

Réchauffement climatique et transitions énergétiques : approches interdisciplinaires.

F. BOUCHET (ENS de Lyon - CNRS)

Cours Anthropocène – ENS de Lyon – Décembre 2018

La Dynamique du Climat : un Sujet Multidisciplinaire

- Exemple de la liste des titres de la collection “Primers in climate”, de l'université de Princeton :

- 1 Atmosphere, Clouds, and Climate.
- 2 Climate and Ecosystems.
- 3 Climate and the Oceans.
- 4 The Cryosphere.
- 5 The Global Carbon Cycle.
- 6 Paleoclimate.
- 7 Planetary Climates.
- 8 Natural Climate Change.
- 9 The Sun's Influence on Climate.
- 10 Abrupt Climate Change.
- 11 Terrestrial Hydrology and the Climate System.
- 12 Et beaucoup d'autres dans le futur pour rendre cette liste complète.

Transitions Ecologiques (et Solidaires)

Les transitions écologiques, en particulier la transition énergétique, sont des transitions qui vont affecter en profondeur nos sociétés. Elles impliquent des défis de nature :

- 1 Technologique,
- 2 Industrielle,
- 3 Economique,
- 4 Sociale,
- 5 Institutionnelle,
- 6 Politique,
- 7 Des modifications de nos modes de vie.

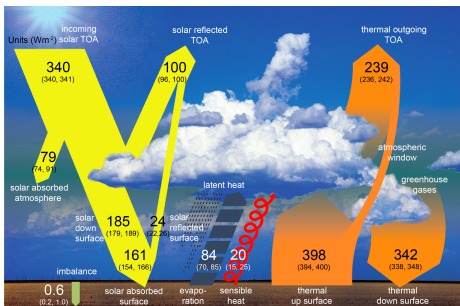
Plan de l'exposé

- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

Outline

- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

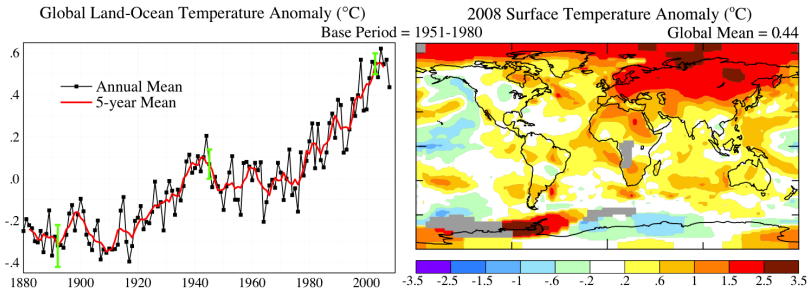
L'Effet de Serre : un Mécanisme Naturel



Le bilan d'énergie de l'atmosphère (GIEC, AR5)

- Sans l'effet de serre, il ferait -18°C sur terre. La température moyenne actuelle est de 15°C .

Evolution de la Température au Cours du Siècle Dernier

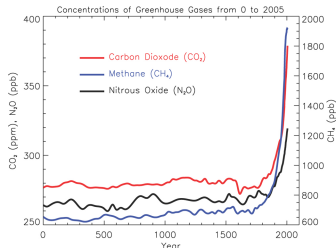
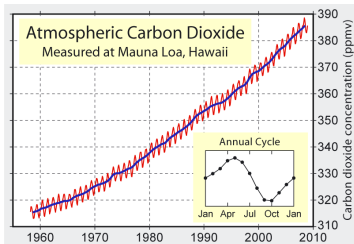


Température globale et anomalies de température en 2008

Outline

- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

La Concentration de CO₂ dans l'Atmosphère



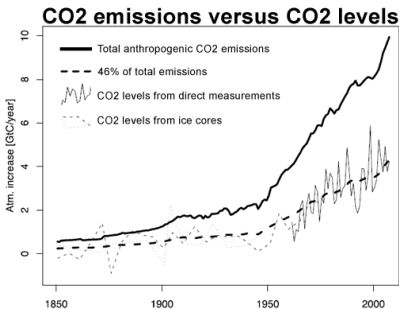
Concentration atmosphérique de CO₂, pendant les 30 et 2000 dernières années

- Croissance systématique. Le taux de croissance augmente.

La Dynamique du CO_2



Croissance des émissions anthropiques de CO_2



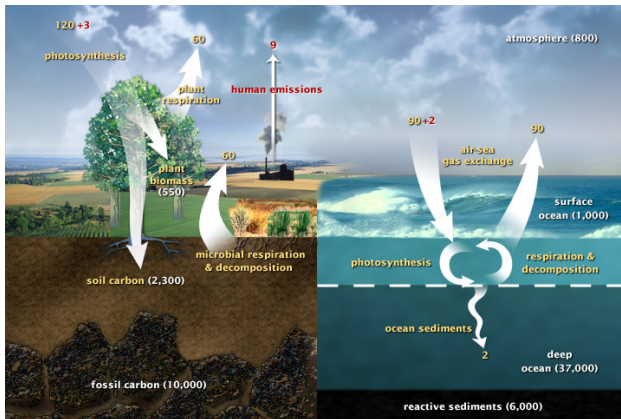
CO_2 fossile émis et CO_2 mesuré dans l'atmosphère

- La taux d'augmentation de la concentration atmosphérique est un peu moins de la moitié du taux d'émission.
- Où va le carbone complémentaire ? **Océan et biomasse.**

Outline

- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

Le Cycle du Carbone



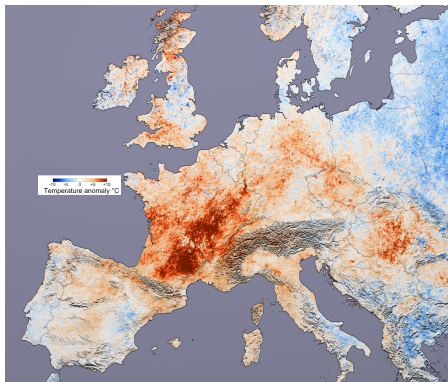
Les flux et stocks de CO_2 , avec les contributions anthropiques

Outline

- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

Canicules Extrêmes

Exemple : la canicule de 2003 sur l'Ouest de Europe



Température de surface du 20 juillet au 20 août moins la moyenne pour les années 2001, 2002 and 2004 (TERRA MODIS).

On Cherche à Nous Faire Peur !



L'Imaginaire des Phénomènes Climatiques Extrêmes

La puissance des phénomènes extrêmes frappe l'imagination

- Les événements météorologiques extrêmes suscitent immédiatement l'imagination et des fantasmes (le déluge, Edgar Poe, Joseph Conrad, science fiction, ...).
- Faire référence aux phénomènes météorologiques extrêmes fait immédiatement appel à l'expérience personnelle.
- Certains cursus aux Etats Unis ont été modifiés pour faire plus de place aux extrêmes pour ces raisons.
- L'exemple des extrêmes est très souvent utilisé dans le débat sur le réchauffement climatique et la transition énergétique.
- **Peur, non merci. Il est cependant essentiel d'analyser et d'agir pour prévenir.**

Extrêmes et Réchauffement Climatique

Les violentes intempéries dans les Alpes-Maritimes sont-elles dues au réchauffement climatique ?

Le Monde.fr | 04.10.2015 à 20h53 • Mis à jour le 05.10.2015 à 12h00 |

Vulnérabilités et Conséquences Inégalement Réparties

La puissance des phénomènes extrêmes frappe l'imagination

- En France, une année normale, de l'ordre de **quelques centaines** de personnes meurent suite à des événements météorologiques ou climatiques, dont la plupart à cause de la chaleur. A comparer aux **4 800** décès par accidents de la route, **73 000** liés au tabagisme, et environ **500 000** en tout.

(b) WORLD	DEATHS	LOCATION	DATE
DROUGHT/FAMINE	9,000,000	China	1876-79
FLOOD	2,000,000	Yellow River, China	1931
TROPICAL STORM	500,000	Coastal Bangladesh	11/12-13/1970
HEAT WAVE	35-52,000	Western Europe	8/2003
BLIZZARD	4,000	Iran	2/1972
TORNADO	1,300	Manikganj District, Bangladesh	4/26/1989
HAILSTORM	246	Moradabad, India	4/30/1888
SMOG	4,000	London, England	12/5-10/1952

(Ahrens)

Questions Clés

- Quel est l'impact réel des extrêmes météorologiques ?
- Quels sont les facteurs de risque ?
- Existe-t-il une science des phénomènes extrêmes ?
- Quels sont les phénomènes et principes physiques qui expliquent les extrêmes météorologiques et climatiques ?
- Quel est l'impact du réchauffement climatique sur la probabilité des extrêmes météorologiques et climatiques ?

Outline

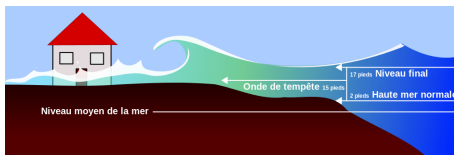
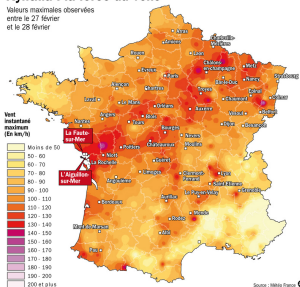
- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

Exemple : la Tempête Xynthia

Les évènements catastrophiques résultent d'une combinaison de causes indépendantes.

Xynthia : la force du vent

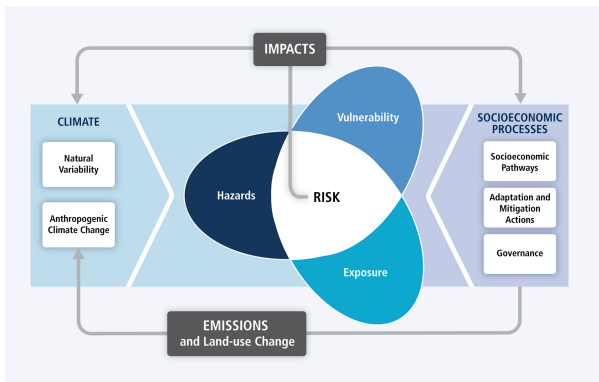
Valeurs maximales observées
entre le 27 février
et le 28 février



Onde de tempête

- Causes : un cyclone (pas si extrême), une marée haute coefficient 102, la phase entre la marée et le cyclone, une exposition (vulnérabilité) anormale, le chemin suivi par ce cyclone.

Hazard, Exposure and Vulnerability



(from IPCC, AR5, WG2)

Catastrophes : Des Causes de Natures Différentes

- Aléa physique : des causes de nature physique (météorologiques, climatiques).

Mais aussi :

- Des déterminants de nature sociologique.
- Des déterminants de nature économique.
- Des déterminants de nature politique.

Risques = Probabilités x Conséquences

Risques : aléa physique, exposition et vulnérabilité.

- Aléa physique : des causes de nature physique (météorologiques, climatiques). Ce sera le sujet principal de cet exposé.
- L'impact et les conséquences de ces aléa dépendent de l'exposition (où, sur quelles installations, etc).
- L'impact et les conséquences dépendent de la vulnérabilité (préparation de la population au risque, adaptation des infrastructures, etc).

Actions : atténuation des risques, adaptation et résilience.

- Ces dernières points relèvent de la responsabilité individuelle et de la sphère publique.
- L'adaptation et la résilience des sociétés sont essentielles.

Outline

- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

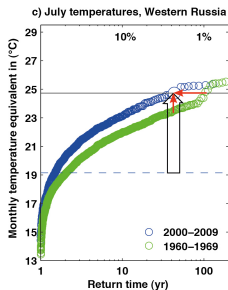
Extrêmes et Réchauffement Climatique

Les violentes intempéries dans les Alpes-Maritimes sont-elles dues au réchauffement climatique ?

Le Monde.fr | 04.10.2015 à 20h53 • Mis à jour le 05.10.2015 à 12h00 |

Le CO_2 Anthropique Cause-t-il les Canicules Extrêmes ?

Attribution = analyse des observations couplée à des études de modèles de climat



Temps de retour de la moyenne mensuelle de température en Russie
(Otto et col. 20152, GIEC-AR5)

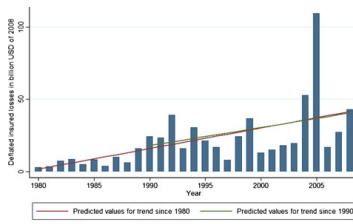
- Le changement climatique n'est pas la cause des canicules extrêmes mais il augmente fortement leur fréquence et leur intensité.

Synthèse des Observations et Projections pour les Extrêmes

Conclusions du GIEC

- Les extrêmes de température augmentent et vont augmenter de façon quasi-certaine à cause des émissions anthropiques de CO_2 .
- Il est fortement probable que les extrêmes de précipitation augmentent au niveau global à cause des émissions anthropiques de CO_2 .
- Plus les phénomènes sont locaux, moins les conclusions sont possibles, à cause du manque de données et de la complexité de la dynamique.
- Les conclusions locales sont rarement possibles pour l'instant.
Par exemple, quelle est la probabilité de canicules extrêmes en Europe ?

Natural Disaster Losses Increase



Global deflated insured losses from natural disasters

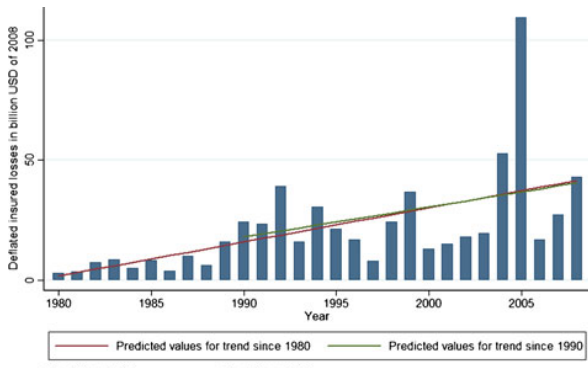
(F. Barthel and E. Neumayer, 2012)

- FFA (Fédération Française des Assurances) projections for France in 2015: 90% increase of naturel disaster costs (92 M€), for the next 25 years, compared to the previous 25 years, among which 30% due to climate change.

For Physical Damages, Climate Change is Not the Main Driver

- *“Climate change neither is nor should be the main concern for the insurance industry. The accumulation of wealth in disaster-prone areas is and will always remain by far the most important driver of future economic disaster damages. Nevertheless, insurance companies are concerned about climate change as the predicted increase in the frequency and/or intensity of natural hazards is likely to lead to higher economic damages, unless defensive mitigating measures make exposed wealth less vulnerable to the impacts of hazards.” (F. Barthel and E. Neumayer, Climatic Change, 2012)*
- This points even more to anthropogenic responsibility.

The Few More Extreme Events Have More Impact than All the Others



Global deflated insured losses from natural disasters

Katrina (2005): 110 M\$, Harvey (2017): between 80 and 190 M\$.

Les Extrêmes Climatiques Sont-Ils Causés par l'Homme

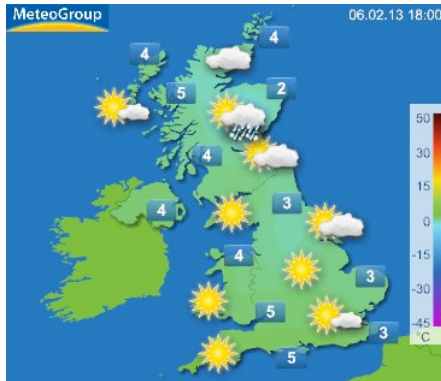
Quelques idées importantes

- Les extrêmes climatiques existent indépendamment de l'action humaine.
- Le réchauffement climatique d'origine anthropique fait croître l'aléa climatique, en particulier pour les canicules, les sécheresses et les inondations qui sont les phénomènes avec l'impact le plus fort sur nos sociétés.
- Jusqu'à présent, le plus fort facteur d'impact des extrêmes n'est pas de nature climatique, mais est lié à la croissance de l'exposition.
- La vulnérabilité est fortement liée à la structure sociale et à la richesse. Les impacts se mesurent en milliard d'euros dans les pays riches et en nombre de vies dans les pays pauvres.

Outline

- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

Dynamique des Cartes Météorologiques



- Quelles sont les causes des changements météorologiques ?

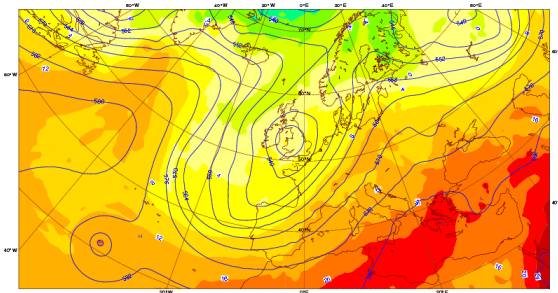
Les Cartes de Pression Expliquent le Temps



- Le temps est corrélé aux cartes de pression. Les dépressions sont des cyclones, les hautes pressions des anticyclones.
- Peut-on comprendre la dynamique des cartes de pression ?

La Bonne Echelle n'est pas celle d'un Pays

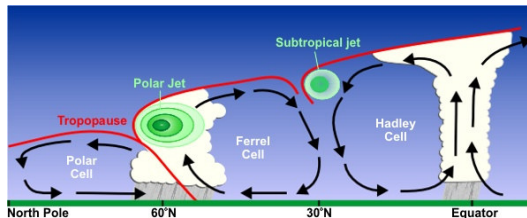
Monday 24 September 2012 00UTC ©ECMWF Forecast t+048 VT: Wednesday 26 September 2012 00UTC
850 hPa Temperature / 500 hPa Geopotential



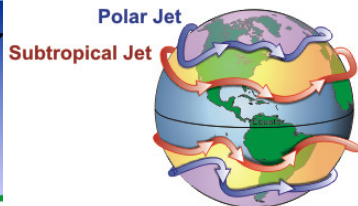
Cartes de température et de pression au dessus de l'Europe (26/09/2012)

- L'échelle "synoptique" (milliers de kilomètres) est l'échelle pertinente pour comprendre la dynamique.

La Convection Atmosphérique et les Courant-Jets



Les cellules de convection atmosphériques



Configuration schématique
des courant jet

Le Courant Jet (Jet Stream)



Vents dans la haute troposphère (10km) (NASA)

Les Limites des Capacités de Calcul et les Limites de la Science des Extrêmes

- A cause du changement climatique, l'évolution qualitative des temps de retour des canicules extrêmes est clair, mais qu'en est-il des prédictions quantitatives ?
- Comment obtenir plus de réalisations des extrêmes pour étudier leur dynamique et tester la qualité des modèles ?
- Le problème majeur est la difficulté de faire des calculs numériques très longs et coûteux avec des modèles très complexes. Ceci est le principal frein à une science plus quantitative.
- Comment étudier des canicules avec un temps de retour de 100 000 ans en faisant une simulation qui ne dure que 1 000 ans ?

Outline

- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

Des Concepts Issus de la Physique Statistique et des Mathématiques

- Echantillonnage préférentiel.
- Théorie des grandes déviations.
- Algorithmes génétiques.

Dynamique des Populations et Algorithmes Génétiques

En écologie :

- Les individus les plus adaptés à leur environnement se reproduisent plus vite que les autres.
- La population évolue suite à des modifications aléatoires et au processus de sélection.
- Suite à ce processus de sélection la population apparaît comme adaptée à son environnement.

Pour les modèles de climat :

- Les individus seront des trajectoires générées par un modèle de climat. Nous aurons une population de trajectoire.
- L'effet de l'environnement sera déterminé par des règles de sélection mathématiques. Nous allons choisir un environnement favorable aux canicules extrêmes.
- La population des trajectoires va évoluer vers un ensemble adapté à l'étude des canicules extrêmes.

Echantillonnage Préférentiel et Théorie des Grandes Déviations

- Echantillonnage préférentiel : comment générer efficacement la distribution biaisée

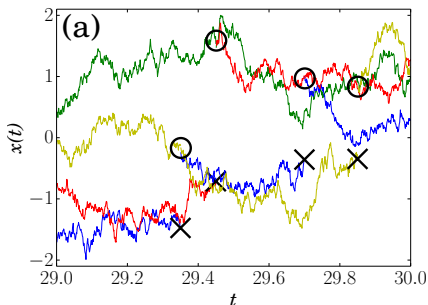
$$\tilde{P}_k(\{X(t)\}_{0 \leq t \leq T}) = \frac{1}{\exp(\mathcal{T}\lambda(k))} P_0(\{X(t)\}_{0 \leq t \leq T}) \exp\left[k \int_0^T A(X(t)) dt\right] ?$$

- Nous considérons un ensemble de N trajectoires $\{x_n(t)\}$. A chaque temps $t_i = i\tau$, chaque trajectoire peut être dupliquée (reproduction) ou éliminée en fonction des probabilités

$$\frac{1}{W_i(k)} \exp\left(k \int_{t_{i-1}}^{t_i} A(x_n(t)) dt\right) \text{ with } W_i(k) = \sum_{n=1}^N \exp\left(k \int_{t_{i-1}}^{t_i} A(x_n(t)) dt\right).$$

Algorithme Génétique : Sélection et Clonage de Trajectoires

La statistique des trajectoires est biaisées vers les événements intéressants.

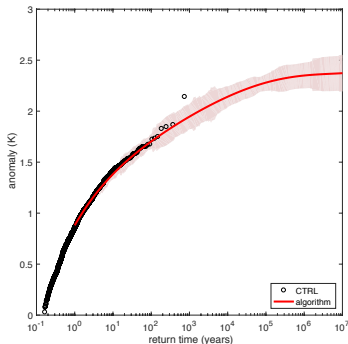


Chemins pour la dynamique d'ensemble de l'algorithme

(from Bouchet, Jack, Lecomte, Nemoto, 2016)

- L'ensemble des trajectoires évolue comme une population en écologie.

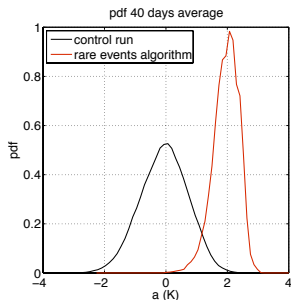
Etudier des Canicules de Temps de Retour 100 000 ans avec un calcul de 1000 ans



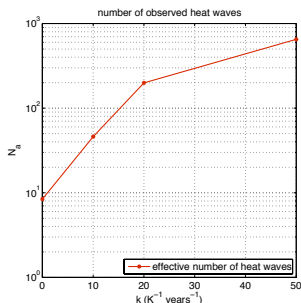
Temps de retour de canicules extrêmes en Europe

- Avec une simulation qui dure 1000 ans nous pouvons prédire l'amplitude d'événements avec des temps de retour de 10 000 ans

Echantillonnage Préférentiel de Canicules Extrêmes dans un Modèle de Climat



Distribution de la température moyenne



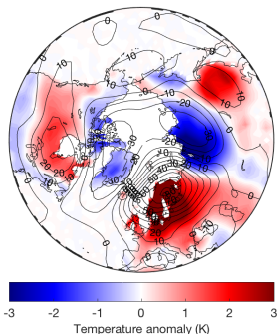
Nombre de canicules

- A coût numérique équivalent, nous avons obtenu avec cet algorithme environ 100 fois plus de canicules qu'avec une simulation directe.

Outline

- 1 Effet de serre, évolution et cycle du dioxyde de carbone
 - Effet de serre et évolution de la température
 - Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère
 - Le cycle du carbone
- 2 Les événements climatiques extrêmes et la dynamique de l'atmosphère
 - Les extrêmes climatiques et leur impact
 - Aléa physique, exposition et vulnérabilité
 - Les extrêmes climatiques sont-ils causés par l'homme ?
- 3 Un nouvel algorithme pour l'étude des extrêmes climatiques
 - La dynamique de l'atmosphère
 - Un algorithme génétique pour étudier les extrêmes climatiques
 - Extrêmes climatiques et téléconnexions

Cartes de Téléconnexions pour les Canicules Européennes

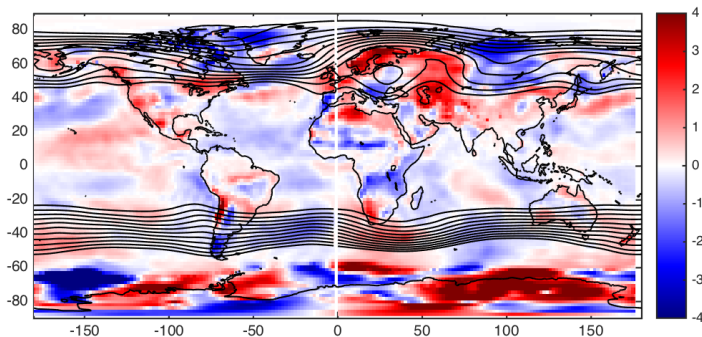


Anomalies de géopotential à 500 hPa et anomalies de température

Statistique conditionnée avec la propriété :

$$\frac{1}{T} \int_0^T \langle Temp \rangle_{\text{Europe}}(t) dt > 2^{\circ}\text{C}, \text{ avec } T = 40 \text{ jours.}$$

Les Canicules de Juillet 2018



Anomalies de la hauteur du géopotential à 500 hPa et anomalies de température, observées en juillet 2018 (données de réanalyse).

Un Nouvel Algorithme pour Etudier les Extrêmes Climatiques

Une nouvelle façon de prédire les événements météo extrêmes

MATHÉMATIQUES - Une équipe lyonnaise a mis au point un modèle prometteur pour évaluer les probabilités de survenue de phénomènes rares

Le Monde - 10 janvier 2018

Chercheur à l'ENS de Lyon, Freddy Bouchet est à l'origine de cet algorithme, qui réduit d'un facteur 100 à 1.000 les temps de calcul nécessaires à la modélisation des phénomènes extrêmes. -
Brice SAINT-MICHEL

La méthode développée par une équipe de recherche à l'ENS de Lyon, rattachée au CNRS et à l'université Claude Bernard Lyon-I, va permettre de mieux anticiper les conséquences économiques, écologiques et sociétales des phénomènes climatiques extrêmes.