

## Changements climatiques passés et futurs

Jean-Louis Dufresne

[jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr](mailto:jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr)

Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS, UPMC, ENS, X)

Institut Pierre Simon Laplace.



École nationale supérieure des Mines de Rabat, 27-31 mars 2017

## Plan

- I. Historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats
- V. Retour sur quelques questions
- VI. Qu'est ce que le GIEC ?

## Naissance de la physique du climat

*Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaire, J. Fourier, 1824*

- La Terre est une planète comme les autres
- Le bilan d'énergie pilote la température de surface de la Terre
- Les principaux modes de transferts d'énergie sont
  1. Rayonnement solaire
  2. Rayonnement infra-rouge
  3. Conduction avec le centre de la Terre



**Joseph Fourier**  
(1768-1830)

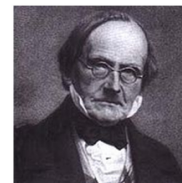
➢ Il pressent l'importance de tous changements d'ensoleillement

➢ Il envisage que le climat puisse changer:

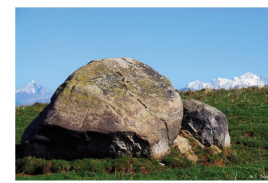
« L'établissement et le progrès des sociétés humaines, l'action des forces naturelles peuvent changer notablement, et dans de vastes contrées, l'état de la surface du sol, la distribution des eaux et les grands mouvements de l'air. De tels effets sont propres à faire varier, dans le cours de plusieurs siècles, le degré de la chaleur moyenne »

[Dufresne, 2006]

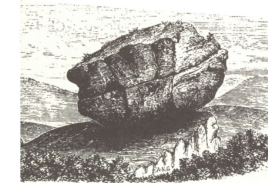
## La découverte des variations passées Hypothèse des périodes glaciaires (1840-1860)



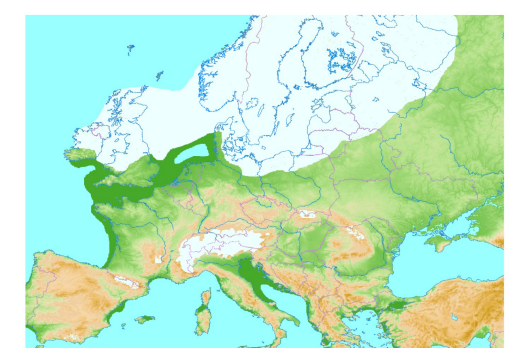
Jean de  
Charpentier



Blocs erratiques



Louis Agassiz



# La découverte des périodes glaciaires

Une période documentée par des peintures



Cosquer

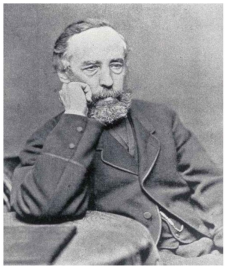


Lascaux



Chauvet

Origine de ces variations : soleil ou CO<sub>2</sub> (1860-1900) ?



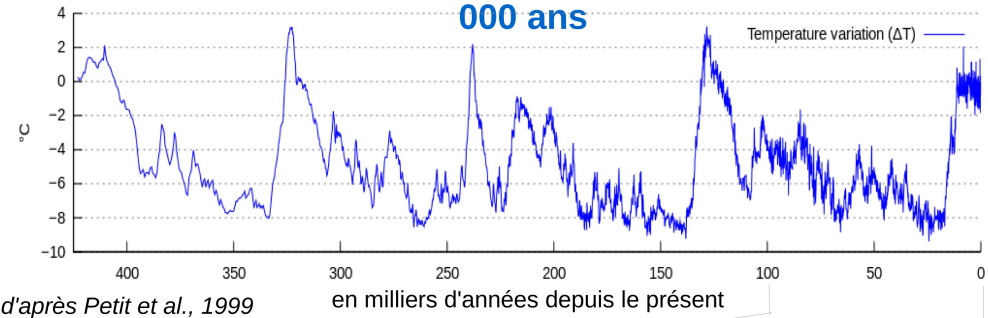
James Croll



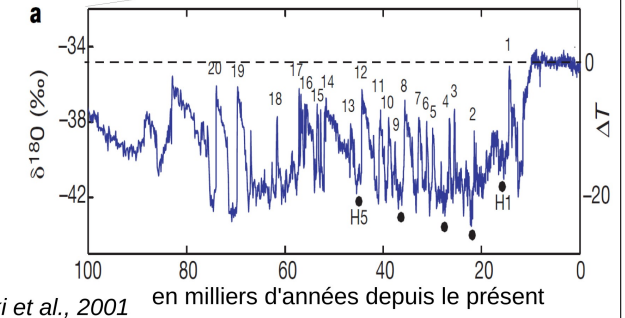
Svante Arrhenius

# Périodes glaciaires

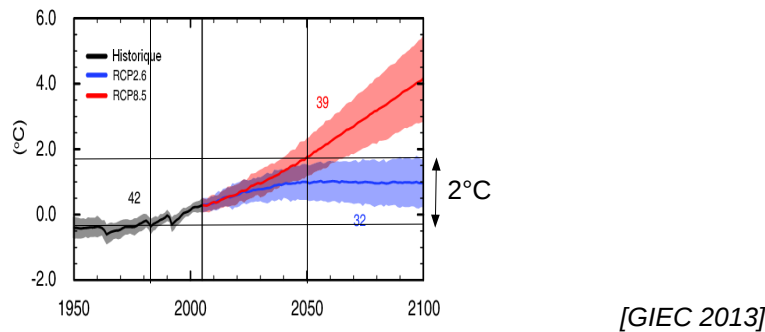
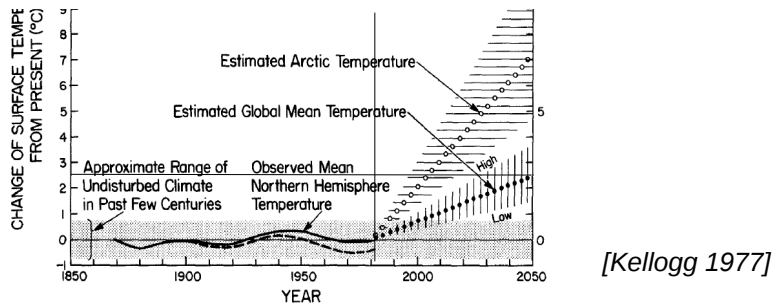
Forages de glace en **Antarctique** : des « cycles » à 120



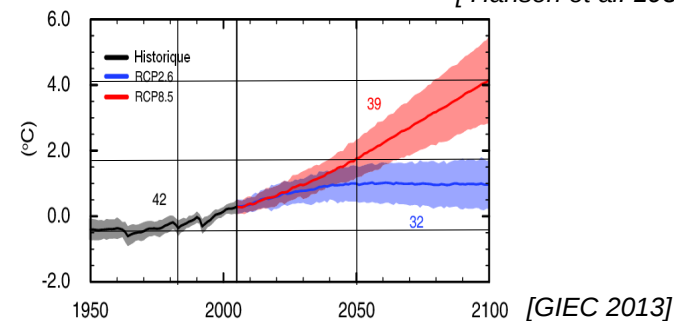
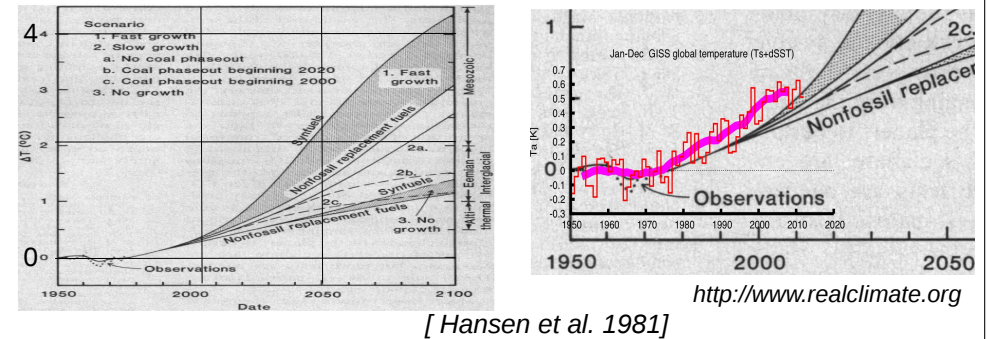
Forages de glace au **Groenland** : des variations très rapides en périodes glaciaires



Premières projections climatiques alors que la température a peu augmenté



Premières projections climatiques alors que la température a peu augmenté



# Variations du climat et rôle des activités humaines

**Début 19e siècle:** J. Fourier

**Début 20e siècle:**

**S. Arrhenius:**

- Premier calcul de la température moyenne de la Terre
- Hypothèse de variations passées et éventuellement future de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>
- Critique:** la Terre « régule » la concentration de CO<sub>2</sub>
- Calcul de la variation de température due à une variation de CO<sub>2</sub>
- Critique:** la variation de CO<sub>2</sub> ne change pas l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère

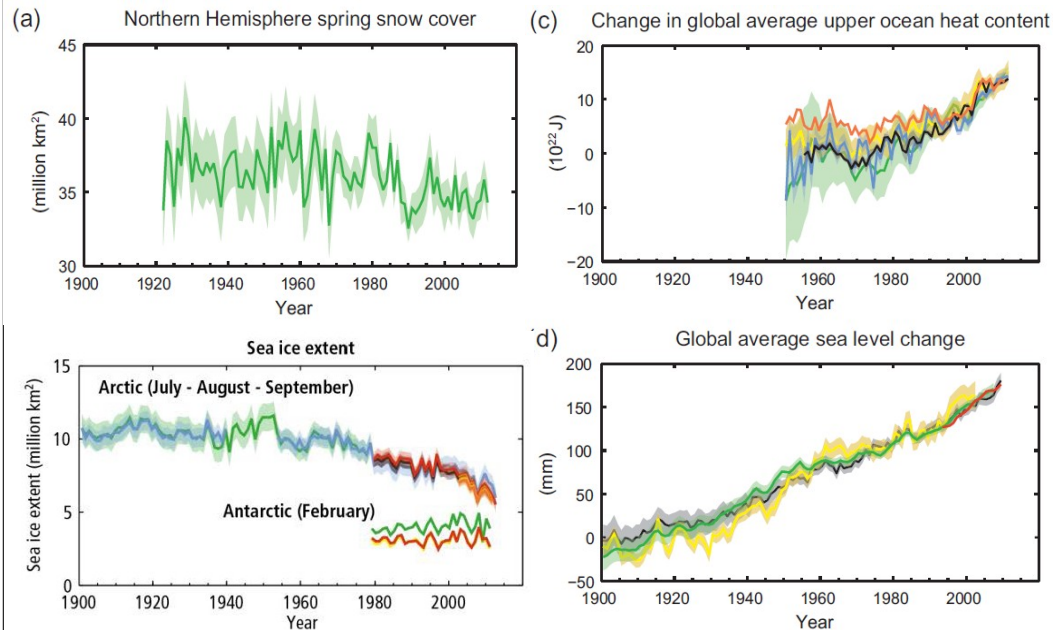
**A partir des années 1960:**

- Rayonnement infra-rouge mieux connu
- On observe un accroissement de la concentration de CO<sub>2</sub>
- Premier calcul « moderne » de l'accroissement de température en réponse à un accroissement de CO<sub>2</sub>
- Développement des modèles de climat
- Observations des variations des paléoclimats

## Plan

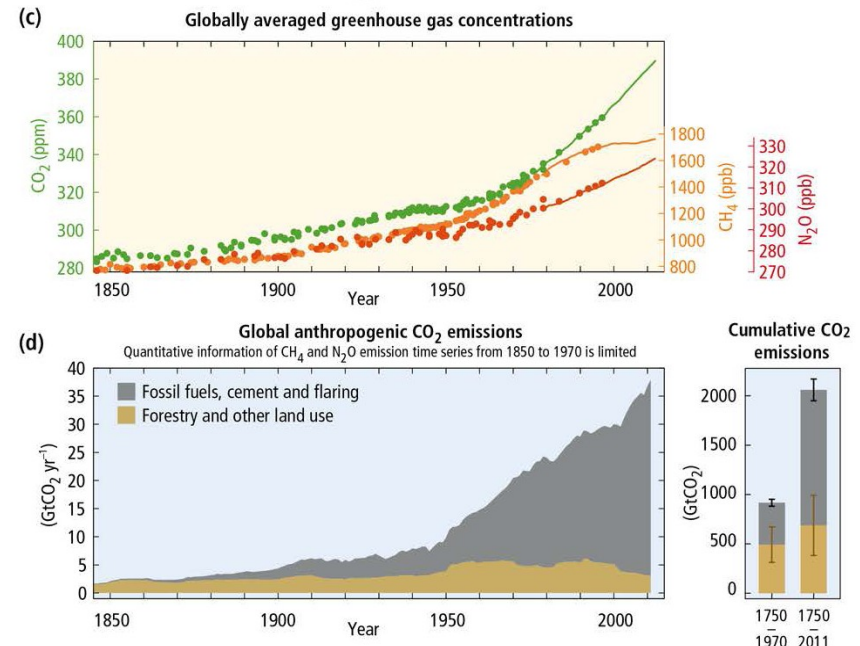
- I. Historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats
- V. Retour sur quelques questions
- VI. Qu'est ce que le GIEC ?

# Variations du climat et rôle des activités humaines



[GIEC 2013 et 2014]

# Variations du climat et rôle des activités humaines



[GIEC 2014]

# Emissions moyennes de CO<sub>2</sub> pour 2003-2012

1 GtC = 3.67 GtCO<sub>2</sub>

8,6 ± 0,4 GtC y<sup>-1</sup>



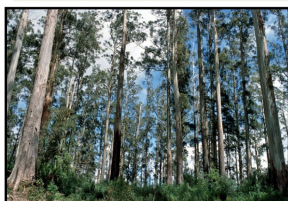
0,8 ± 0,5 GtC y<sup>-1</sup>



4,3 ± 0,1 GtC y<sup>-1</sup>  
45%



2,6 ± 0,5 GtC y<sup>-1</sup>  
27%



2,6 ± 0,8 PgC y<sup>-1</sup>  
27%

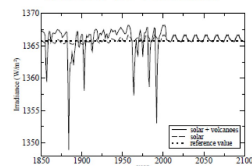


<http://www.globalcarbonproject.org/> (Global Carbon Project, 2011)

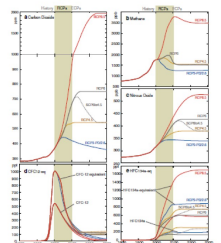
# Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL

Forçages naturels et anthropiques

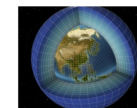
Soleil et volcans



Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs



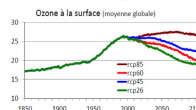
Concentration de CO<sub>2</sub>



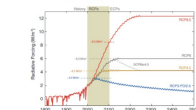
Modèle de climat

- Représentation 3D de l'atmosphère l'océan glaces de mer et surfaces continentales (couplages de différents modèles)
- Représentation du couplage avec les cycles biogéochimiques dans l'atmosphère l'océan et le continent

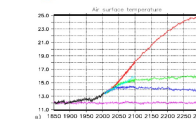
Composition de l'atmosphère



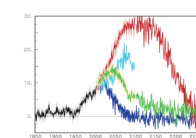
Forçage radiatif



Changement climatique

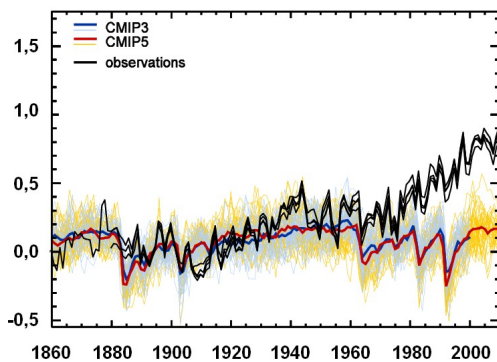


Émission autorisée de CO<sub>2</sub>

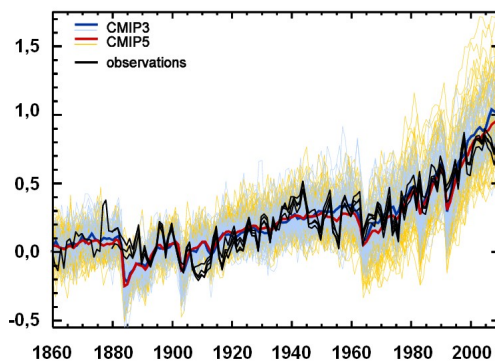


# Évolution récente de la température de surface de la Terre

Simulations avec forçages naturels seulement



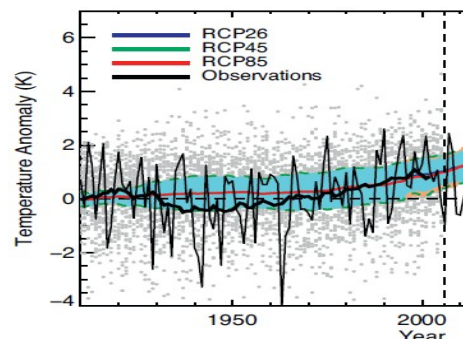
Simulations avec forçages naturels et anthropiques



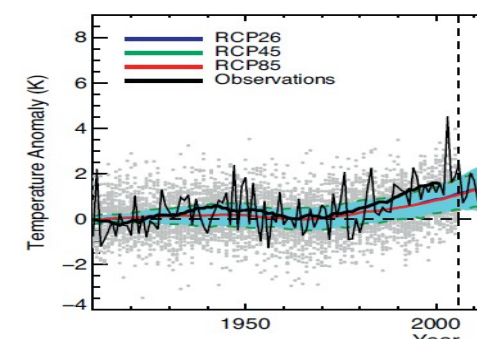
[GIEC, 2013]

# Evolution de la température en France

hiver

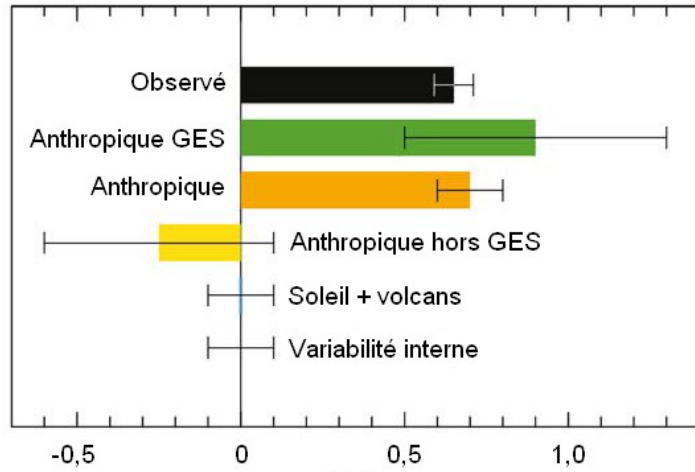


été



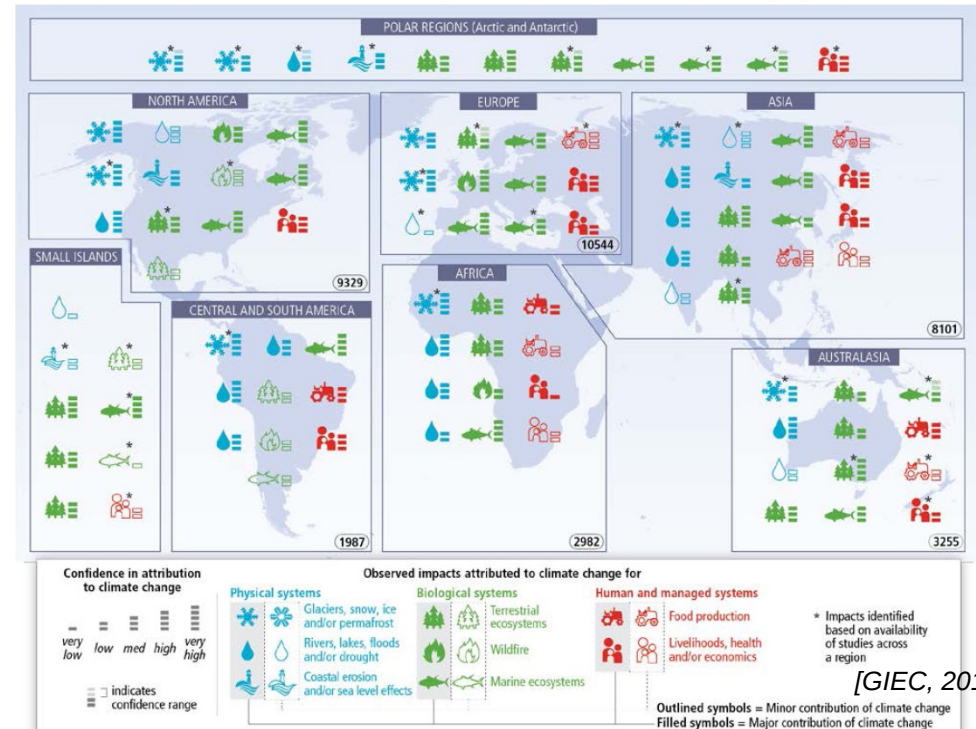
[Terry et Boé, 2013]

# Attribution des tendances sur 1951-2010 de la température moyenne globale en surface



[GIEC, 2013]

# Incidences attribuées au changement climatique

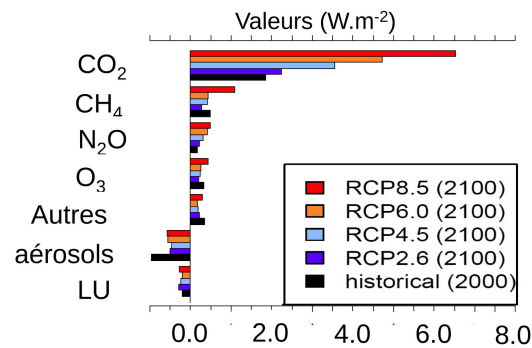
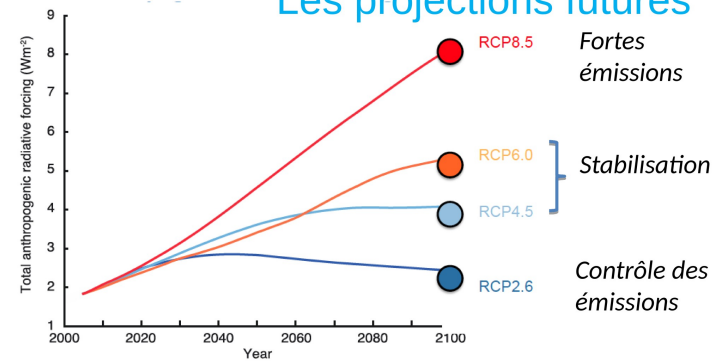


[GIEC, 2014]

## Plan

- I. Historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats
- V. Retour sur quelques questions
- VI. Qu'est ce que le GIEC ?

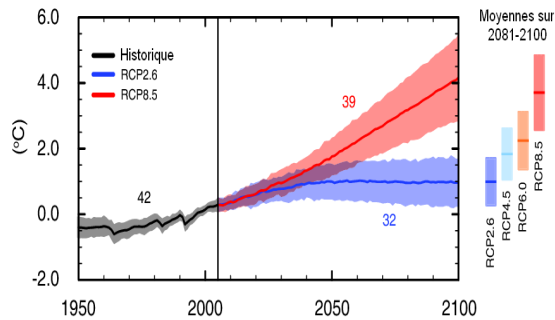
## Les projections futures



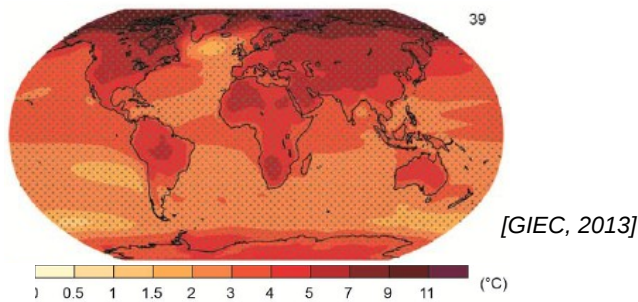
Contribution des forçages individuels au forçage total (référence 1850)

# Température de surface

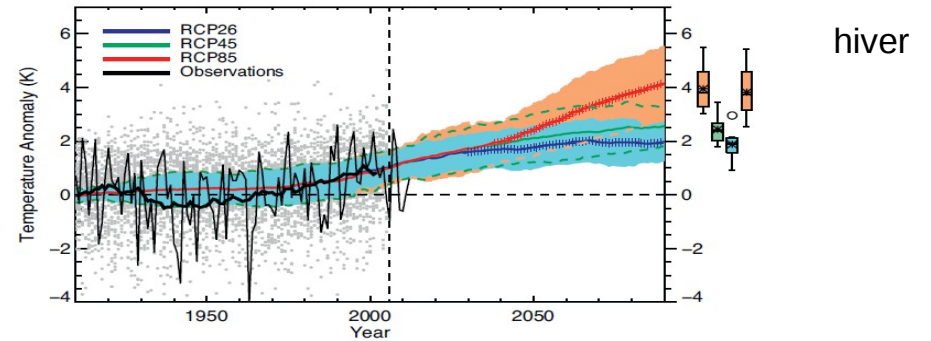
Moyenne globale  
1950 à 2100  
(40 modèles CMIP5)



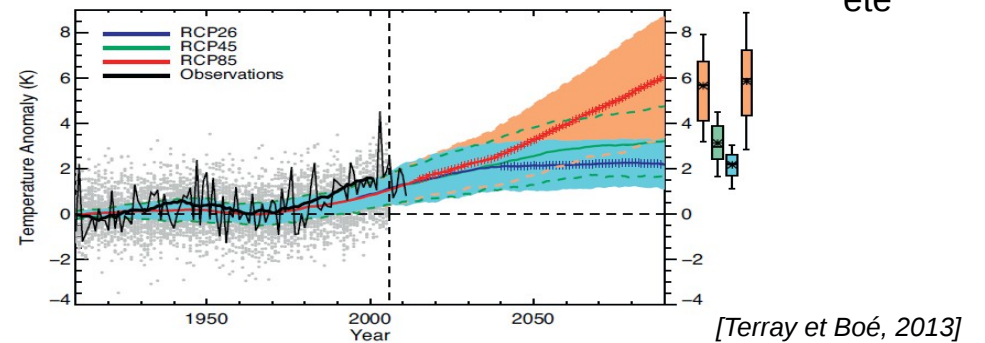
En 2100,  
scénario RCP8.5  
(39 modèles CMIP5)



# Evolution de la température en France

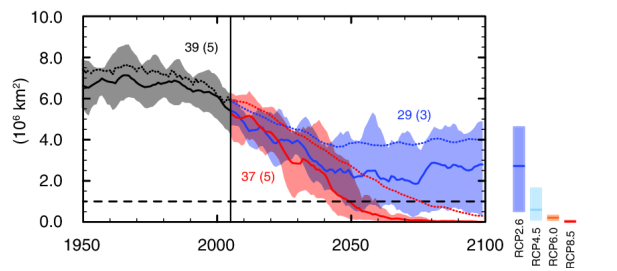


hiver

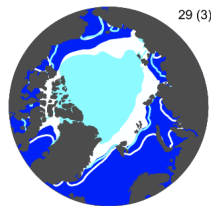


été

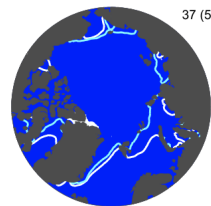
# Changements d'extension de la banquise de l'hémisphère nord septembre (minimum d'extension)



RCP2.6

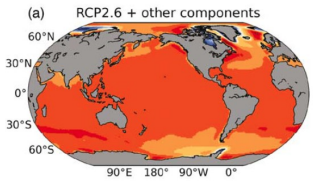
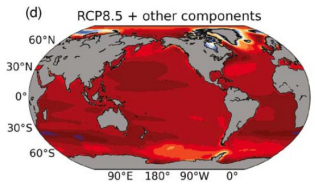
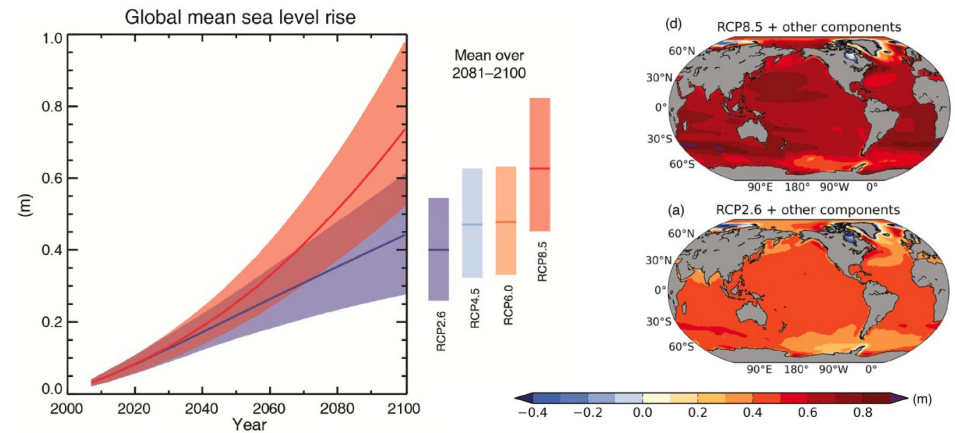


- CMIP5 multi-model average 1986-2005
- CMIP5 multi-model average 2081-2100
- CMIP5 subset average 1986-2005
- CMIP5 subset average 2081-2100



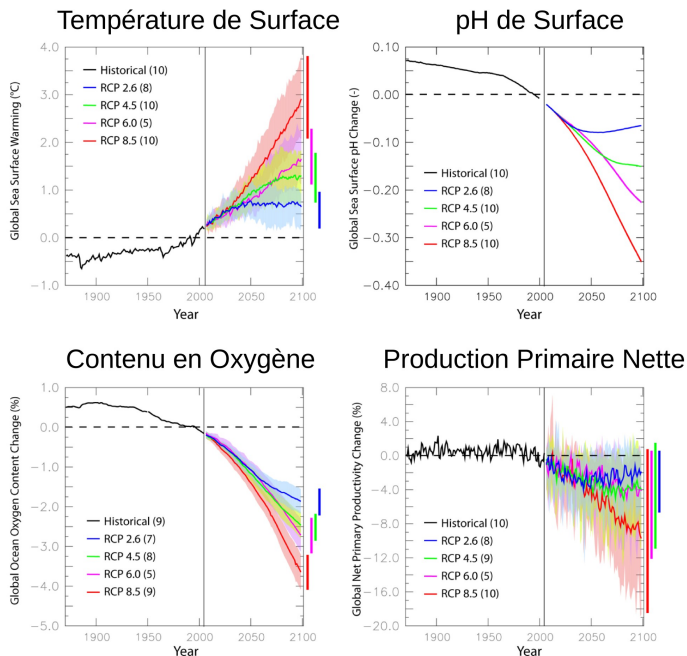
RCP8.5

# Changement du niveau des mers



# Impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins : Multi-modèle

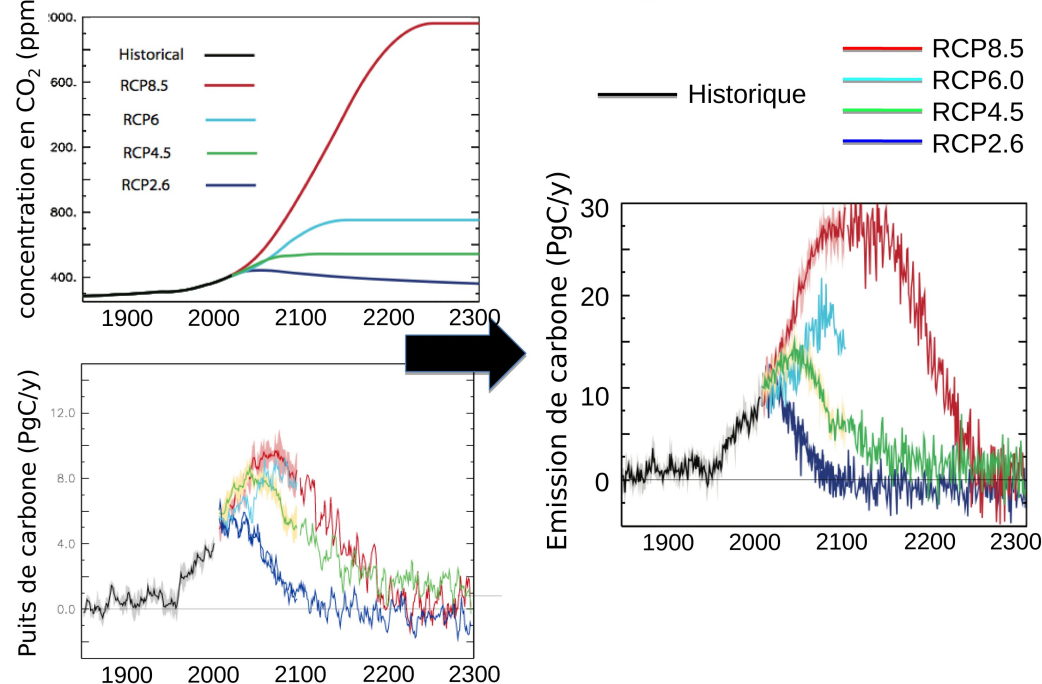
Des eaux de surface plus chaudes... et plus acides



Moins d'oxygène et moins de production primaire

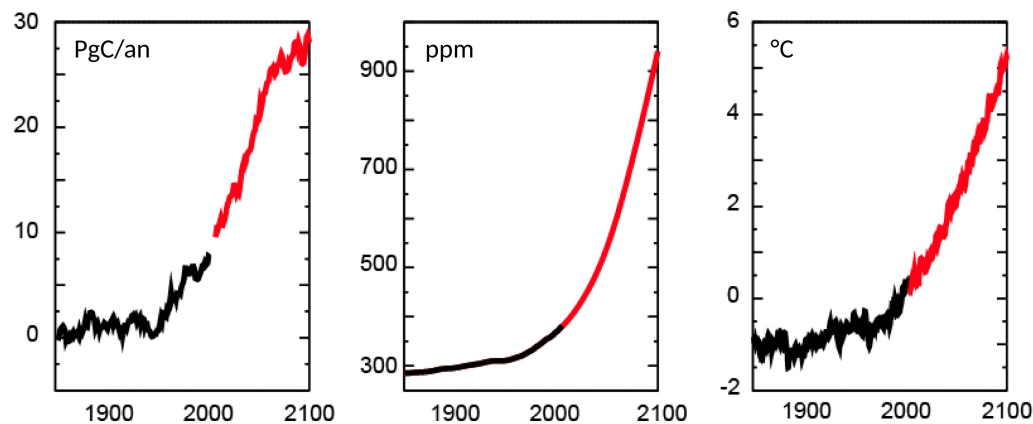
Bopp et al. 2014

# Les émissions autorisées de CO<sub>2</sub> avec IPSL-CM5



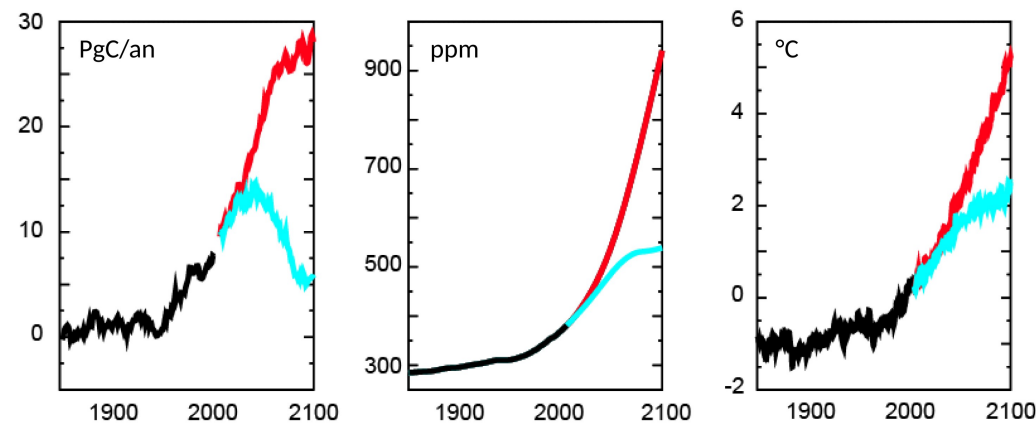
# Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO<sub>2</sub>, Température moyenne

>> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent



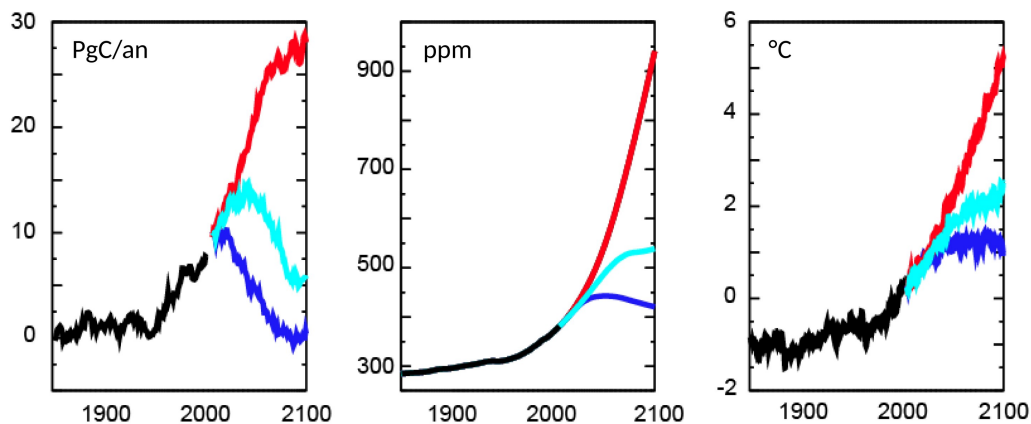
# Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO<sub>2</sub>, Température moyenne

>> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent  
>> **Scénario Médian** : pour stabiliser les concentrations à 550 ppm, il faut décroître fortement les émissions. Mais les températures continent à augmenter

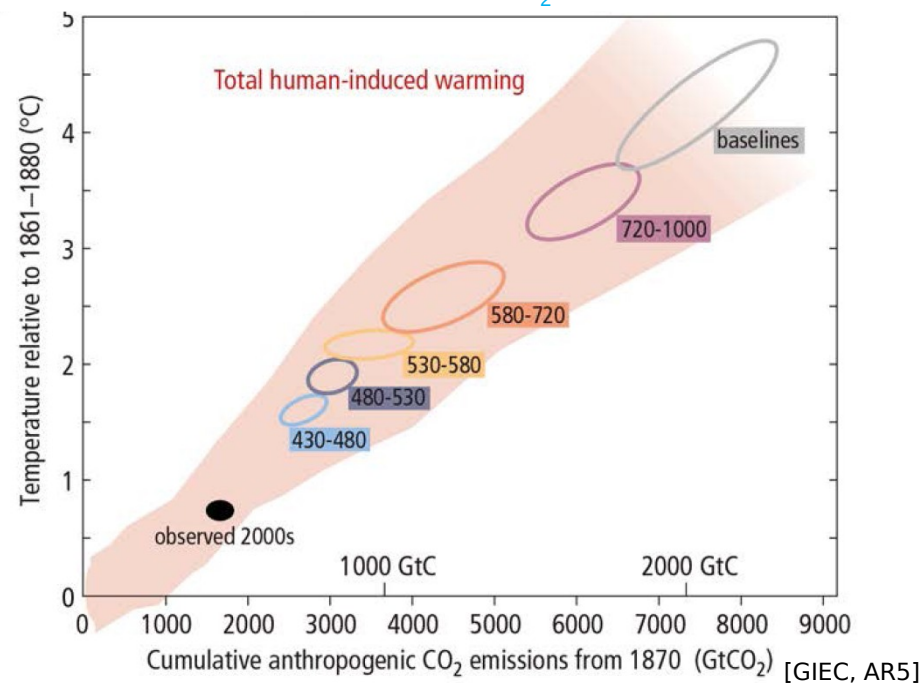


## Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO<sub>2</sub>, Température moyenne

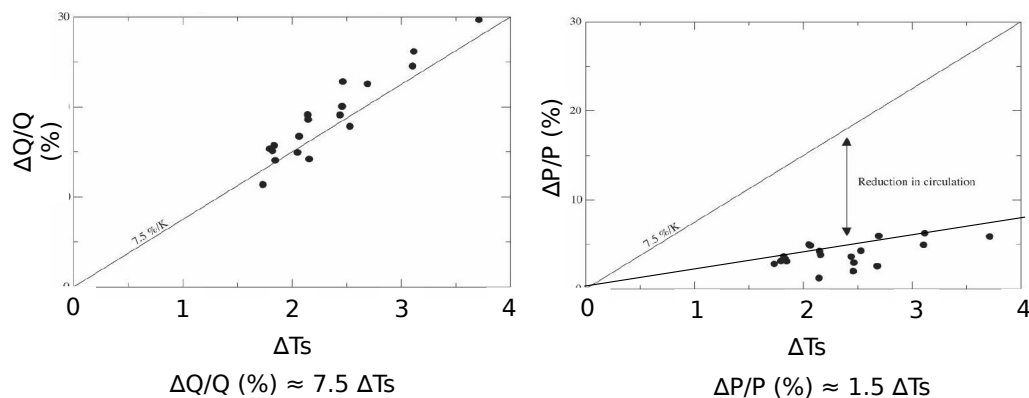
- >> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent
- >> **Scénario Médian** : pour stabiliser les concentrations à 550 ppm, il faut décroître fortement les émissions. Mais les températures continuent à augmenter
- >> **Scénario Bas** : pour limiter le réchauffement à 2°, il faut limiter la concentration à moins de 450 ppm et amener les émissions à 0 avant la fin du siècle.



## Accroissement de température versus les émissions cumulées de CO<sub>2</sub>.



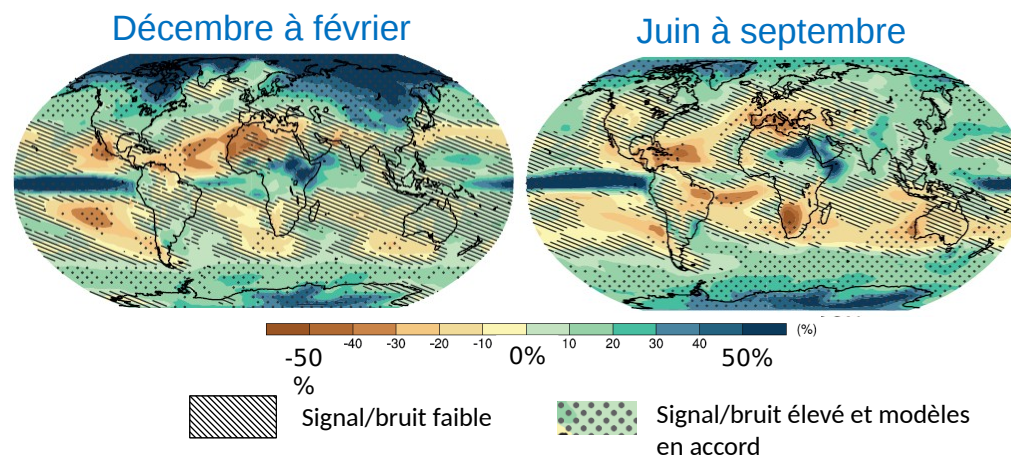
## Les changements de précipitations dus à l'accroissement de température



➔ Changement moyen de précipitation n'est pas directement relié au changement moyen de vapeur d'eau

(Vecchi & Soden, 2007)

## Distribution géographique et saisonnière du changement relatif des précipitations entre 2000 et 2100, scénario RCP8.5

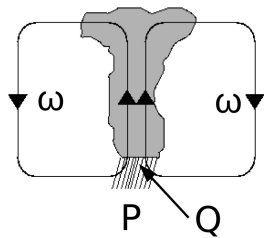
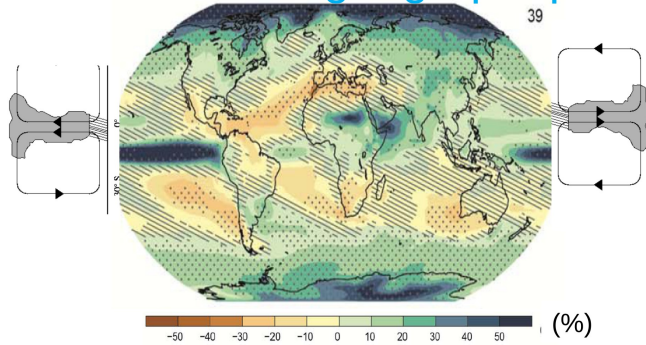


39 modèles CMIP5

[GIEC, AR5]



# Changements des précipitations: distribution géographique



Variation des précipitations

$$\Delta P \approx \omega \Delta Q + Q \Delta \omega$$

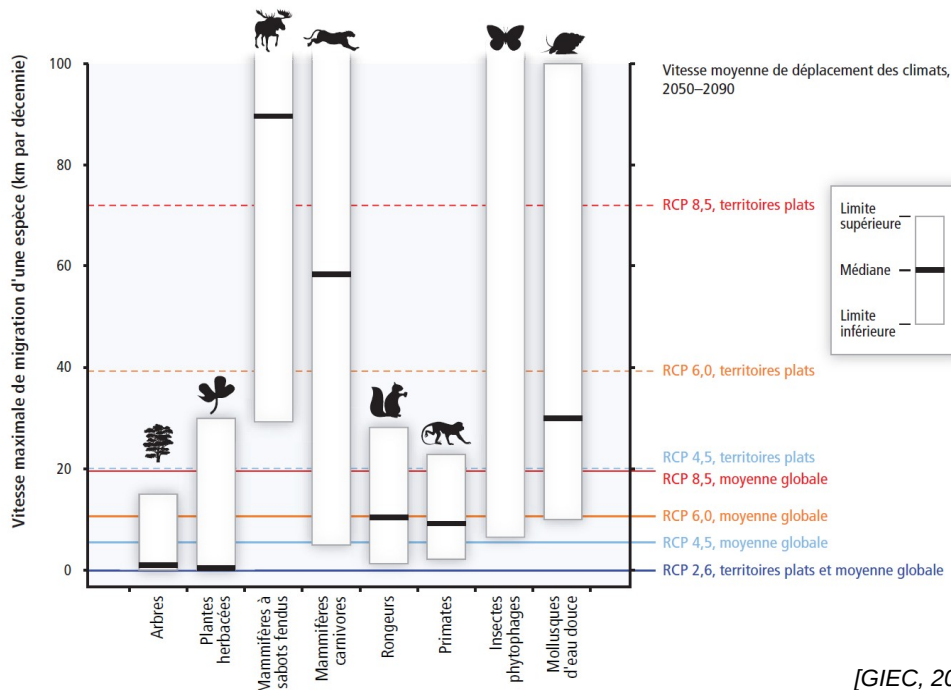
**thermodynamique**      **dynamique**

# Évènements extrêmes: tendances passées et futures

Phénomène	Probabilité depuis 1950	Contribution humaine	Probabilité au début / fin du XXI <sup>e</sup> siècle
<b>Périodes/vagues de chaleur</b> plus fréquentes et/ou plus longues sur la plupart des terres émergées	Probable dans de grandes parties d'Europe, d'Asie et d'Australie	Probable	Non évalué / Très probable
Augmentation de la fréquence, intensité et/ou du nombre des <b>épisodes de précipitations abondantes</b>	Probablement plus d'augmentations que de diminutions sur les terres émergées	Degré de confiance moyen	Probable sur de nombreuses régions / Très probable sur certaines régions
Augmentation de l'intensité et/ou de la durée des <b>sécheresses</b>	Faible confiance à l'échelle mondiale, probable dans certaines régions	Faible confiance	Faible confiance / Probable à l'échelle régionale ou mondiale
Augmentation de l'activité <b>cyclonique tropicale</b> de forte intensité	Faible confiance à l'échelle séculaire, pratiquement certain pour Atlantique Nord	Faible confiance	Faible confiance / Plus probable qu'improbable dans certains bassins

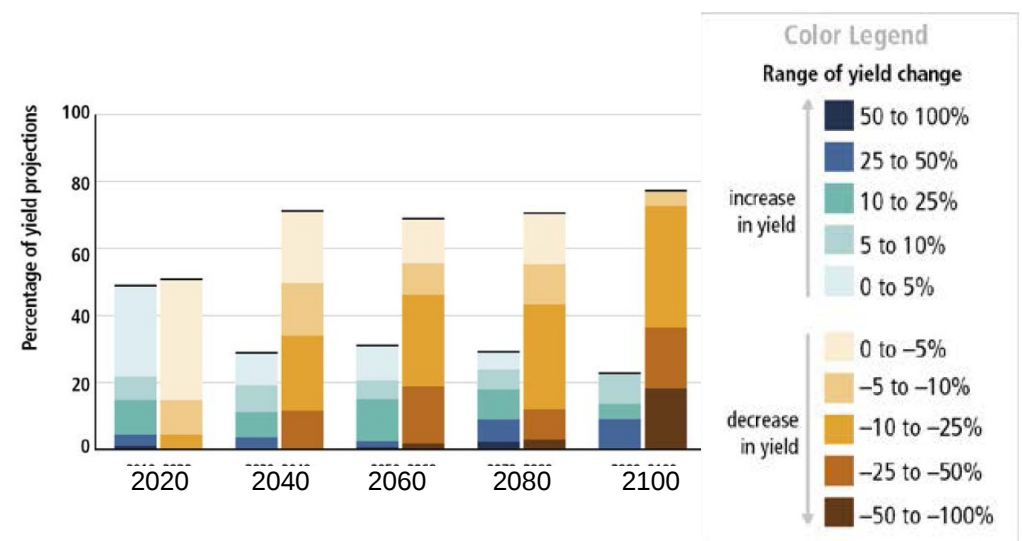
[GIEC, 2013]

# Vitesse de migration et de « déplacement » des cmimats



[GIEC, 2014]

# Variation du rendement de l'agriculture



[GIEC, 2014]

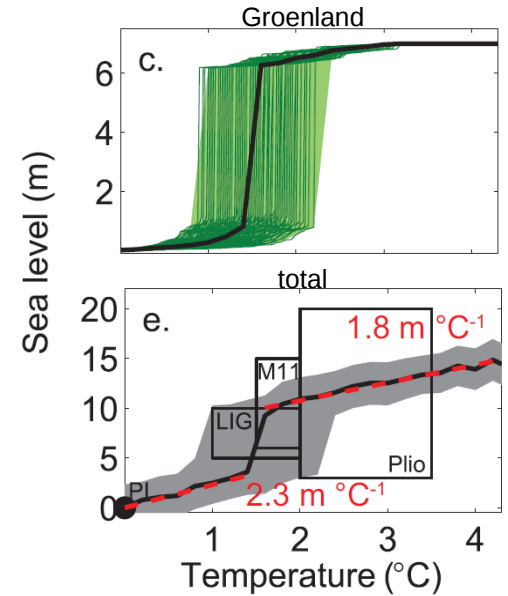
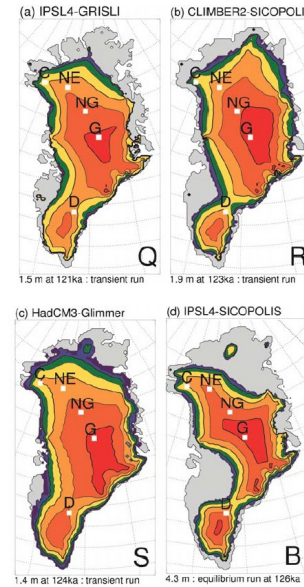
## Plan

- I. Historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats
- V. Retour sur quelques questions
- VI. Qu'est ce que le GIEC ?

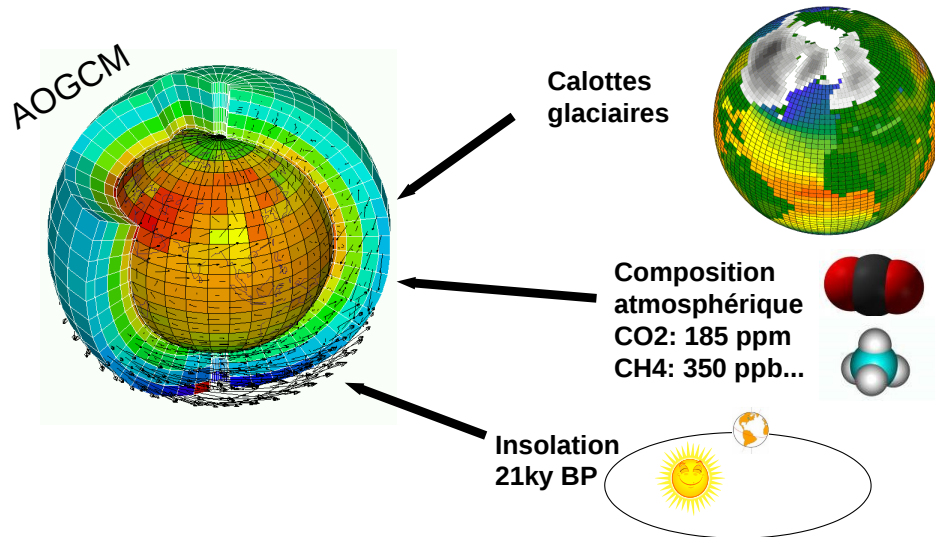
## Reconstructions dernier inter-glaciaire et conséquences pour le futur

Estimation fonte du Groenland dernier interglaciaire

Estimation changement niveau des mers aux échelles multi-millénaires



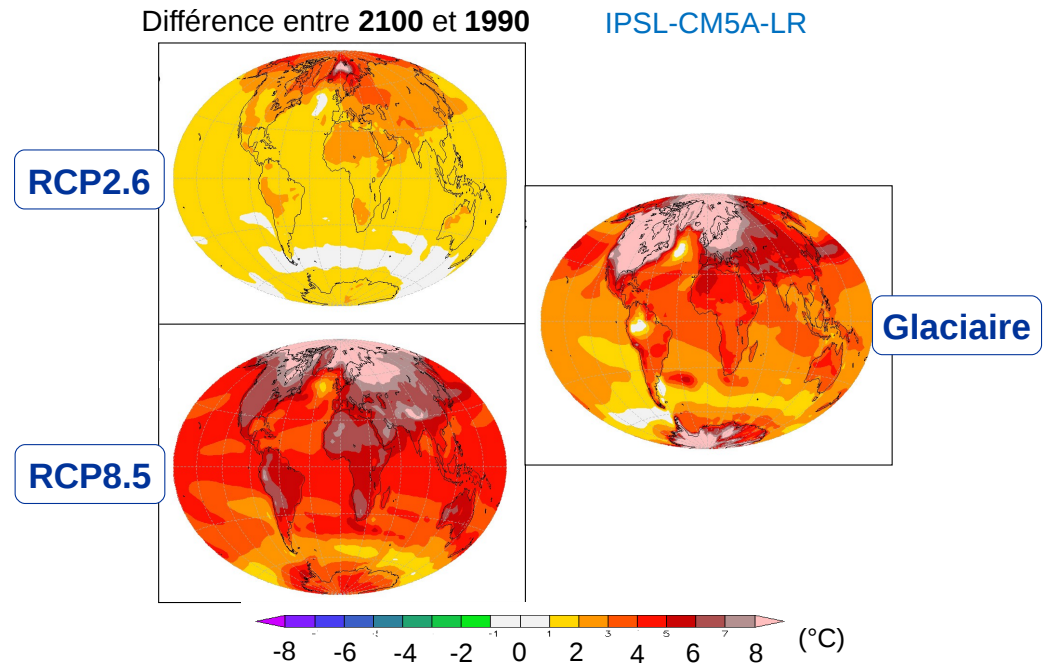
## Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire



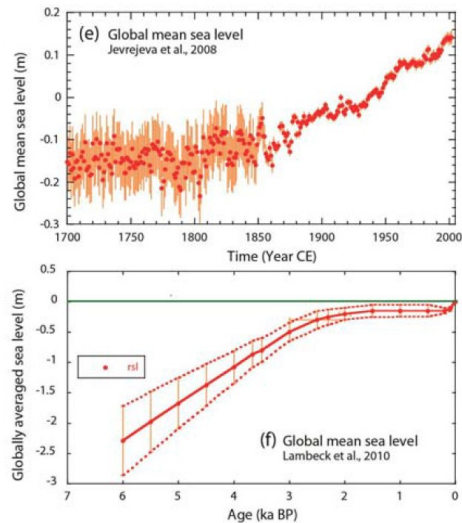
Forçage en gaz à effet de serre ~ climat futur  
 Autre forçage majeur: calottes glaciaire

cf. <http://pmip3.lsce.ipsl.fr>

## Changement de température de surface



## Niveau des mers



Une transition a eu lieu entre la fin du XIX<sup>e</sup> et le début du XX<sup>e</sup> siècle, où l'on est passé de taux d'élévation du niveau moyen des mers relativement faibles des deux derniers millénaires à des taux plus importants (*degré de confiance élevé*).

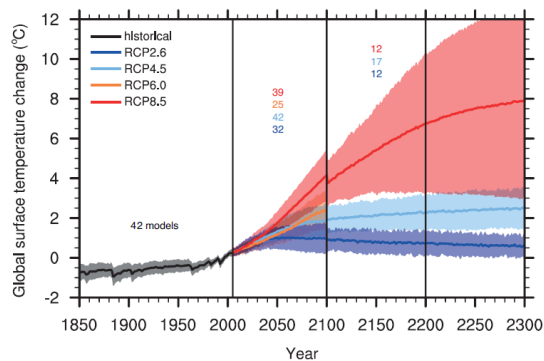
## Plan

- I. Historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats
- V. Retour sur quelques questions
- VI. Qu'est ce que le GIEC ?

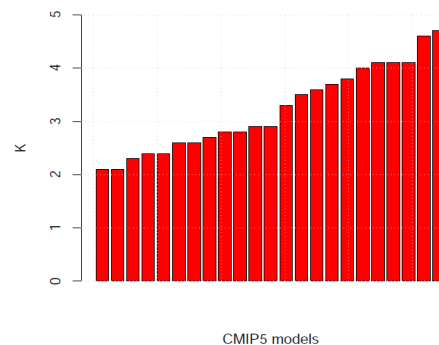
## Amplitude du réchauffement Sensibilité climatique

Accroissement de la moyenne des températures de surface

Pour des scénarios « réalistes »



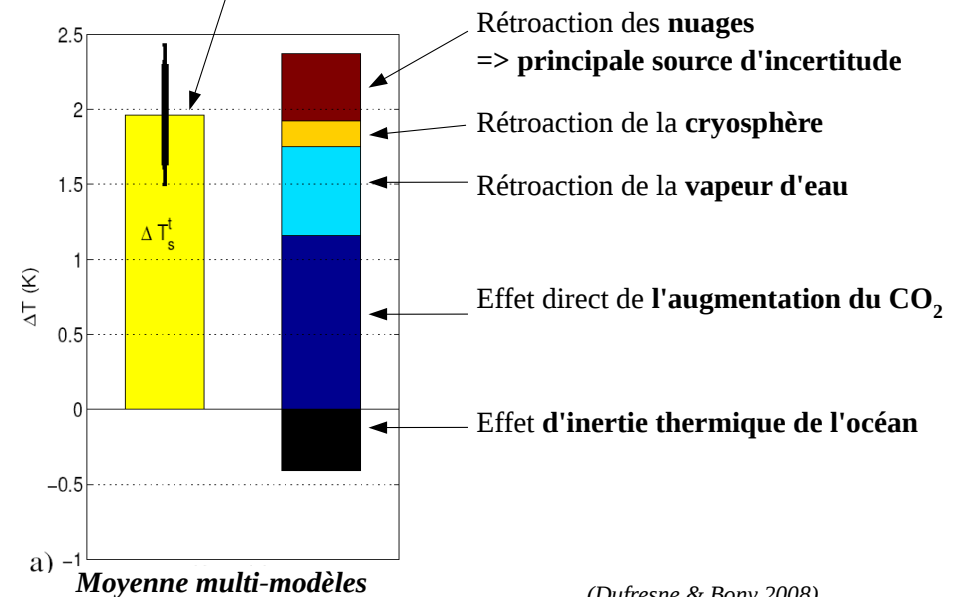
Pour un doublement de CO<sub>2</sub>



[GIEC, 2013]

## Accroissement de CO<sub>2</sub> et température

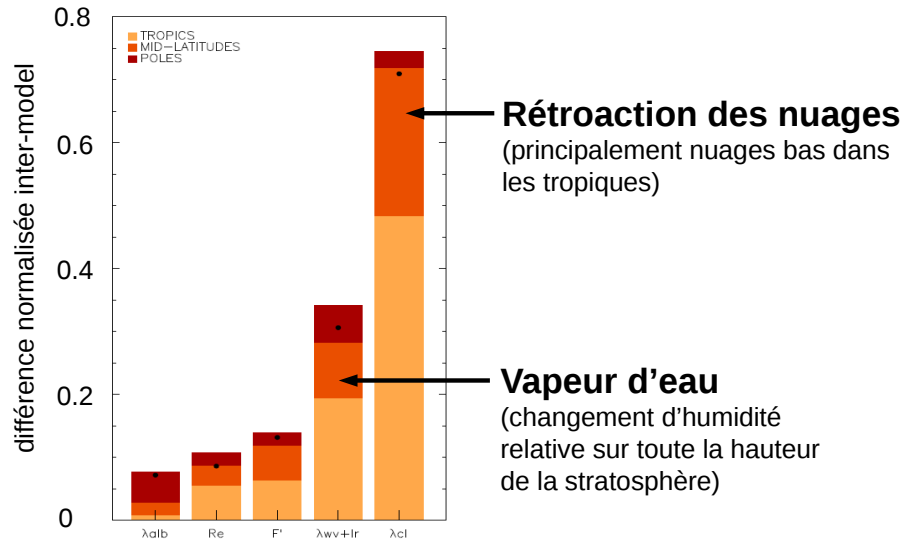
Réchauffement global pour un doublement de CO<sub>2</sub> en 70 ans



(Dufresne & Bony 2008)

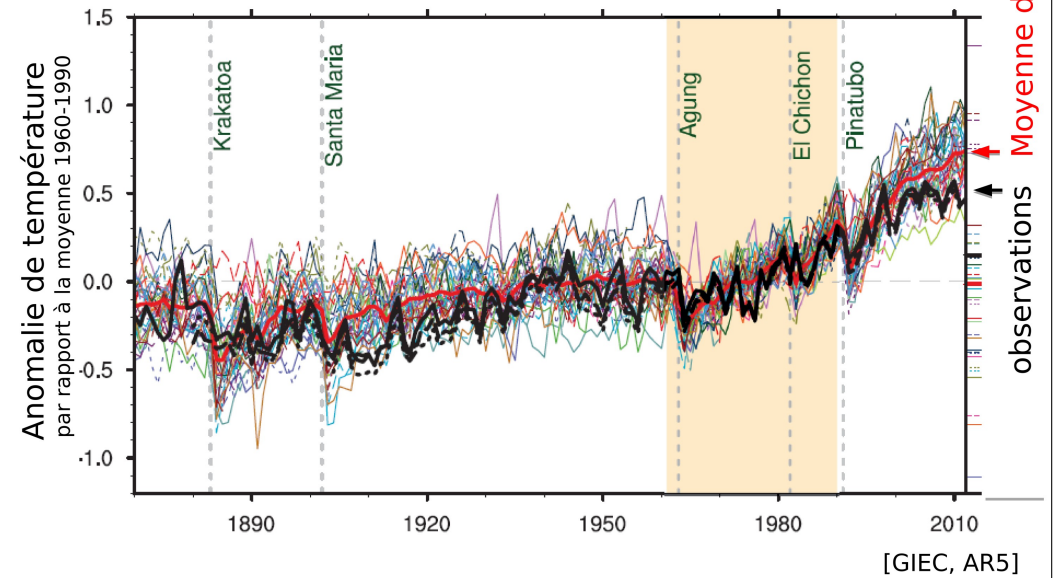
# Accroissement de CO<sub>2</sub> et température

## Origines de la dispersion entre les modèles

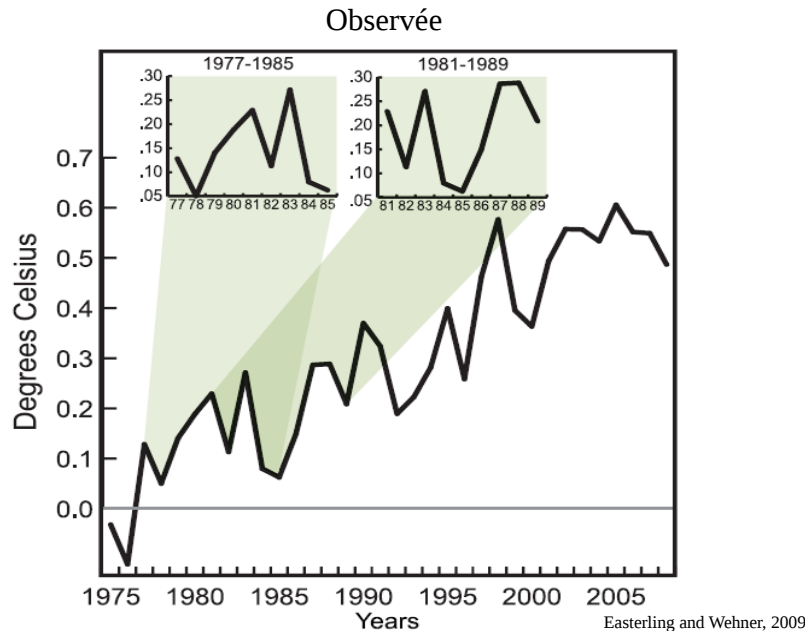


(Vial et al. 2013))

## Simulation de l'évolution récente du climat

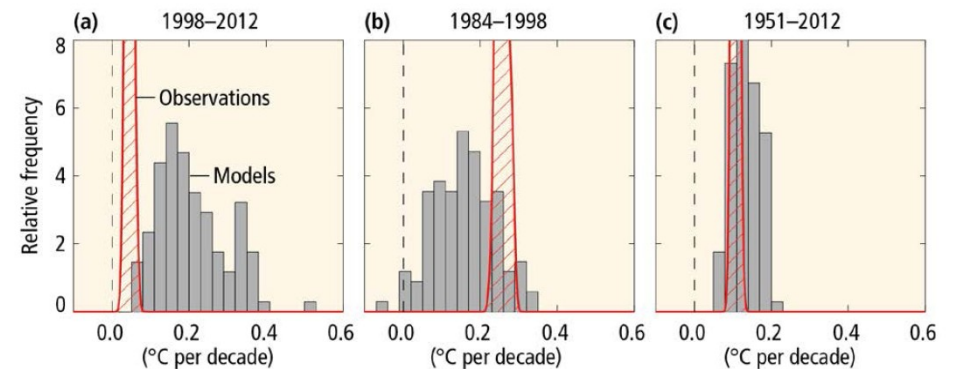


## Les variations du climat sont-elles régulières? Variations et variabilité du climat



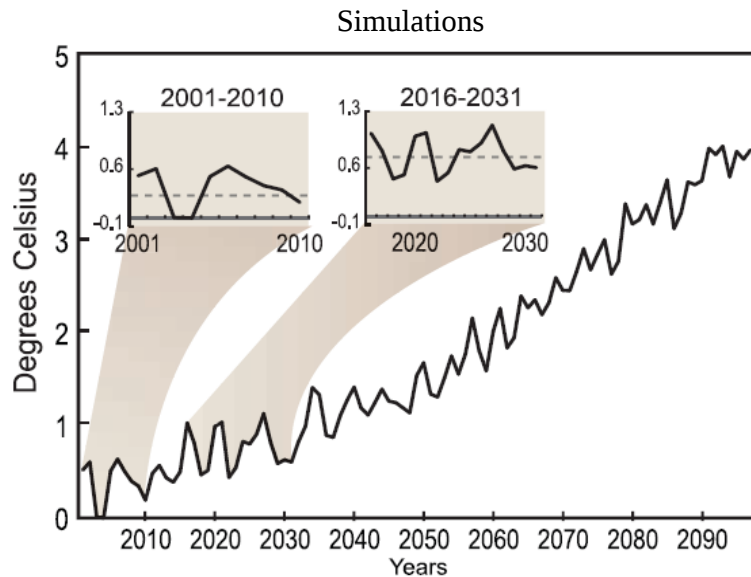
## Les variations du climat sont-elles régulières? Variations et variabilité du climat

### Tendances observées et simulées



[GIEC, 2013]

## Les variations du climat sont-elles régulières? Variations et variabilité du climat



Easterling and Wehner, 2009

## Plan

- I. Historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats
- V. Retour sur quelques questions
- VI. Qu'est-ce que le GIEC ?

La **Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques** (CCNUCC); adoptée au cours du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992 (ratifiée par 189 pays)

**Conférence des parties** (COP). Composée de tous les États parties, elle se réunit tous les ans pour analyser les avancées de la convention et prend des décisions pour atteindre les objectifs de lutte contre les changements climatiques.

1997: COP 3. **Signature du protocole de Kyoto**. Engagement de limitation de l'accroissement de gaz à effet de serre pour les pays industrialisés pour la période 2005-2012.

2009: **échec de la Conférence de Copenhague** (COP15) qui devait déboucher sur un accord global

**COP21 Conférence Paris Climat 2015**; trouver un accord qui permette de tenir l'objectif d'un réchauffement limité à 2 degrés.



## Qu'est-ce que le GIEC ?

- **GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais IPCC)
- Créé en 1988 par l'**Organisation météorologique mondiale** (OMM) et le **Programme des Nations Unies pour l'environnement** (PNUE)
- A pour mission d'établir **l'état des connaissances scientifiques** sur les changements climatiques et leurs possibles incidences sur l'environnement et les activités socio-économiques
- Ne **fait pas** ni organise la **recherche**

# Qu'est-ce que le GIEC ?

**GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais IPCC)

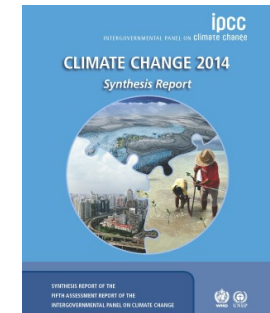
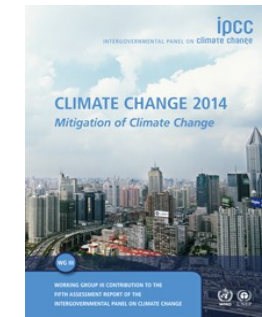
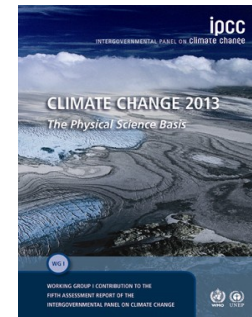
Trois groupes de travail:

**I- Les bases physiques des changements climatiques** et de l'évolution du climat

**II- Impacts, adaptations et vulnérabilités aux changements climatiques.** Vulnérabilité des systèmes socioéconomiques et naturels aux changements climatiques, les conséquences de ces changements et les possibilités de s'y adapter.

**III- Atténuation des changements climatique.** Solutions envisageables pour limiter les émissions de gaz à effet de serre ou atténuer de toute autre manière les changements climatiques.

## 2013-2014: 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation des 3 groupes du GIEC



## Conclusions

- L'accroissement de la température globale et le rôle dominant des activités humaines sont maintenant bien établis, compris
- Les questions relatives aux changements climatiques évoluent: passage de l'alerte à la quantification, la description et l'anticipation des risques associés
- Il y a un saut d'ordre de grandeurs sur les exigences vis-à-vis des modèles climatiques. Importance de la représentation des processus et de la compréhension des phénomènes climatiques
- Plus on s'intéresse aux phénomènes régionaux, aux courtes échelles de temps (décennies) ou aux phénomènes extrêmes, plus les incertitudes et la variabilité naturelle deviennent importants

## Quelques ressources

### Livres:

- Le climat à découvert - CNRS Editions

### Revues:

- « La Météorologie Revue de l'atmosphère et du climat » <http://meteoetclimat.fr/presentation-et-ligne-editoriale/> numéro spécial à paraître au printemps 2015
- Analyse et modélisation du changement climatique. 2e éditions du *Livre blanc Escrime*: [http://www.ipsl.fr/content/download/1513/13922/file/livre\\_blanco\\_escrime.pdf](http://www.ipsl.fr/content/download/1513/13922/file/livre_blanco_escrime.pdf)

### Web:

- GIEC: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- Le climat en questions: <http://www.climat-en-questions.fr/>
- ONERC <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation-et-missions.html>

### DVD:

- C'est pas sorcier: Effet de serre: coup de chaud sur la planète