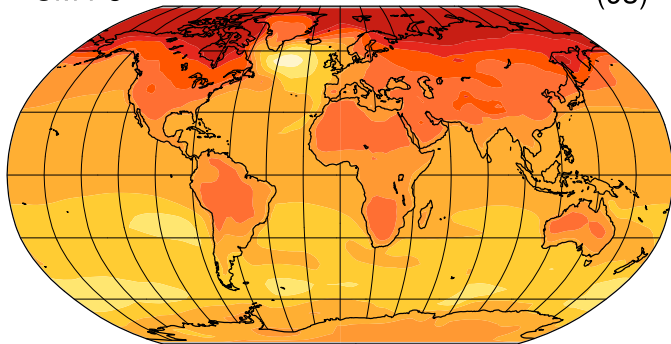
# Géographie du réchauffement de surface

Réchauffement plus fort sur **continents** que sur **océans** (inertie thermique).

**Amplification Arctique** due notamment à la fonte de la banquise.



CMIP5 Changement normalisé par  $\Delta T$  globale (93)



°C par °C de réchauffement global



0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75 2

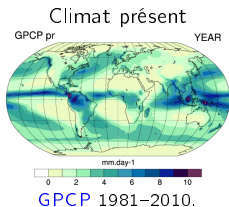
Tracé à partir de 93 projections **CMIP5** (multi-modèle et multi-scénario).

Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

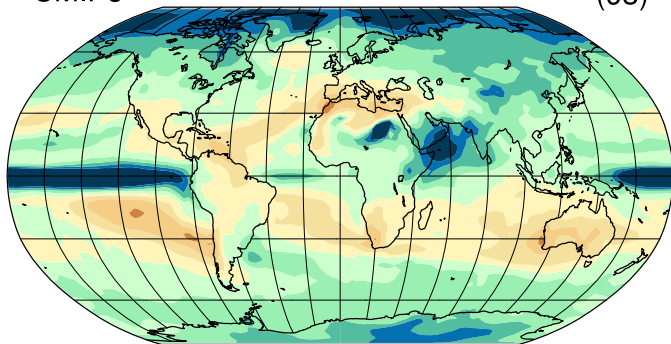
# Géographie des changements de précipitations

Clausius-Clapeyron : un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau.

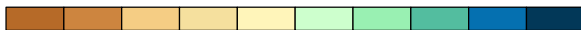
Intensification du cycle hydrologique, *wet get wetter, dry get drier*.



CMIP5 Changement normalisé par  $\Delta T$  globale (93)



% par °C de réchauffement global



-12 -9 -6 -3 0 3 6 9 12

Tracé à partir de 93 projections CMIP5 (multi-modèle et multi-scénario).

Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

Météo, climat, changement climatique

Évolution des événements météo extrêmes

Attribuer un événement singulier

Le problème de la définition

# Extrêmes météo vs. changement climatique

Rappel : le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Changer le climat, c'est modifier la probabilité de tous les événements météo.



France, Août 2003



Vendée, Février 2010



Pyrénées, Juin 2013

# Extrêmes météo vs. changement climatique

Rappel : le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Changer le climat, c'est modifier la probabilité de tous les événements météo.

Il n'existe pas de "mesure globale" des événements extrêmes.

Il faut s'interroger par type d'événements (canicules, cyclones, etc.).



France, Août 2003



Vendée, Février 2010



Pyrénées, Juin 2013

# Extrêmes météo vs. changement climatique

Rappel : le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Changer le climat, c'est modifier la probabilité de tous les événements météo.

Il n'existe pas de "mesure globale" des événements extrêmes.

Il faut s'interroger par type d'événements (canicules, cyclones, etc.).

Généralement, on se pose 3 questions :

- À quel(s) changement(s) s'attend-t-on ?
- Qu'observe-t-on déjà ?
- Peut-on l'attribuer à l'Homme ?



France, Août 2003



Vendée, Février 2010

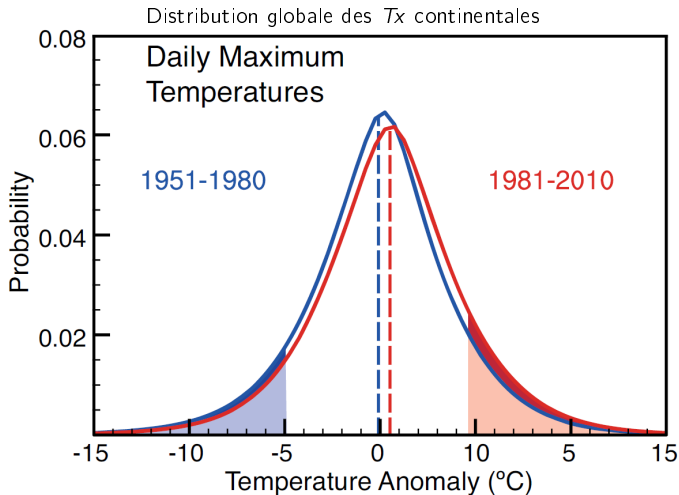


Pyrénées, Juin 2013

# Extrêmes de température – Distribution

Au 1<sup>er</sup> ordre, la distribution se décale (changement de **moyenne**).

Au 2<sup>nd</sup> ordre, légers changements de **variance** (ex. Europe : été ↗, hiver ↘).



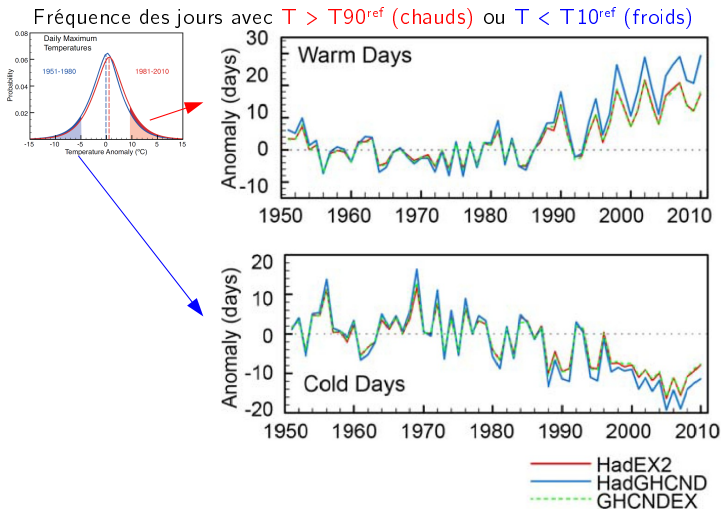
IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1.



# Extrêmes de température – Observations

→ **Jours chauds** plus probables, **jours froids** moins probables.

Transposable aux records, aux vagues de chaleur, aux vagues de froid, etc.



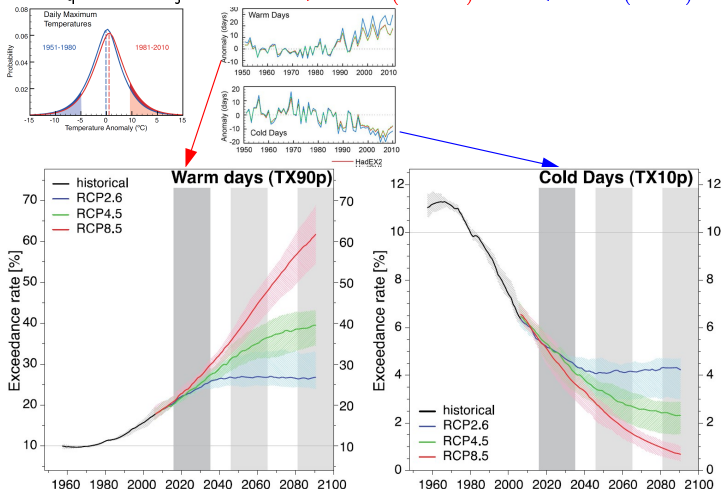
IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32.

# Extrêmes de température – Projections

→ **Jours chauds** plus probables, **jours froids** moins probables.

Transposable aux records, aux vagues de chaleur, aux vagues de froid, etc.

Fréquence des jours avec  $T > T_{90}^{ref}$  (chauds) ou  $T < T_{10}^{ref}$  (froids)



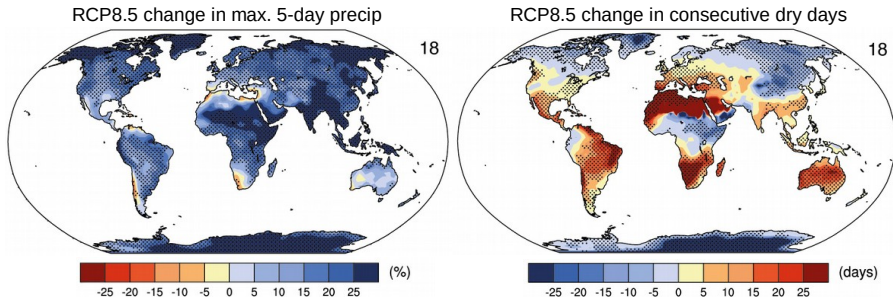
IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32 & Fig. 11.17.

# Extrêmes hydrologiques

Les extrêmes suivent l'intensification du cycle hydrologique.

- Augmentation attendue des fortes pluies, déjà partiellement observée (e.g. épisodes cévenols [Ribes et al. (2017)]).
- Augmentation attendue des sécheresses dans certaines régions (e.g. Méditerranée), mais pas détectée dans les observations.

Changements projetés de pluies intenses et de jours secs



2081–2100 vs. 1986–2005 | IPCC AR5 (2013) Fig. 12.26.

# Cyclones et tempêtes

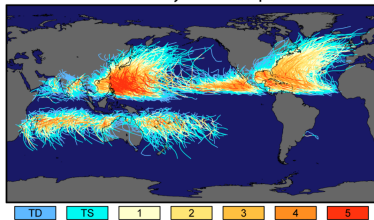
## Cyclones tropicaux

- se forment sous certaines conditions atmosphériques et océaniques, puis puisent leur énergie de la surface océanique.
- probablement **moins fréquents**, mais **plus intenses** (vents, précips, surcôtes).
- pas de signal observé.

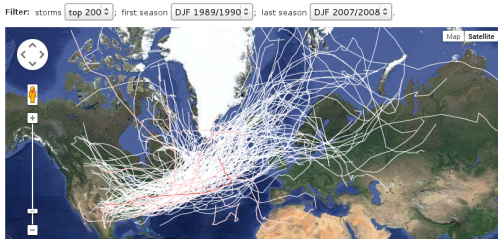
## Tempêtes extra-tropicales

- origine et énergie principalement atmosphérique.
- probable décalage vers les pôles, incertitudes sur fréquence/intensité.
- pas de signal observé.

Tracks and Intensity of All Tropical Storms



Saffir-Simpson Hurricane Intensity Scale  
Source : [NASA Earth Observatory](#).



Source : [Atlas](#) de l'Université de Reading.

Météo, climat, changement climatique

Évolution des événements météo extrêmes

Attribuer un événement singulier

Le problème de la définition

## La question

### **Ouragans Maria, Harvey, Irma, Jose... la faute au réchauffement climatique ?**

Tempête, vague de froid..., quels liens avec le changement climatique ?

La météo s'affole, la faute au climat?

Irma, nouvelle conséquence du changement climatique ?

**Incendies : la faute au réchauffement climatique?**

Ouragans : la faute au réchauffement climatique ?

### **Vague de froid : la faute au réchauffement climatique ?**

L'ouragan Harvey, symptôme du changement climatique ?

Tempêtes/avalanches: pas la faute du réchauffement (climatologue)

### **Vagues de chaleur de l'été 2017 : la faute au réchauffement climatique**

Source : presse française depuis 1 an.

# La réponse

En général, pas de causalité directe.

L'événement météo aurait pu se produire avec ou sans changement climatique.

En revanche le CC a pu modifier la probabilité de l'événement.

À la hausse ou à la baisse.

---

# La réponse

En général, pas de causalité directe.

L'événement météo aurait pu se produire avec ou sans changement climatique.

En revanche le CC a pu modifier la probabilité de l'événement.

À la hausse ou à la baisse.

---

On note :

$p_1$  la probabilité de l'événement dans le monde factuel ;

$p_0$  la probabilité de l'événement dans un monde contrefactuel.

Et on définit le **Risk Ratio** et la **Fraction of Attributable Risk** :

$$RR = \frac{p_1}{p_0} \quad \text{et} \quad FAR = \frac{p_1 - p_0}{p_1} = 1 - \frac{1}{RR}$$



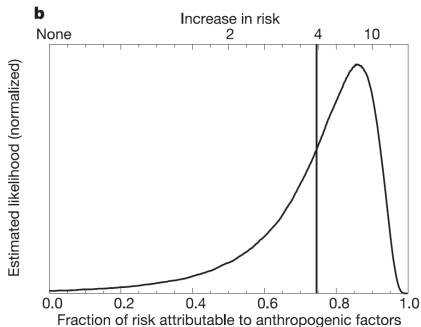
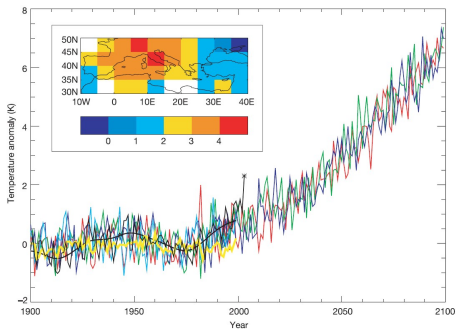
# Étude pionnière

Cas d'étude canonique : la canicule européenne de l'été 2003.

Stott et al., 2004 :

- monde factuel = simulations forcées par SST observées ;
- monde contrefactuel = simulations forcées par SST *désanthropisées* ;
- estimation empirique de  $p_1$  et  $p_0$ .

⇒ RR = 4 [2–10] ou FAR = 0.75 [0.50–0.90].



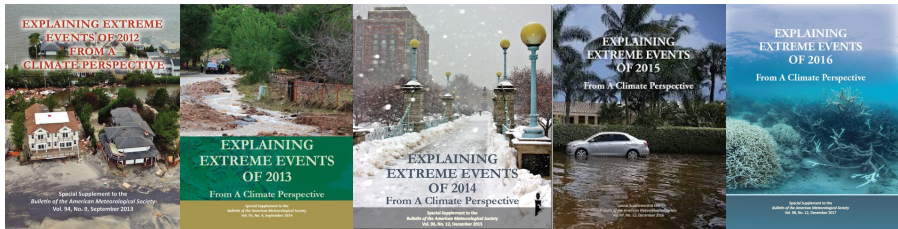
Stott et al., Nature, 2004.

# Depuis

Intérêt croissant dans la communauté climat.

Discussions sur classe d'événements, conditionnement (SST, circulation, etc.), construction monde contrefactuel (modèles ou obs), etc.

Création d'un numéro annuel du *Bulletin of American Meteorological Society*.



Météo, climat, changement climatique

Évolution des événements météo extrêmes

Attribuer un événement singulier

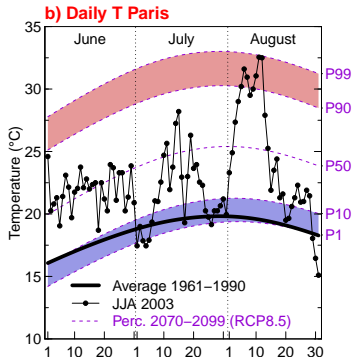
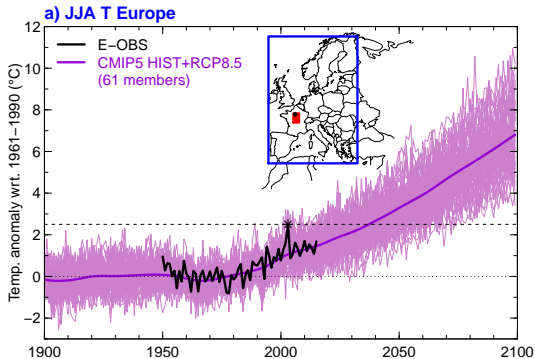
Le problème de la définition

# L'importance de la définition de l'événement

Été 2003 :

- **T saisonnière Europe** dans la moyenne du RCP8.5 en 2040.
- **T quotidienne France** début août vers le P90 du RCP8.5 en 2100.

Le message "changement climatique" dépend de la définition de l'événement, en particulier du choix de fenêtre spatio-temporelle.



# Échelle spatio-temporelle

## Études d'attribution en climat :

choix souvent arbitraire de région et/ou période prédéfinies.

## Suivi opérationnel en météo :

contraintes géopolitiques et/ou seuils législatifs (e.g. vigilance "canicule").

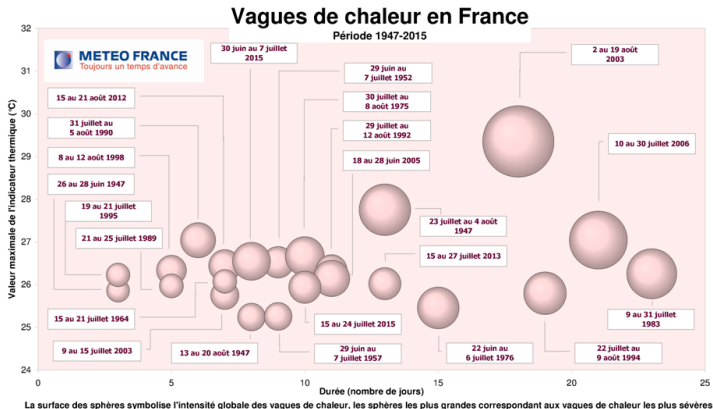


Figure empruntée à Michel Schneider (Météo-France).

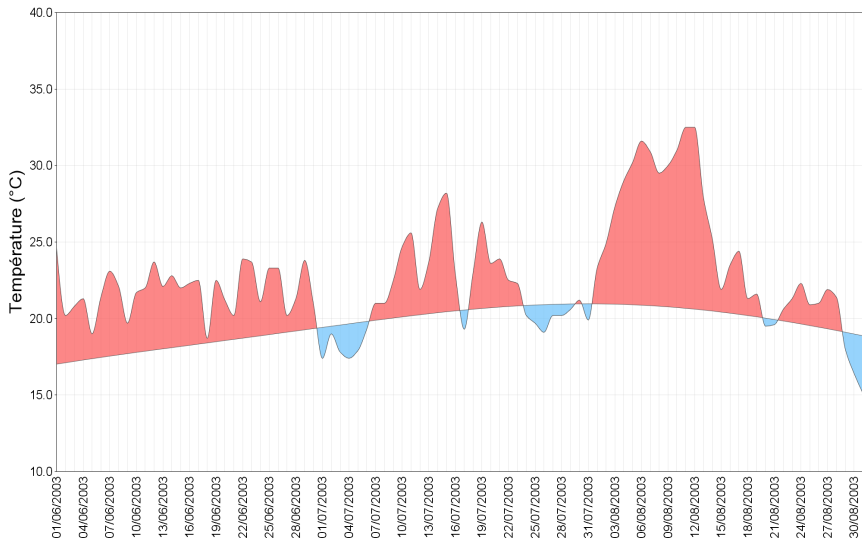
# Notre proposition

Sélectionner l'échelle s-t à laquelle l'événement a été le plus extrême,  
i.e. **minimiser la probabilité factuelle**  $p_1 = \Pr \{X^{(t_1)} \geq x_{t_1}\}$ .

avec  $X^{(t_1)}$  variable aléatoire décrivant toutes les températures possibles à l'année  $t_1 = 2003$ ,  
et  $x_{t_1}$  valeur observée en 2003.

# Dimension temporelle

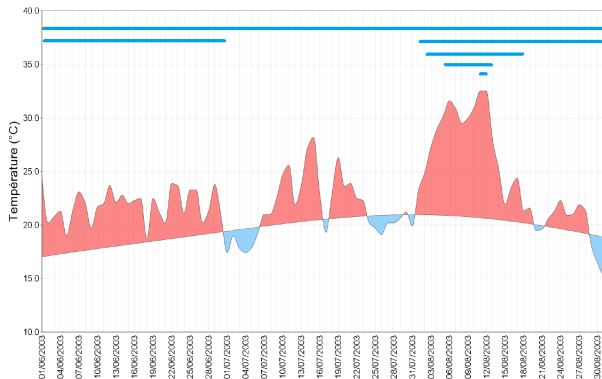
Exemple de  $T$  Paris-Montsouris Juin-Juillet-Août 2003



Source : Climascopie, Météo-France.

# Dimension temporelle

Exemple de  $T$  Paris-Montsouris Juin-Juillet-Août 2003



À votre avis, sur quelle fenêtre temporelle la  $T$  est-elle la plus extrême ?

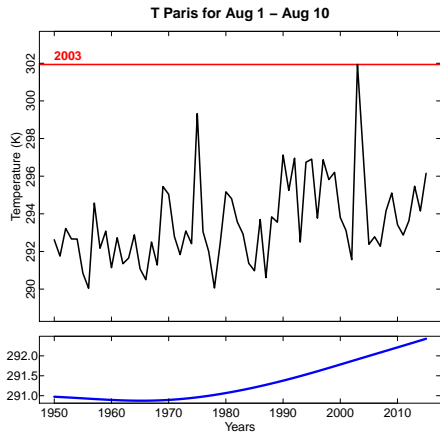
1. le 11 août ;
2. du 5 au 12 août ;
3. du 2 au 17 août ;
4. le mois d'août ;
5. le mois de juin ;
6. la saison JJA.



# Dimension temporelle – Méthode calendaire

Pour une fenêtre temporelle  $[[d_1, d_2]]$  :

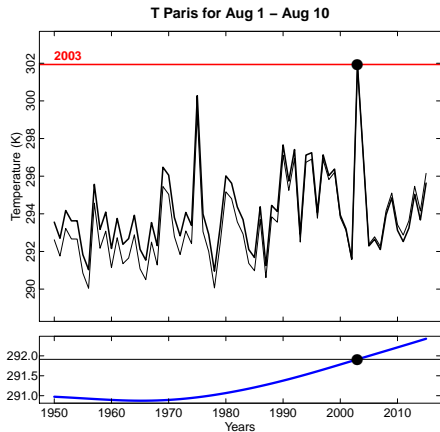
– on dispose de la série observée  $x_t$  et du signal climatique  $x_t^*$  (modèles) ;



# Dimension temporelle – Méthode calendaire

Pour une fenêtre temporelle  $[[d_1, d_2]]$  :

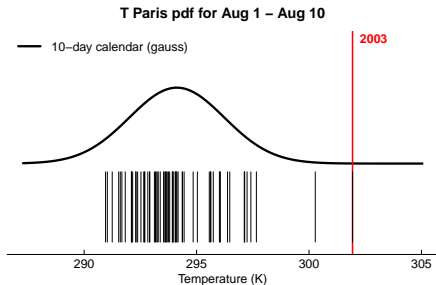
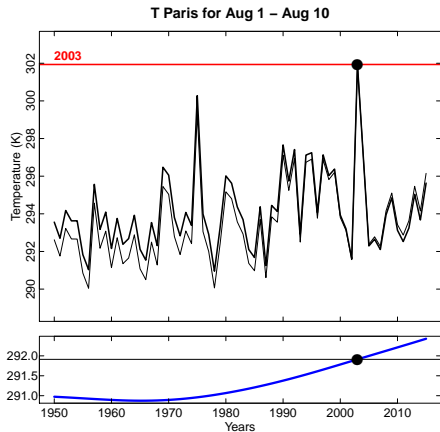
- on dispose de la série observée  $x_t$  et du signal climatique  $x_t^*$  (modèles) ;
- on ramène la série au climat de 2003 :  $x_t^{(t_1)} = x_t - (x_t^* - x_{t_1}^*)$  ;



# Dimension temporelle – Méthode calendaire

Pour une fenêtre temporelle  $[[d_1, d_2]]$  :

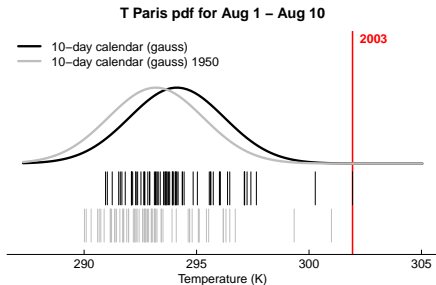
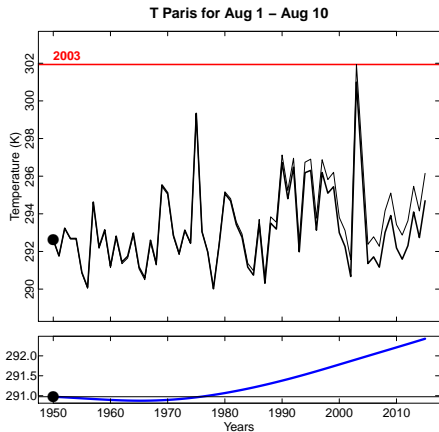
- on dispose de la série observée  $x_t$  et du signal climatique  $x_t^*$  (modèles) ;
- on ramène la série au climat de 2003 :  $x_t^{(t_1)} = x_t - (x_t^* - x_{t_1}^*)$  ;
- on estime empiriquement  $\rho_1$  (sous hypothèse loi normale, raisonnable) ;



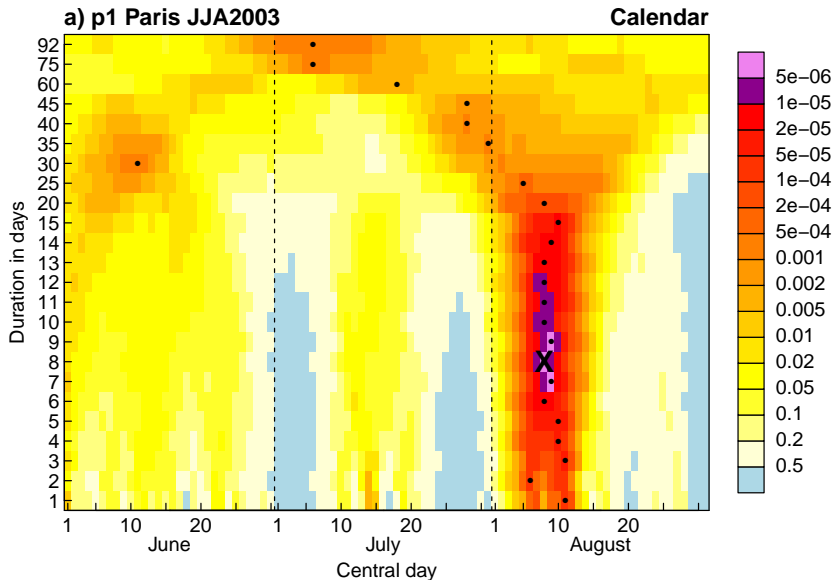
# Dimension temporelle – Méthode calendaire

Pour une fenêtre temporelle  $[[d_1, d_2]]$  :

- on dispose de la série observée  $x_t$  et du signal climatique  $x_t^*$  (modèles) ;
- on ramène la série au climat de 2003 :  $x_t^{(t_1)} = x_t - (x_t^* - x_{t_1}^*)$  ;
- on estime empiriquement  $\rho_1$  (sous hypothèse loi normale, raisonnable) ;
- on peut aussi estimer  $\rho_0$  en se ramenant à 1950 (notre monde contrefactuel).

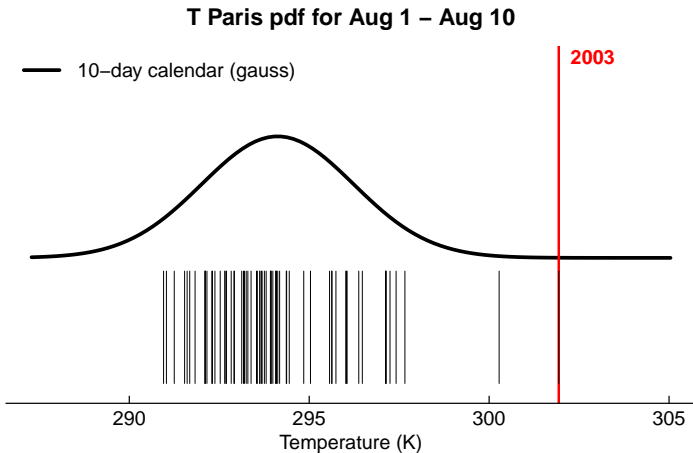


# Dimension temporelle – Résultat pour $p_1$



# Jours calendaires vs. max annuels

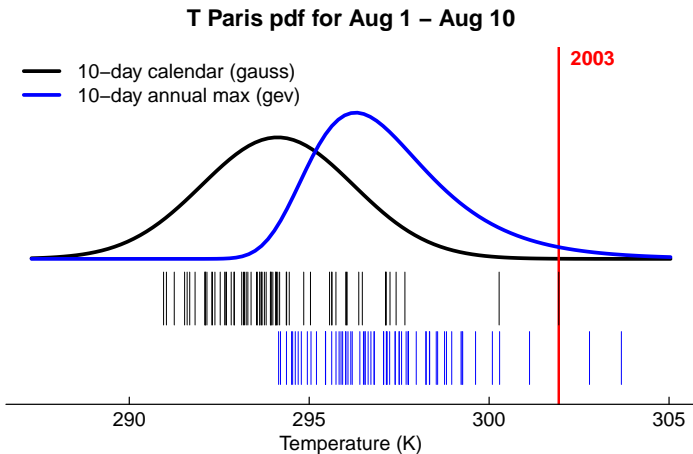
Approche calendaire utile au [suivi climatique](#) (contexte saisonnier),  
mais la  $p_1$  obtenue n'est pas une *vraie durée de retour*.



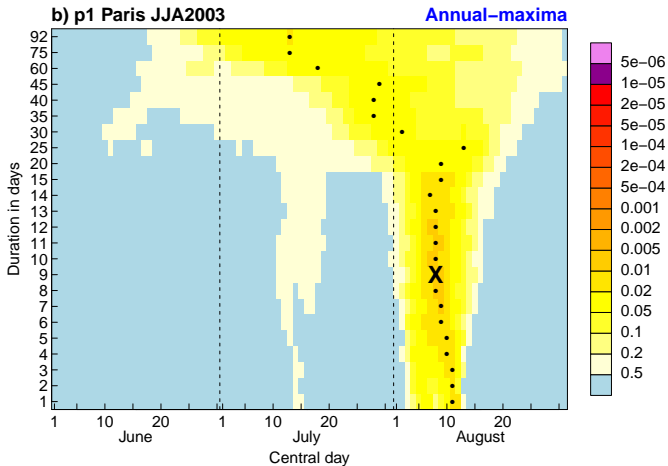
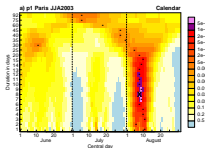
# Jours calendaires vs. max annuels

Approche calendaire utile au **suivi climatique** (contexte saisonnier),  
mais la  $p_1$  obtenue n'est pas une **vraie durée de retour**.

**Alternative** : se comparer aux **max annuels** (hypothèse loi Gumbel).



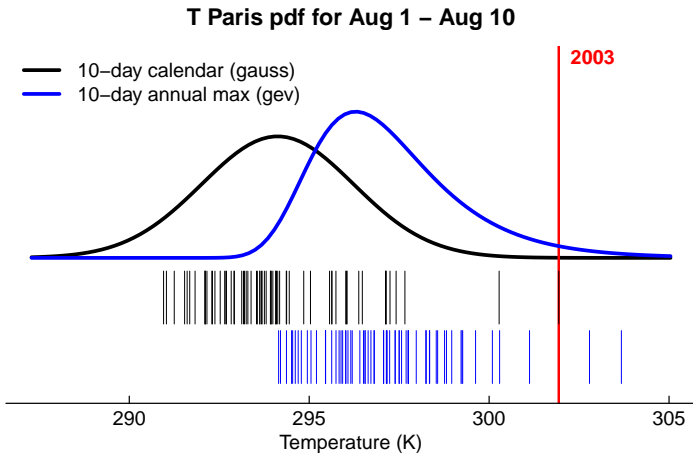
# Jours calendaires vs. max annuels – Résultat





# Un compromis : max locaux

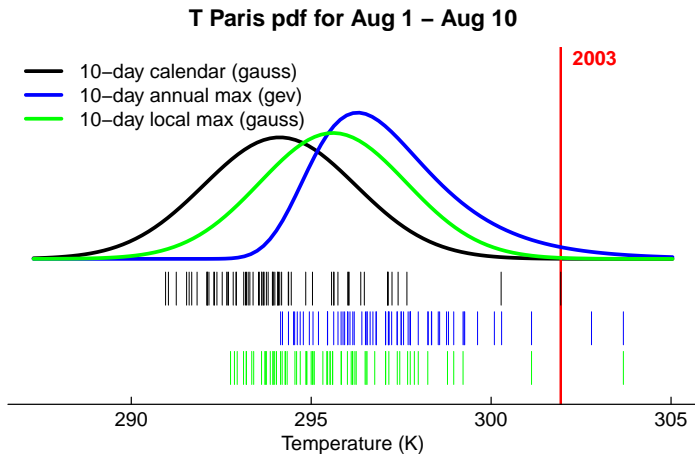
Idée : se comparer aux max dans un voisinage calendaire (similaire à l'étude des records).



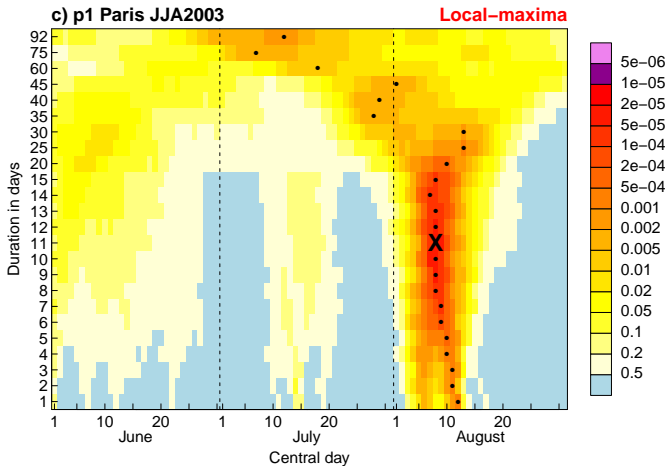
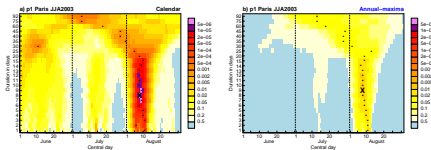
# Un compromis : max locaux

Idée : se comparer aux max dans un voisinage calendaire (similaire à l'étude des records).

Exemple : max locaux à  $\pm 7$  jours (hypothèse loi normale).



# Un compromis : max locaux - Résultat



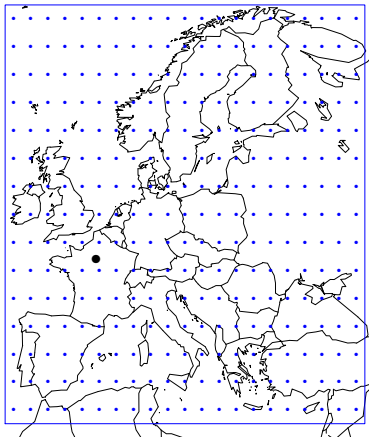
# Dimension spatiale – Méthode

**Idée** : minimiser  $p_1$  sur les périodes temporelles ET les domaines spatiaux.

On dispose de données obs et modèles sur une grille  $2.5 \times 2.5^\circ$ .

Contrainte : domaines carrés (ou presque) et contenant Paris.

**Domains of size 0x0 (1)**



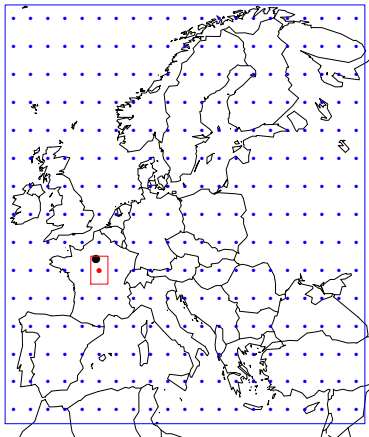
# Dimension spatiale – Méthode

Idée : minimiser  $p_1$  sur les périodes temporelles ET les domaines spatiaux.

On dispose de données obs et modèles sur une grille  $2.5 \times 2.5^\circ$ .

Contrainte : domaines carrés (ou presque) et contenant Paris.

**Domains of size 1x1 (1)**



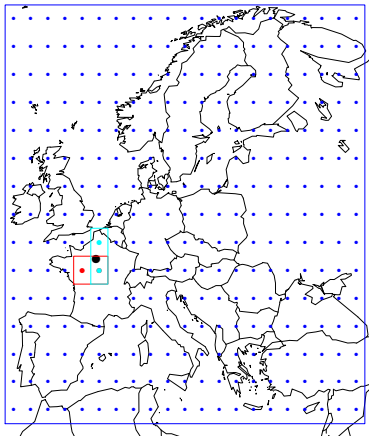
# Dimension spatiale – Méthode

Idée : minimiser  $p_1$  sur les périodes temporelles ET les domaines spatiaux.

On dispose de données obs et modèles sur une grille  $2.5 \times 2.5^\circ$ .

Contrainte : domaines carrés (ou presque) et contenant Paris.

Domains of size 2x1 (2)



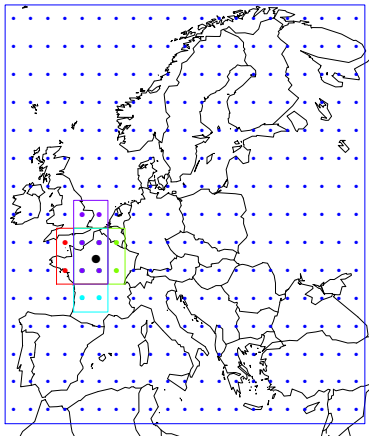
# Dimension spatiale – Méthode

Idée : minimiser  $p_1$  sur les périodes temporelles ET les domaines spatiaux.

On dispose de données obs et modèles sur une grille  $2.5 \times 2.5^\circ$ .

Contrainte : domaines carrés (ou presque) et contenant Paris.

Domains of size 3x2 (4)



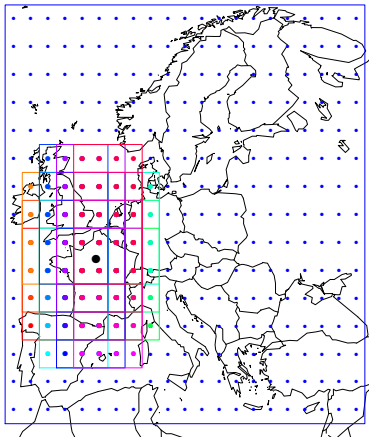
# Dimension spatiale – Méthode

Idée : minimiser  $p_1$  sur les périodes temporelles ET les domaines spatiaux.

On dispose de données obs et modèles sur une grille  $2.5 \times 2.5^\circ$ .

Contrainte : domaines carrés (ou presque) et contenant Paris.

**Domains of size 5x4 (24)**





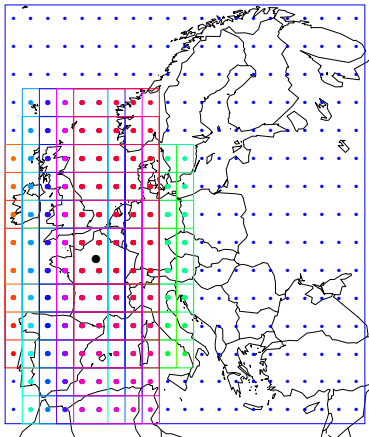
# Dimension spatiale – Méthode

Idée : minimiser  $p_1$  sur les périodes temporelles ET les domaines spatiaux.

On dispose de données obs et modèles sur une grille  $2.5 \times 2.5^\circ$ .

Contrainte : domaines carrés (ou presque) et contenant Paris.

**Domains of size 7x5 (44)**



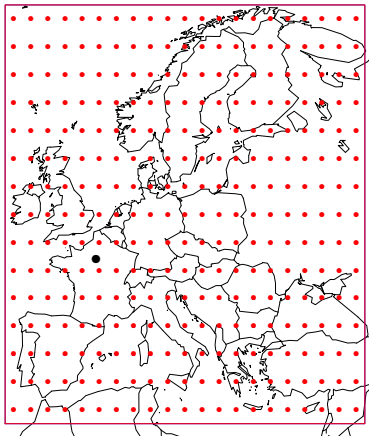
# Dimension spatiale – Méthode

**Idée** : minimiser  $p_1$  sur les périodes temporelles ET les domaines spatiaux.

On dispose de données obs et modèles sur une grille  $2.5 \times 2.5^\circ$ .

Contrainte : domaines carrés (ou presque) et contenant Paris.

**Domains of size 21x15 (1)**



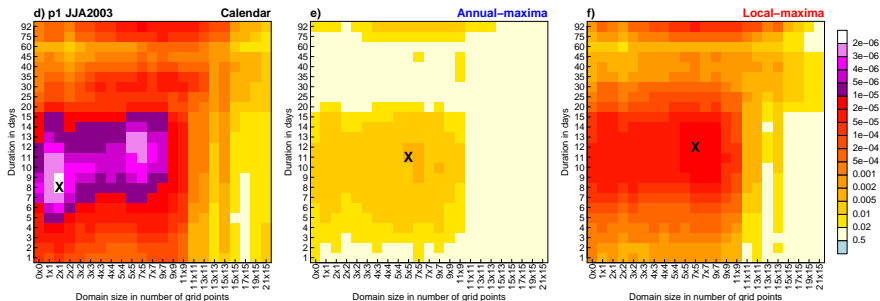
# Dimension spatiale – Résultat

Max annuels / Max locaux :

$\rho_1$  minimum pour 2–13 août sur France et Espagne (12 jours, domaine 7×5).

Jours calendaires :

Autre minimum à plus petite échelle (8 jours, domaine 2×1).



## FAR vs. échelle spatio-temporelle

Rappel :

$$p_1 = \Pr \{X^{(t_1)} \geq x_{t_1}\}, p_0 = \Pr \{X^{(t_0)} \geq x_{t_1}\} \text{ et FAR} = 1 - p_0/p_1.$$

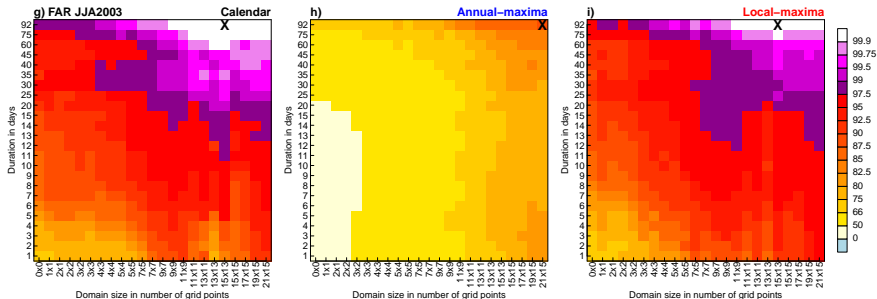
# FAR vs. échelle spatio-temporelle

Rappel :

$$p_1 = \Pr \{X^{(t_1)} \geq x_{t_1}\}, p_0 = \Pr \{X^{(t_0)} \geq x_{t_1}\} \text{ et FAR} = 1 - p_0/p_1.$$

Résultat :

Pour cet événement, la FAR augmente avec l'échelle spatio-temporelle.



Pas étonnant, elle suit le comportement du rapport  $s/b$  des  $T$ .

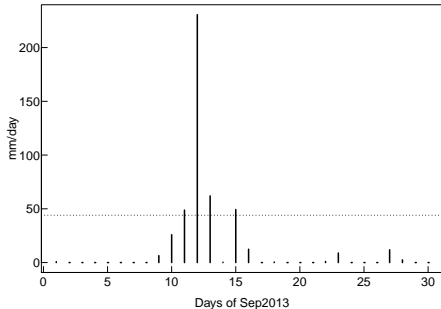
# Un événement extrême de précipitations

Cas d'étude : Boulder, Colorado, septembre 2013.

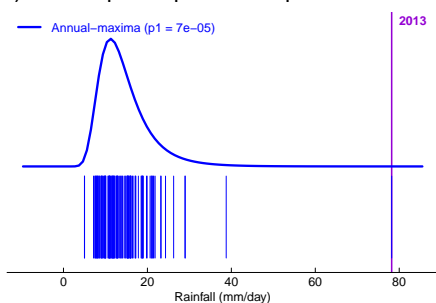
**Méthode** : max annuels, avec correction climatique plus subtile que pour  $T$ .

1. On estime le réchauffement  $x_t^*$  local (en K).
2. On estime le changement de max annuel de précipitation sur n-jours (en % par K).  
→ *2.5 %/K for 1-day annual maxima, 0.7 %/K for 92-day annual maxima.*
3. On ramène la série des max annuels à 2013 (pour  $p_1$ ) ou 1901 (pour  $p_0$ ).

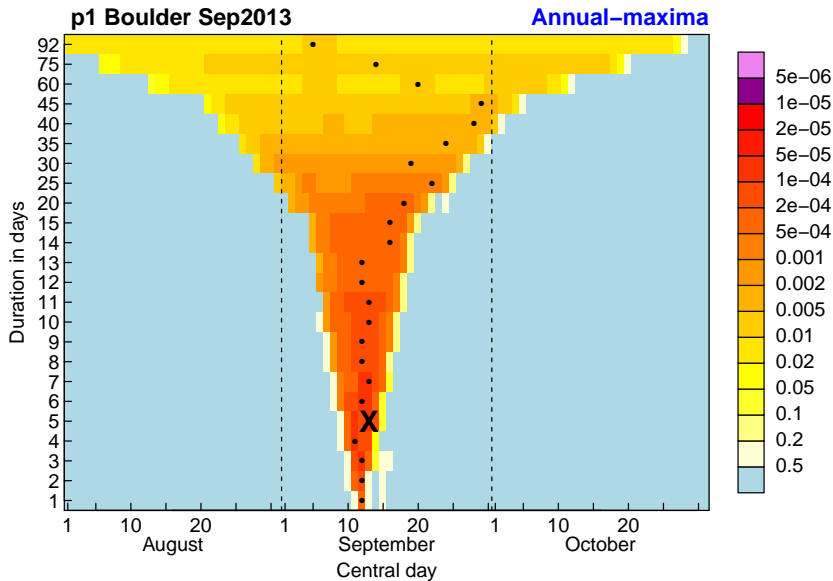
RR Boulder Sep2013



a) RR Boulder pdf for September 11 – September 15



# Dimension temporelle



# Au passage, une difficulté

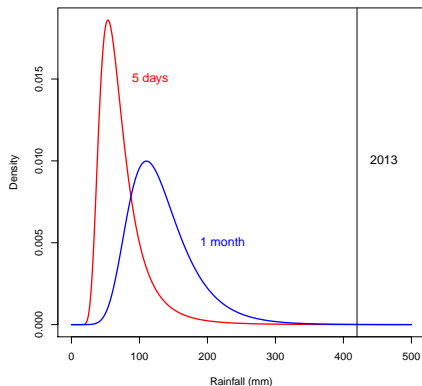
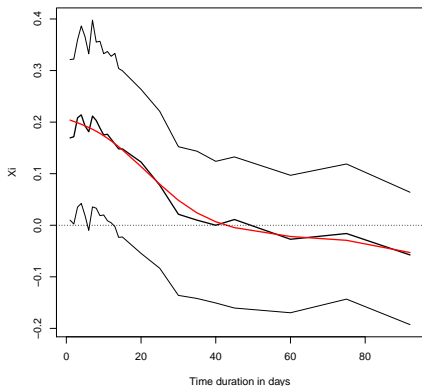
Estimation de  $\xi$ , paramètre de forme de la GEV.

$\xi$  varie avec la durée du max.

Si on l'estime à p. des données, pour un cumul de 400 mm,  $p_1(5j) > p_1(1m)$ .

Q/ Quelle famille de distributions considérer pour éviter ce type d'incohérence ?  
(Ici, choix  $\xi = 0.1$  pour toutes durées.)

Shape parameter vs. time aggregation

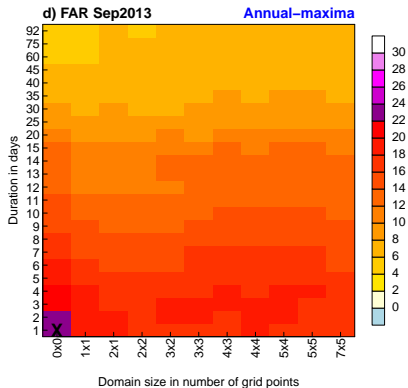
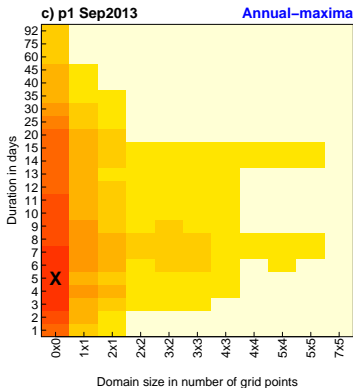




# Dimension spatiale

$p_1$  minimum pour 11–15 Septembre sur Boulder (5 jours, domaine  $0 \times 0$ ).

Pour cet événement, la FAR diminue avec l'échelle spatio-temporelle.



Rapport s/b + complexe pour précips que pour  $T$ .

# Résumé

Sélectionner l'échelle spatio-temporelle qui maximise la rareté de l'événement fournit une définition objective.

Cela ne maximise ni minimise systématiquement le RR ou la FAR, contrairement à certaines définitions arbitraires.

Cela permet de comparer la rareté de plusieurs événements et/ou de sélectionner les événements les plus extrêmes d'une année.

---

Cattiaux, J. and A. Ribes, Defining single extreme weather events in a climate perspective, *Bulletin of the American Meteorological Society*, in press. doi:[10.1175/BAMS-D-17-0281.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0281.1)