

# CHANGEMENT CLIMATIQUE: BILAN, IMPACTS & ATTÉNUATION. QUELLES LEÇONS TIRER DU SUJET CARBONO-CLIMATIQUE?

ENSIMAG

1 Février 2022

< [geremy.panthou@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:geremy.panthou@univ-grenoble-alpes.fr) >



# I. Quelques mots introdutifs



# Animation avant d'entrer dans le sujet

## Pourquoi cette animation?

- Inclusion & participation
- Prendre la température dans  $\neq$  groupes
- Amélioration: contenu pédagogique **ET** posture/ton

## Consigne

1 post-it = 1 seule idée (1 réaction)

## Question

CHANGEMENT CLIMATIQUE: BILAN, IMPACTS & ATTÉNUATION.  
QUELLES LEÇONS TIRER DU SUJET CARBONO-CLIMATIQUE?

# 1 **Quelle réaction en voyant le titre de l'exposé? attentes? avis? ressentis?**

# Informations générales

- Sentez vous libres !!!
- Diapos dispo et diffusables
- Plan dans le bandeau noir du haut.
- Pause au milieu ? les “||” dans le bandeau
- Interactif: n’hésitez pas :-)



# Brève présentation

## Mes thématiques

Enseignement, observation & recherche

- Climat, hydrologie
- Extrêmes hydro-météorologiques ( $\neq$  régions du monde.)
- Curieux et ouvert à d'autres domaines/disciplines

## Communautés plus larges



# Rôles & postures

## Rôle de la Communauté Scientifique (tel que je le perçois)

Fixer des curseurs “étayés”



- Embarque  $\neq$  Valeurs [Pulkkinen et al., 2022]
- Créer et partager des connaissances
- Objectiver au maximum

Mais



il reste toujours une part de subjectivité!

- Ni hors-sol ni hors-société
- L'influence est mutuelle.
- Contrat science–société n'est pas écrit [Glavovic et al., 2021]
- D'autant plus vrai pour 1 personne/article/étude.

# Rôles & postures

## Rôle de la Communauté Scientifique (tel que je le perçois)

Fixer des curseurs “étayés”



- Embarque  $\neq$  Valeurs [Pulkkinen et al., 2022]
- Créer et partager des connaissances
- Objectiver au maximum

Mais



il reste toujours une part de subjectivité!

- Ni hors-sol ni hors-société
- L'influence est mutuelle.
- Contrat science–société n'est pas écrit [Glavovic et al., 2021]
- D'autant plus vrai pour 1 personne/article/étude.

**Réactions?**

# Rôles & postures

## Rôle de la Communauté Scientifique (tel que je le perçois)

Fixer des curseurs “étayés”



Mais



il reste toujours une part de  
subjectivité!

## Typologie de Messages

**J'essaierais d'indiquer le type de message, faites moi préciser si besoin!**

- Fait objectif: c'est l'essentiel de la présentation: consensus scientifique large, “gros” papiers (Nature, Science, PNAS, ...), organismes onusiens (IPCC, FAO, ...)
- Opinion étayée: plusieurs éléments allant dans un sens
- Préférence personnelle
- Pari/Acte de foi.

# Rôles & postures

## Rôle de la Communauté Scientifique (tel que je le perçois)

Fixer des curseurs “étayés”



Mais



il reste toujours une part de  
subjectivité!

## Typologie de Messages

**J'essaierais d'indiquer le type de message, faites moi préciser si besoin!**

## Pourquoi j'ai accepté la “demande”?

**Je ne suis pas neutre**

- Je pense qu'il y a un sujet “carbone climatique”
- Idéal démocratique → choix libres et éclairés
- .....

# PLan

## Le sujet “carbono-climatique” est partout tout le temps

Mais il y a t-il un sujet?

## Dans les traces du GIEC

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

3 groupes de travail:

- GT1: bases physiques
- GT2: impacts& adaptation
- GT3: atténuation

## Déclinaisons pour des problématiques concrètes

Quels outils/armes en tant que citoyen-ne ? jeune génération ? ingénieur-e / dimensionneur-se / solutionneur-se du territoire ? ...

1. dimensionnement/conception d'aménagements
2. mal(dés)information autour de la neutralité/compensation carbone



## II. Le sujet “carbone-climatique” est sur la table: tapage ou pas?



# Le sujet carbonno-climatique est sur la table

## Travail personnel

Matinale de FranceInfo depuis 1 semaine [30 minutes], Fil google actualités [matin et soir], Affiches dans la rue

⇒ **Carbone ou climat: à tous les coups j'ai gagné!**

## Sondage: Et vous?

Qui **n'a pas vu** entendu/vu/remarqué de messages climato-carbonés au cours de la dernière semaine?

# Le sujet carbono-climatique est sur la table

## Travail personnel

Matinale de FranceInfo depuis 1 semaine [30 minutes], Fil google actualités [matin et soir], Affiches dans la rue

⇒ **Carbone ou climat: à tous les coups j'ai gagné!**

## Sondage: Et vous?

Qui **n'a pas vu** entendu/vu/remarqué de messages climato-carbonés au cours de la dernière semaine?

## Sujet ou pas? Quelles options?

### 1. C'est un non-sujet

**Mais** il n'y a pas d'autres sujets importants à mettre sur la table

### 2. C'est un non-sujet

**Et** il y a d'autres sujets importants **donc** c'est un sujet

### 3. C'est un sujet

Tautologique: **donc** c'est un sujet

# Le sujet carbono-climatique est sur la table

## Travail personnel

Matinale de FranceInfo depuis 1 semaine [30 minutes], Fil google actualités [matin et soir], Affiches dans la rue

⇒ **Carbone ou climat: à tous les coups j'ai gagné!**

## Sondage: Et vous?

Qui **n'a pas vu** entendu/vu/remarqué de messages climato-carbonés au cours de la dernière semaine?

## Sujet ou pas? Quelles options?

### 1. C'est un non-sujet

**Mais** il n'y a pas d'autres sujets importants à mettre sur la table

### 2. C'est un non-sujet

**Et** il y a d'autres sujets importants **donc** c'est un sujet

### 3. C'est un sujet

Tautologique: **donc** c'est un sujet

**Sondage: 1, 2 ou 3?**

# Le sujet carbonno-climatique est sur la table

## Travail personnel

Matinale de FranceInfo depuis 1 semaine [30 minutes], Fil google actualités [matin et soir], Affiches dans la rue

⇒ **Carbone ou climat: à tous les coups j'ai gagné!**

## Sondage: Et vous?

Qui **n'a pas vu** entendu/vu/remarqué de messages climato-carbonés au cours de la dernière semaine?

## Sujet ou pas? Quelles options?

### 1. C'est un non-sujet

**Mais** il n'y a pas d'autres sujets importants à mettre sur la table

### 2. C'est un non-sujet

**Et** il y a d'autres sujets importants **donc** c'est un sujet

### 3. C'est un sujet

Tautologique: **donc** c'est un sujet

**Opinion personnelle.**

# Comment le sujet “carbono-climatique” est-t-il arriver au menu?

Interprétation personnelle: chocs **émotionnels** et **conceptuels** (non exhaustif):

- Partons de la plate terre infinie



# Comment le sujet “carbono-climatique” est-t-il arriver au menu?

Interprétation personnelle: chocs **émotionnels** et **conceptuels** (non exhaustif):

- Partons de la plate terre infinie
- **Terre ronde, héliocentrisme**
- **“Overview effect”**



*“ C’est l’imprévu de cette vue, de son incompatibilité avec tout ce que nous n’avons jamais connu sur terre qui provoque une réponse émotionnelle profonde ... Soudain, vous obtenez un sentiment que vous n’avez jamais eu avant ... Que vous êtes un habitant ... de la Terre.” – Oleg Makarov*

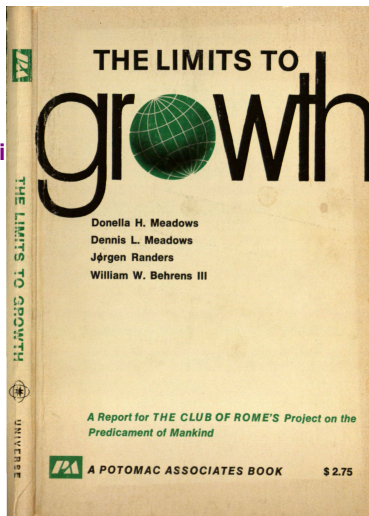
Plus d’infos: [https:](https://en.wikipedia.org/wiki/Overview_effect)

[//en.wikipedia.org/wiki/Overview\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Overview_effect)

# Comment le sujet “carbono-climatique” est-t-il arriver au menu?

Interprétation personnelle: chocs **émotionnels** et **conceptuels** (non exhaustif):

- Partons de la plate terre infinie
- **Terre ronde, héliocentrisme**
- **“Overview effect”**
- **Croissance infinie dans un monde fini**  
*[Meadows et al., 1972, 1992, 2009]*





# Comment le sujet “carbono-climatique” est-t-il arriver au menu?

Interprétation personnelle: chocs **émotionnels** et **conceptuels** (non exhaustif):

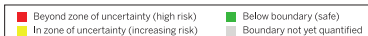
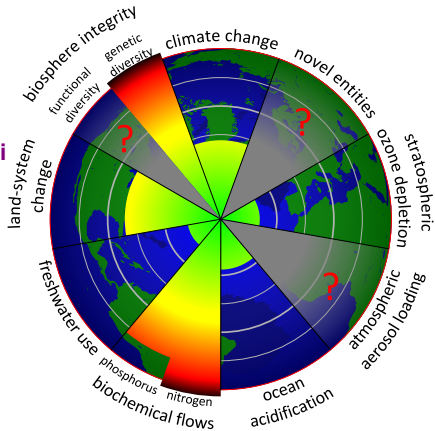
- Partons de la plate terre infinie
- **Terre ronde, héliocentrisme**
- **“Overview effect”**
- **Croissance infinie dans un monde fini**  
*[Meadows et al., 1972, 1992, 2009]*
- **Une limite atteinte: couche d’ozone**



# Comment le sujet “carbono-climatique” est-t-il arriver au menu?

Interprétation personnelle: chocs **émotionnels** et **conceptuels** (non exhaustif):

- Partons de la plate terre infinie
- **Terre ronde, héliocentrisme**
- **“Overview effect”**
- **Croissance infinie dans un monde fini**  
[Meadows et al., 1972, 1992, 2009]
- **Une limite atteinte: couche d’ozone**
- **D’autres limites planétaires apparaissent** [Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015b]



# Comment le sujet “carbono-climatique” est-t-il arriver au menu?

Interprétation personnelle: chocs **émotionnels** et **conceptuels** (non exhaustif):

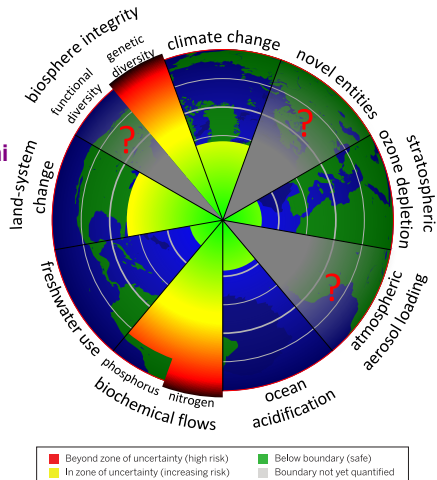
- Partons de la plate terre infinie
- **Terre ronde, héliocentrisme**
- **“Overview effect”**
- **Croissance infinie dans un monde fini**  
*[Meadows et al., 1972, 1992, 2009]*
- **Une limite atteinte: couche d’ozone**
- **D’autres limites planétaires apparaissent** *[Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015b]*
- **?????????**



# Comment le sujet “carbono-climatique” est-t-il arriver au menu?

Interprétation personnelle: chocs **émotionnels** et **conceptuels** (non exhaustif):

- Partons de la plate terre infinie
- **Terre ronde, héliocentrisme**
- **“Overview effect”**
- **Croissance infinie dans un monde fini**  
[Meadows et al., 1972, 1992, 2009]
- **Une limite atteinte: couche d’ozone**
- **D’autres limites planétaires apparaissent** [Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015b]
- **?????????**



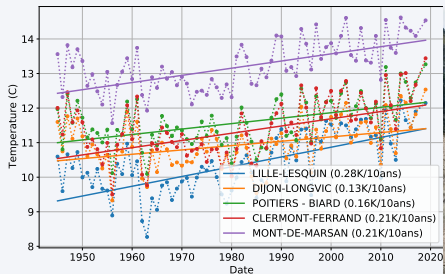
**Le climat: une seule des limites planétaires**

Pourquoi celle-ci? est-ce que cela ne cache pas la forêt ?

# Sujet carbonno-climatique: mais pourquoi tant de passion?

## On touche du doigt une des limites planétaires

Peu “accessibles” à nos sens **mais** d'ampleur telle que ça se voit, ça se (res)sent.



# Sujet carbonno-climatique: mais pourquoi tant de passion?

## On touche du doigt une des limites planétaires

Peu "accessibles" à nos sens **mais** d'ampleur telle que ça se voit, ça se (res)sent.

Long-term collapse in fruit availability  
threatens Central African forest megafauna

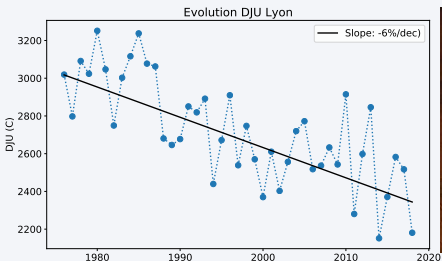
[*Bush et al., 2020*]



# Sujet carbonno-climatique: mais pourquoi tant de passion?

## On touche du doigt une des limites planétaires

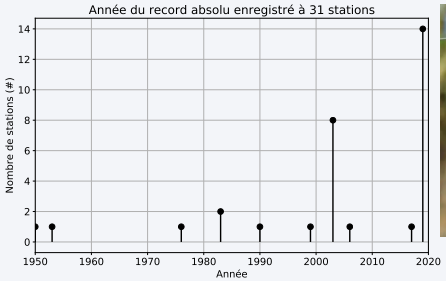
Peu “accessibles” à nos sens **mais** d'ampleur telle que ça se voit, ça se (res)sent.



# Sujet carbonno-climatique: mais pourquoi tant de passion?

## On touche du doigt une des limites planétaires

Peu "accessibles" à nos sens **mais** d'ampleur telle que ça se voit, ça se (res)sent.

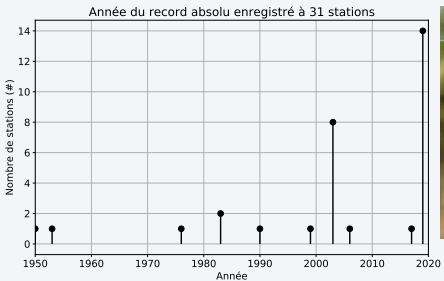




# Sujet carbonno-climatique: mais pourquoi tant de passion?

## On touche du doigt une des limites planétaires

Peu "accessibles" à nos sens **mais** d'ampleur telle que ça se voit, ça se (res)sent.

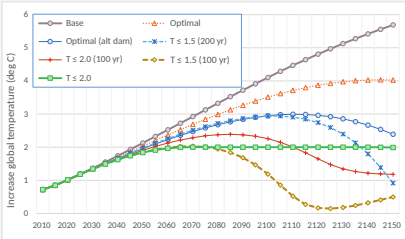


## Pb: pas de solutions simples.



# Une terre à +4°C: grand écart au sein du GIEC

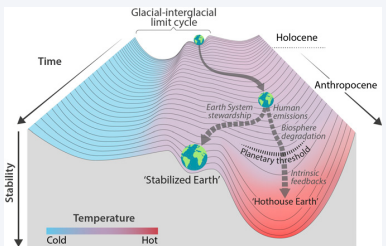
## Nordhaus (économiste)



Nobel slides(2018): "Optimal à +4°C"

VS.

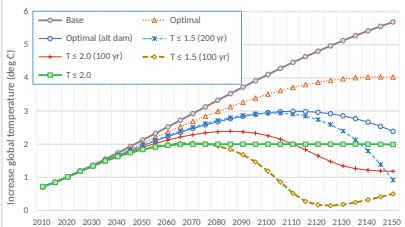
## Rockström (physicien)



Steffen *et al.* [2018]. Interview au Guardian: "difficult to see how we could accommodate eight billion people or maybe even half of that ... it will be a turbulent, conflict-ridden world ... The reason is primarily making enough food, ..."

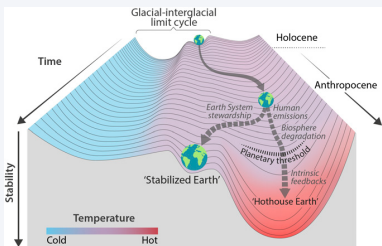
# Une terre à +4°C: grand écart au sein du GIEC

## Nordhaus (économiste)



VS.

## Rockström (physicien)



## Un choix à faire ou les deux faces de la même pièce?

≈ 25'

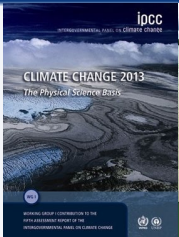
**Des questions / remarques ????**

### III. Réchauffement climatique: où en sommes nous et où allons nous?



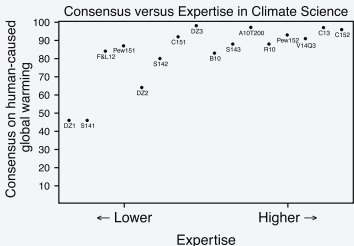
# Réchauffement d'origine anthropique: consensus autour du GT1 du GIEC

## GT1: Les bases Physiques du changement climatique



- Observations: Combien de degrés depuis l'ère pré-industrielle? Évolution des forçages climatiques?
- Attribution: Pourquoi ça chauffe? Quelle(s) cause(s)?
- Projections: Combien en plus d'ici 2050? 2100?
- Déclinaisons: disparités régionales? saisonnalité? extrêmes?

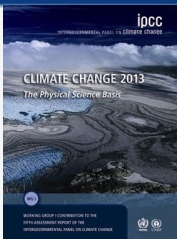
## Plus vraiment de controverses: "virtually certain"



**Consensus sur l'origine anthropique du réchauffement:  $\neq$  études estiment à plus de 95% parmi la communauté scientifique du climat**

# Réchauffement d'origine anthropique: consensus autour du GT1 du GIEC

## GT1: Les bases Physiques du changement climatique



- Observations: Combien de degrés depuis l'ère pré-industrielle? Évolution des forçages climatiques?
- Attribution: Pourquoi ça chauffe? Quelle(s) cause(s)?
- Projections: Combien en plus d'ici 2050? 2100?
- Déclinaisons: disparités régionales? saisonnalité? extrêmes?

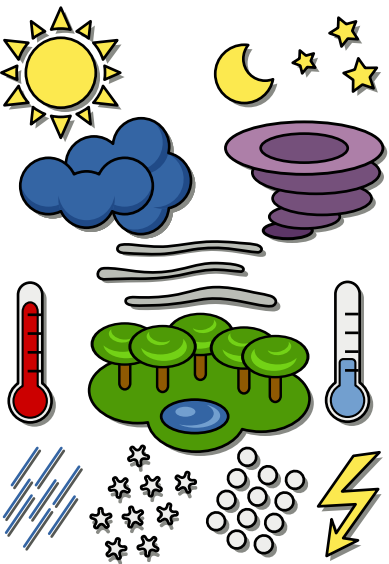
## Plus vraiment de controverses: "virtually certain"

- Conclusions GT1 du GIEC acceptées dans l'échiquier politique et la société civile.
- "Climate deniers" (I & II) se raréfient. À quelques exceptions:

**Type I** "Je ne crois pas au changement climatique, c'est juste de la météo [...] il y a des tempêtes, de la pluie, et des belles journées." (D. Trump 9/2015)

**Type II** "... mais je ne sais pas si c'est fait par l'homme." (D. Trump 10/2018)

# Météo vs climat vs réchauffement climatique



## Mêmes variables atmosphériques

Température, Précipitation, Nébulosité, Vent, Rayonnement, ...

**Quelle différence ?**



# Météo vs climat vs réchauffement climatique

## Météo

Instantané/Court terme et plutôt local

→ Mesurable via un capteur **ET** sensible par nos sens

## Climat

Échelle de temps plus longue: année, décennie, siècle.

→ Paramètres statistiques: moyenne, max, min ⇒ collecte & traitement des données

→ Difficilement accessible par nos sens

## Changement climatique

Tendance/variation de paramètres climatiques sur une longue période

→ Détecter un changement dans des paramètres statistiques ⇒ nécessite encore plus de traitements

→ Encore plus éloigné de nos sens

# Le climat terrestre: $\neq$ forçages et rétro-actions internes

Forçage externe = énergie solaire reçue  
(soleil + paramètres orbitaux)

Energie disponible = Soleil  
+ Forçages internes (tectonique,  
activité volcanique, GES, Albédo)

Ré-équilibre énergétique  
via les fluides terrestres

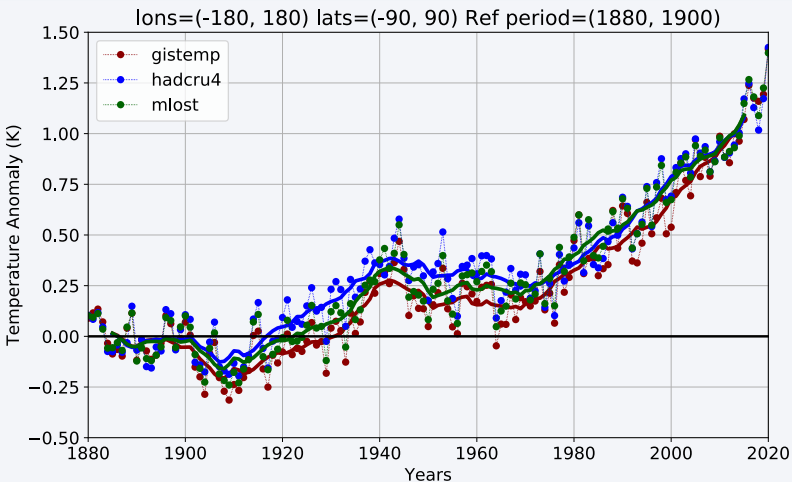
Évolutions passées?

- réponse climatique?
- forçages?



# Observations: réponse climatique

## Température moyenne terrestre (océan+terres)



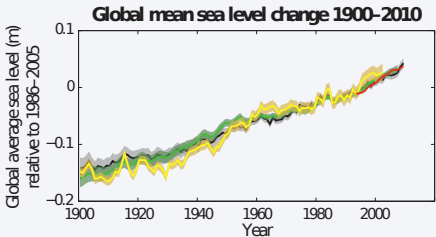
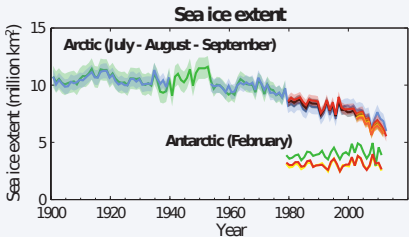
**Moyenne des 5 dernières années  $\approx +1.2^\circ\text{C}$  (par rapport à l'ère pre-industrielle)**

# Observations: réponse climatique

## Température moyenne terrestre (océan+terres)

Moyenne des 5 dernières années  $\approx +1.2^{\circ}\text{C}$  (par rapport à l'ère pre-industrielle)

## Niveau et mer et extension des glaces



Tendances à la baisse des glaces de mers et à la hausse du niveau marin

# Observations: réponse climatique

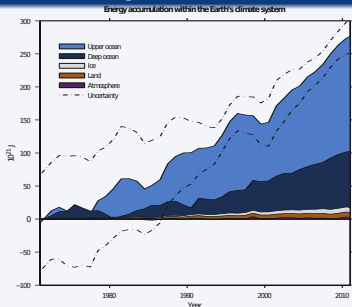
## Température moyenne terrestre (océan+terres)

Moyenne des 5 dernières années  $\approx +1.2^{\circ}\text{C}$  (par rapport à l'ère pre-industrielle)

## Niveau et mer et extension des glaces

Tendances à la baisse des glaces de mers et à la hausse du niveau marin

## Bilan d'énergie



## Accumulation d'énergie à la surface

- 90 % dans les océans
- $\approx 1\%$  dans l'atmosphère

$\Delta$  forçage radiatif net à la surface  $\approx 2.7[2; 3.5] \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (vs ère pré-industrielle)

# Observations: réponse climatique

## Température moyenne terrestre (océan+terres)

Moyenne des 5 dernières années  $\approx +1.2^{\circ}\text{C}$  (par rapport à l'ère pre-industrielle)

## Niveau et mer et extension des glaces

Tendances à la baisse des glaces de mers et à la hausse du niveau marin

## Bilan d'énergie

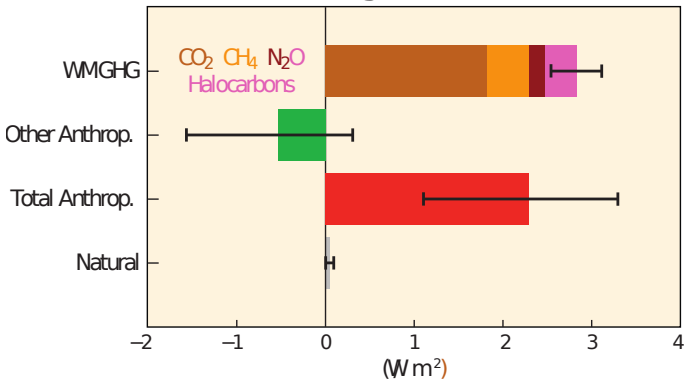
$\Delta$  forçage radiatif net à la surface  $\approx 2.7[2; 3.5] \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (vs ère pré-industrielle)

## Effet “zoom” (variabilité naturelle) ? ou “réelle” tendance ?

*“Warming of the climate system is unequivocal, and since the 1950s, many of the observed changes are unprecedented over decades to millennia. The atmosphere and ocean have warmed, the amounts of snow and ice have diminished, and sea level has risen.” [IPCC, 2014]*

# Observations: forçages climatiques

## Radiative forcing in 2011 relative to 1750

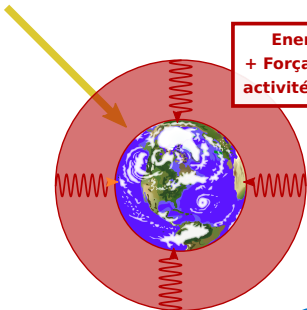


### En résumé

- Volcanisme (aérosol stratosphérique):  $\searrow \bar{T}$  lors éruptions majeures
- Radiation solaire: peu de changements
- Gaz à effet de serre: forte hausse

# Attribution: comprendre les évolutions et leurs causes

Forçage externe = énergie solaire reçue  
(soleil + paramètres orbitaux)



Energie disponible = Soleil  
+ Forçages internes (tectonique,  
activité volcanique, GES, Albédo)

Ré-équilibre énergétique  
via les fluides terrestres



## Évolutions passées?

- réponse climatique?
- forçages?

## Attribution

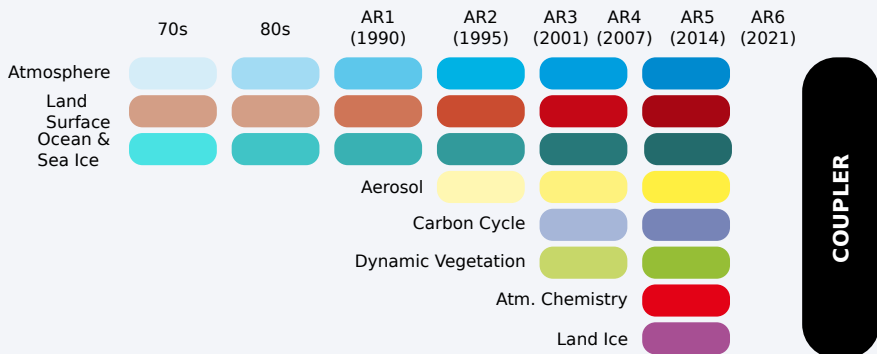
Lien entre ces évolutions?  
⇒ modèles numériques:  
Causes&Effets



# Attribution: comprendre les évolutions et leurs causes

## Sous le capot des modèles climatiques (maintenant Earth System Model)

Des équations (différentielles, paramétrés) pour  $\neq$  processus des  $\neq$  compartiments, reliées via un coupleur

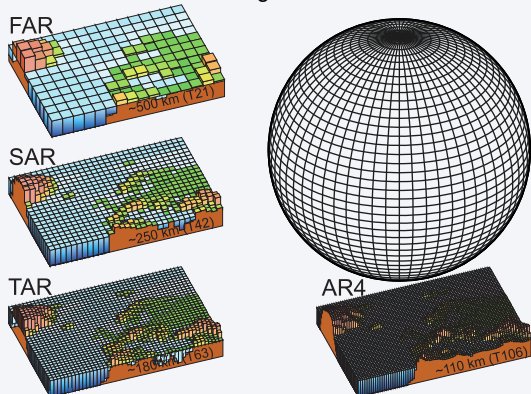


# Attribution: comprendre les évolutions et leurs causes

## Sous le capot des modèles climatiques (maintenant Earth System Model)

Des équations (différentielles, paramétrés) pour  $\neq$  processus des  $\neq$  compartiments, reliées via un coupleur

Et résolues sur un maillage de la terre en 3D

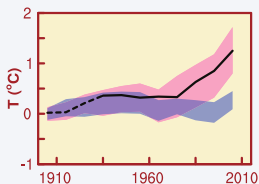


# Attribution: comprendre les évolutions et leurs causes

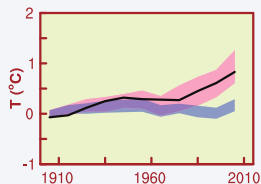
## Comparaison simulations & observations

### Global averages

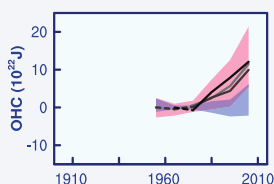
Land surface



Land and ocean surface



Ocean heat content



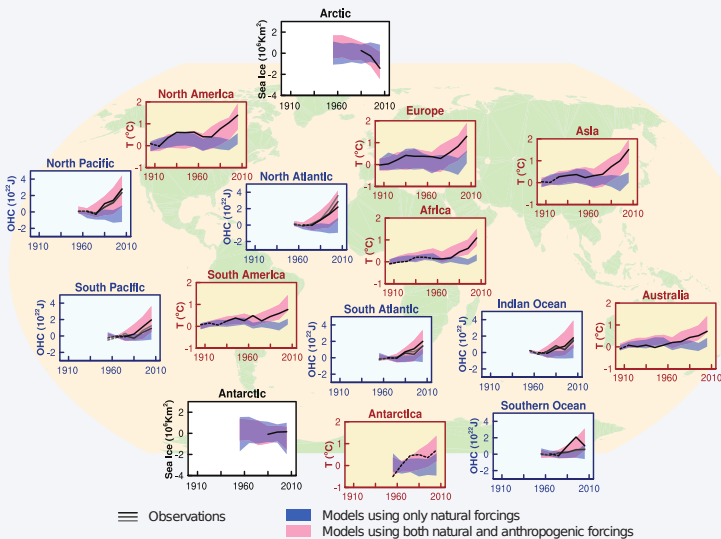
≡ Observations

■ Models using only natural forcings

■ Models using both natural and anthropogenic forcings

# Attribution: comprendre les évolutions et leurs causes

## Comparaison simulations & observations



# Attribution: comprendre les évolutions et leurs causes

## Résultat de l'attribution

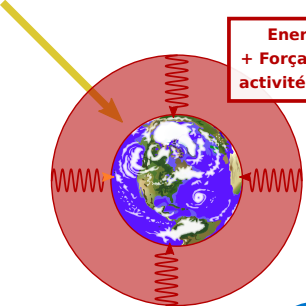
- ✗ Sans GES Anthropique on arrive pas à reproduire les évolutions passées.
- ✓ Avec forçages anthropiques oui: pour  $\neq$  régions et  $\neq$  variables.

## L'origine anthropique du réchauffement est:

- consensus scientifique
  - compréhensible/ appréhendable
  - bonne capacité prédictive
  - cohérente: théorie, observations, simulations
  - toutes les hypothèses alternatives n'ont pas passées ce cap
  - la seule hypothèse à disposition à l'heure actuelle.
- ⇒ la suite de l'exposé suppose cette hypothèse vraie

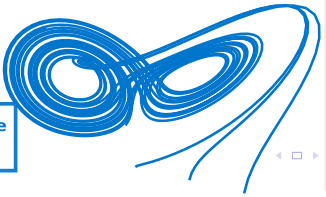
# Projections futures

Forçage externe = énergie solaire reçue  
(soleil + paramètres orbitaux)



Energie disponible = Soleil  
+ Forçages internes (tectonique,  
activité volcanique, GES, Albédo)

Ré-équilibre énergétique  
via les fluides terrestres



## Évolutions passées?

- réponse climatique?
- forçages?

## Attribution

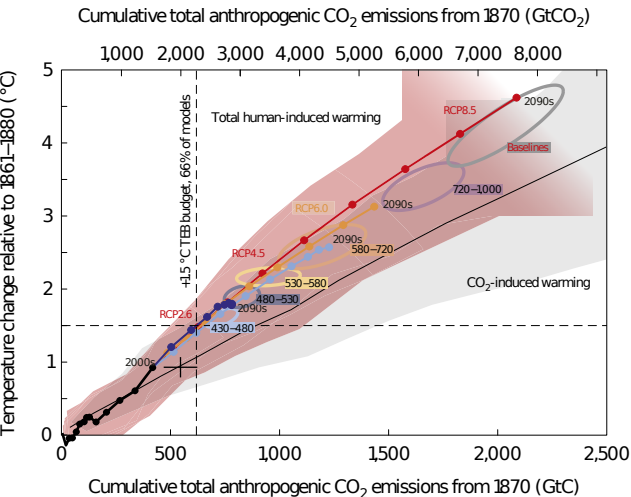
Lien entre ces évolutions?  
⇒ modèles numériques:  
Causes&Effets

## Et le futur?

Temps de latence: qq  
décennies

- 10-20 ans: déjà dans l'air?
- Après: ça dépendra de nos choix

# Projections futures



## Figure emblématique

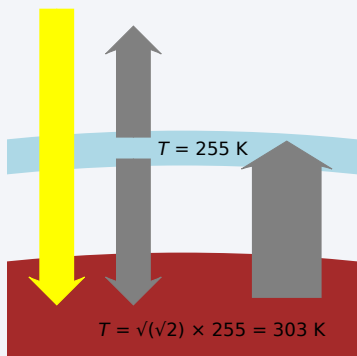
- Réponse simple d'un système complexe:  
 $\Delta T_{global} \propto \text{cumul CO}_2 \text{ émis.}$  **Pourquoi?**

# Le mal nommé “effet de serre”?

## L'effet de serre: Schéma illustratif

Rayonnement infra-rouge d'un corps noir  
(Stefan–Boltzmann)

$$\epsilon \times \sigma \times T^4$$



## Température de la terre

Valable uniquement pour  
l'illustration

- Sans Atmosphère (pas d'effet de serre):  $255\text{K} \approx -18^\circ\text{C}$
- Avec l'effet de serre de l'atmosphère:  $288\text{K} \approx 15^\circ\text{C}$



# Le mal nommé “effet de serre”?

## 1. Absorptivité du CO2 saturée et notion d'altitude d'émission

Schématiquement

**Basse couche (zone aveugle)** Rayonnement IR de la surface  
totalement absorbé puis ré-émis (dans  
toutes les directions)

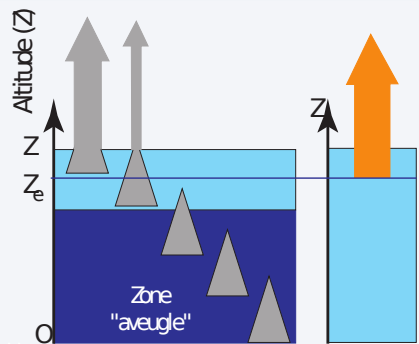
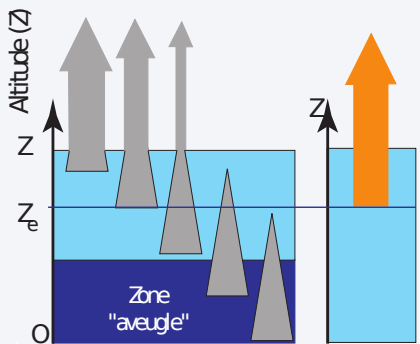
**Moyenne troposphère** Une partie du rayonnement émis atteint  
l'espace

**Haute troposphère** La quasi totalité atteint l'espace

⇒ Altitude d'émission: altitude moyenne à laquelle le rayonnement qui atteint l'espace  
est émis

# Le mal nommé "effet de serre"?

## 1. Absorptivité du CO<sub>2</sub> saturée et notion d'altitude d'émission



# Le mal nommé “effet de serre”?

## 1. Absorptivité du CO<sub>2</sub> saturée et notion d'altitude d'émission

Hausse de pCO<sub>2</sub> ⇒ ↘ distance parcouru par un rayon IR avant absorption ⇒ Hausse de l'altitude d'émission

## 2. $IR = \epsilon \times \sigma T(Ze)^4$

Si atm isotherme pas “d'effet de serre”

## 3. Gradient adiabatique

Adiabatique d'une atmosphère sèche: l'énergie statique est conservée

$$es = cpT + gz = cst$$

$$\Rightarrow dT/dz = -g/cp = -9.8^\circ/\text{km}$$

Atmosphère Humide  $\approx -6.5^\circ/\text{km}$

# Le mal nommé “effet de serre”?

## 1. Absorptivité du CO<sub>2</sub> saturée et notion d'altitude d'émission

Hausse de pCO<sub>2</sub> ⇒ ↘ distance parcouru par un rayon IR avant absorption ⇒ Hausse de l'altitude d'émission

## 2. $IR = \epsilon \times \sigma T(Ze)^4$

Si atm isotherme pas “d'effet de serre”

## 3. Gradient adiabatique

Adiabatique d'une atmosphère sèche: l'énergie statique est conservée

$$es = cpT + gz = cst$$

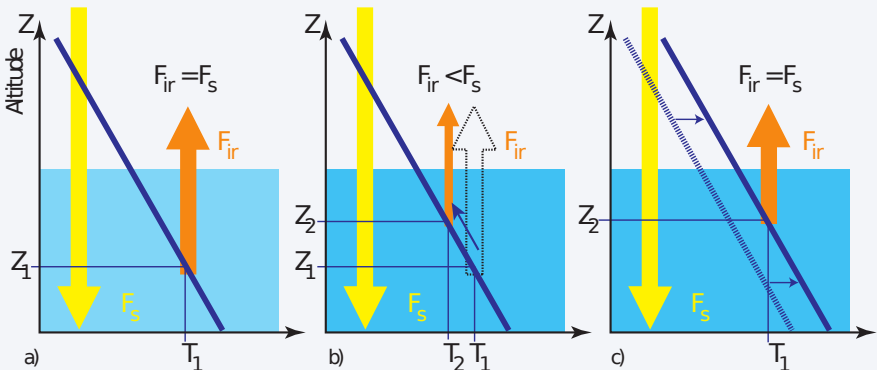
$$\Rightarrow dT/dz = -g/cp = -9.8^\circ/\text{km}$$

Atmosphère Humide  $\approx -6.5^\circ/\text{km}$

1. & 2. & 3. ⇒ rayonnement IR vers l'espace ↘ lorsque pCO<sub>2</sub> ↗.

# Le mal nommé “effet de serre”?

L'accroissement de la température se fait “par le haut”



⇒ Effet de serre de serre additionnel: ce n'est pas instantané

Source et explications supplémentaires [Dufresne and Treiner, 2011]:

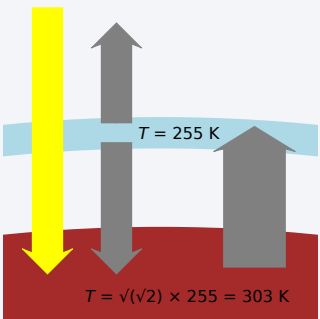
<https://www.climat-en-questions.fr/reponse/fonctionnement-climat/>

effet-serre-par-philippe-bousquet-jean-louis-dufresne

# Le mal nommé 'effet de serre'

## L'effet de serre: Schéma illustratif

Rayonnement infra-rouge d'un corps noir (Stefan-Boltzmann):  $\epsilon \times \sigma \times T^4$



- Sans Atmosphère (pas d'effet de serre):  $\approx -18^\circ\text{C}$
- Avec l'effet de serre de l'atmosphère:  $\approx 15^\circ\text{C}$

**Valable uniquement pour l'illustration**

## Réalité bien plus complexe

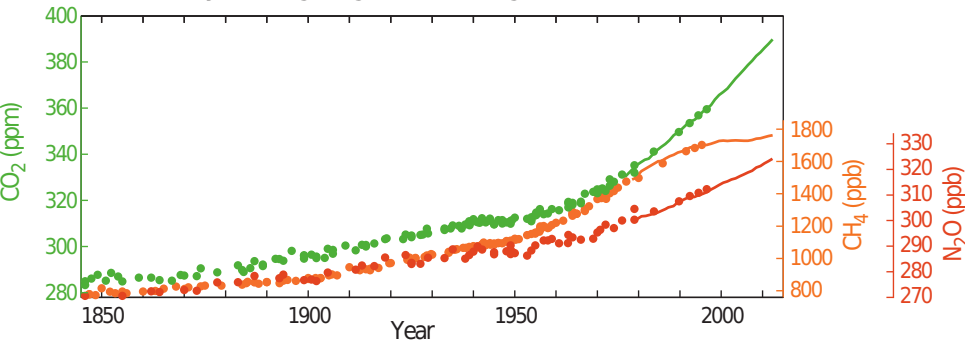
Pour aller plus loin: Source et explications supplémentaires [Dufresne and Treiner, 2011]: ICI

**À retenir**

$$\Delta \overline{T_{\text{global}}} \propto p\text{CO}_2$$

# Le carbone émis s'accumule dans l'atmosphère

## Globally averaged greenhouse gas concentrations



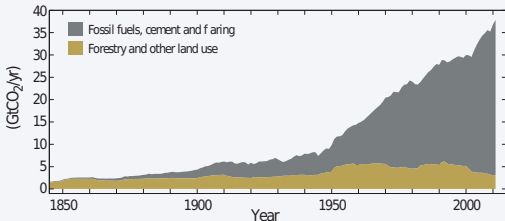
### Quelques repères

- 280 ppm à l'aube de la révolution industrielle
- 400 ppm: barre "emblématique" dépassée la première fois en 2017

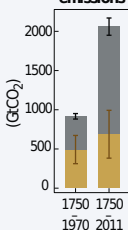
# Le carbone émis s'accumule dans l'atmosphère

## Une source de GES ...

Global anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions



Cumulative CO<sub>2</sub> emissions



**Bilan pour  
l'atmosphère**  
 $\approx +20 \text{ GtCO}_2\text{eq/an}$   
**Airborne fraction**  
 $\text{cst} \approx 0.45 \text{ stable}$

## ... et des puits

- Océans
- Surfaces continentales (végétation)
- Atmosphère

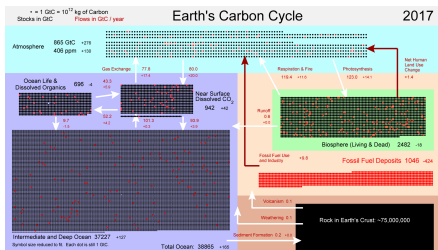
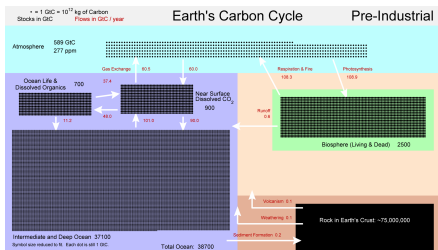


# Le carbone émis s'accumule dans l'atmosphère

../commons/The\_Earth's\_Carbon\_Cycle.mp4

Source ici: <https://www.youtube.com/watch?v=dwVsD9CiokY>

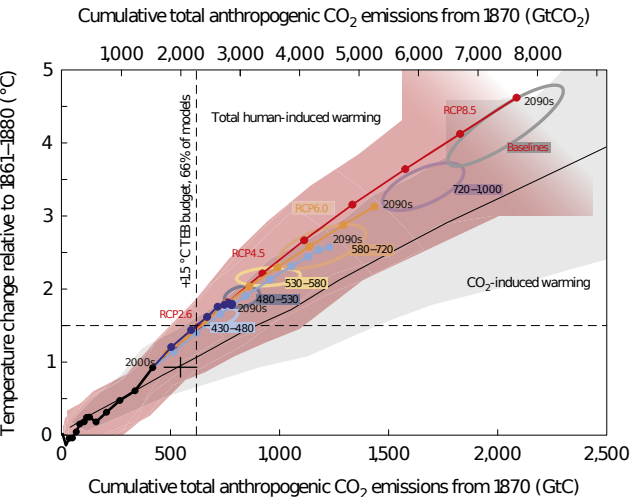
# Le carbone émis s'accumule dans l'atmosphère



À retenir

$pCO_2 \propto \text{cumul } CO_2 \text{ émis}$

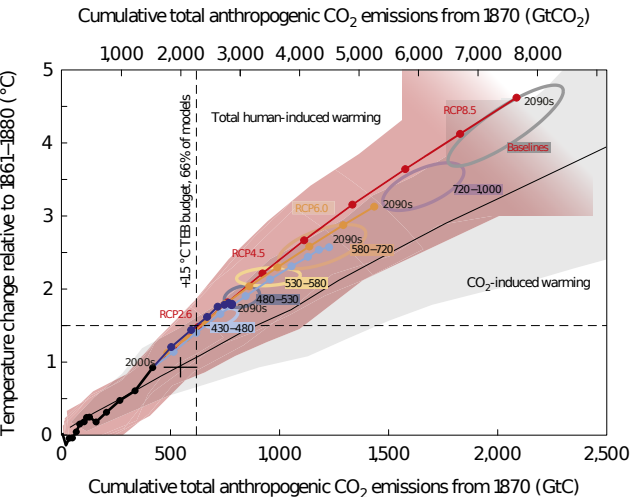
# En Bref



## Figure emblématique

- Réponse simple d'un système complexe:  
 $\Delta T_{global} \propto pCO_2 \propto \text{cumul CO}_2 \text{ émis.}$

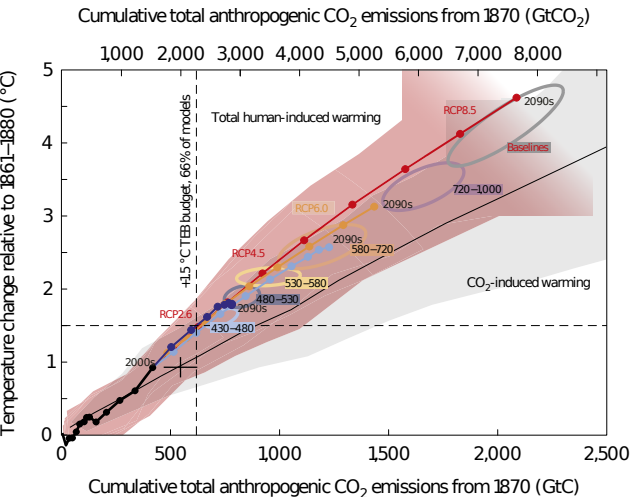
# En Bref



## Figure emblématique

- Réponse simple d'un système complexe:  
 $\Delta T_{global} \propto pCO_2 \propto \text{cumul CO}_2 \text{ émis.}$
- Outil d'aide à la décision
  - $\Delta T_{global} \Rightarrow$  lien vers impacts.
  - Cumul CO<sub>2</sub> émis  $\Rightarrow$  lien vers causes.

# En Bref



## Figure emblématique

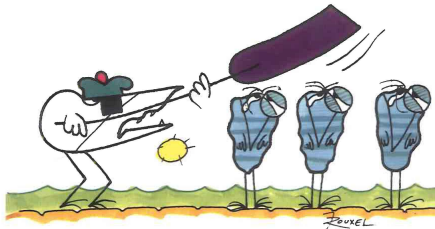
- Réponse simple d'un système complexe:  
 $\Delta T_{global} \propto pCO_2 \propto \text{cumul CO}_2 \text{ émis.}$
- Outil d'aide à la décision
  - $\Delta T_{global} \Rightarrow$  lien vers impacts. **Lesquels?**
  - Cumul CO<sub>2</sub> émis  $\Rightarrow$  lien vers causes.

≈ 1h

**Des questions / remarques ????**

# IV. Du réchauffement au dérèglement climatique: Impacts & Adaptation

*La devise Shadok de la semaine*



POUR QU'IL Y AIT LE MOINS DE  
MÉCONTENTS POSSIBLE IL FAUT TOUJOURS  
TAPER SUR LES MÊMES.

# Le GT2 du GIEC: impact, adaptation et vulnérabilité

## GT2: pourquoi doit-t-on se préoccuper de qq degrés de plus!



- Quels impacts (positifs/négatifs) prévisibles?
- Peut-t-on s'adapter à tout ?
- Injustice & Équité?

## Résultats - “certains” & + controversés (même par le GT3 du GIEC) ...

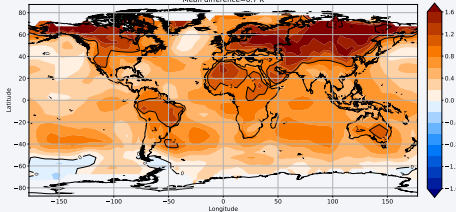
... en route vers l'incertitude.



# Impacts: disparités régionales et cycle de l'eau

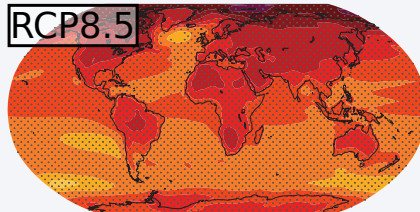
## Observations

Temperature difference (2000, 2020) - (1950, 1970)  
Mean difference=0.7 K

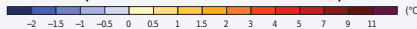


## Projections

RCP8.5



Change in average surface temperature  
(1986-2005 to 2081-2100)



## Réchauffement partout

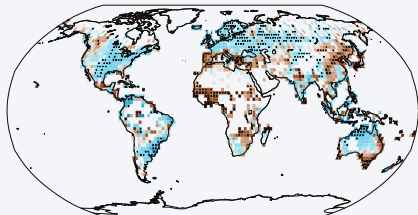
### Mais fortes disparités régionales:

- Contraste Terres/Océans
- Zones polaires et semi-arides se réchauffent plus fortement

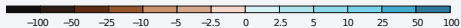
# Impacts: disparités régionales et cycle de l'eau

## Observations

1951–2010



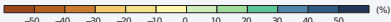
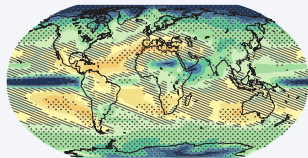
Observed change in annual precipitation over land



(mm yr<sup>-1</sup> per decade)

## Projections

RCP 8.5



Change in average precipitation (1986–2005 to 2081–2100)

## Précipitations: tendance globale à l'augmentation

Signal bcp moins clair (forte variabilité temporelle) et fortes disparités régionales observées et attendues

# Impacts: disparités régionales et cycle de l'eau

## Intensification hydrologique globale: théorie, observations & modèles

**Pluies moyennes (Énergie)**

**1 to 4 % K<sup>-1</sup>**

**Pluies extrêmes (Thermodynamique)**

**≈ 7 % K<sup>-1</sup>**

# Impacts: disparités régionales et cycle de l'eau

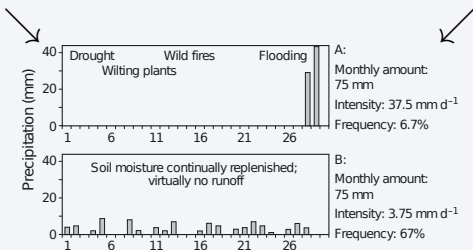
## Intensification hydrologique globale: théorie, observations & modèles

### Pluies moyennes (Énergie)

1 to 4 %  $K^{-1}$

### Pluies extrêmes (Thermodynamique)

$\approx 7\% K^{-1}$



**Hausse de l'intensité hydro-climatique: sécheresses + longues & pluies intenses + fortes**

# Impacts: disparités régionales et cycle de l'eau

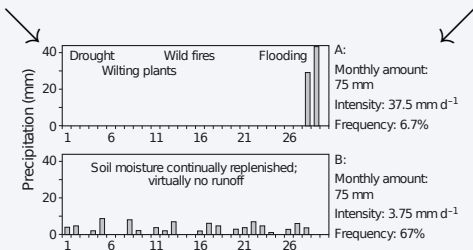
## Intensification hydrologique globale: théorie, observations & modèles

### Pluies moyennes (Énergie)

1 to 4 %  $K^{-1}$

### Pluies extrêmes (Thermodynamique)

$\approx 7\% K^{-1}$



**Hausse de l'intensité hydro-climatique: sécheresses + longues & pluies intenses + fortes**

**Effets multi-échelles de la dynamique atmosphérique  $\Rightarrow$  des disparités régionales**

# Une “dérive” et des “chocs”



## Mais où est le pb?

Hypothèses du “climate denier” (type III)

- “Dérive”: l’humanité s’est adaptée à tout les climats (on remplace le temps par l’espace)
- Extrêmes hydro-meteo: on peut s’adapter à tout (la “technologie” nous sauvera)

## Argumentation imparable

Sauf à s’attaquer aux prémisses:

- quelle est notre dépendance au climat?
- quid de la physiologie humaine? de la biodiversité?

# Dépendance et adaptation au climat: réflexions préliminaires

## Dictons et al.: Témoignages de nos adaptations aux climats locaux

Que le lien de cause à effet soit réel ou non: ce qui a une capacité prédictive reste dans les récits et dans l'imaginaire collectif.

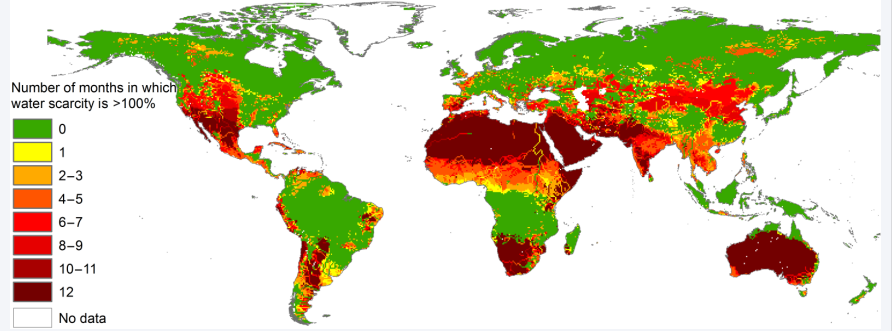
## Exemples

- Petite histoire amérindienne: el nino
- En Avril ne te découvre pas d'un fil
- Les saints de glace
- Apprentissage des vignes et degrés jours

# Dépendance et adaptation au climat: Quels secteurs ?

## L'eau

Des ressources inégalement réparties  $\Rightarrow$  infrastructures adaptées

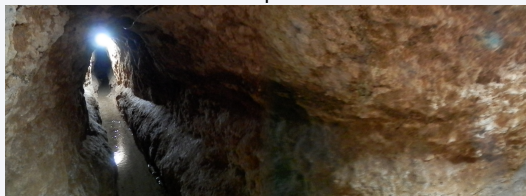
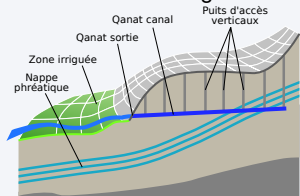




# Dépendance et adaptation au climat: Quels secteurs ?

## L'eau

Des ressources inégalement réparties  $\Rightarrow$  infrastructures adaptées



# Dépendance et adaptation au climat: Quels secteurs ?

## L'eau

Des ressources inégalement réparties  $\Rightarrow$  infrastructures adaptées

## Le bâtis

De la protection la plus rudimentaire à la recherche du confort (thermique, ...)



# Dépendance et adaptation au climat: Quels secteurs ?

## L'eau

Des ressources inégalement réparties  $\Rightarrow$  infrastructures adaptées

## Le bâtis

De la protection la plus rudimentaire à la recherche du confort (thermique, ...)



# Dépendance et adaptation au climat: Quels secteurs ?

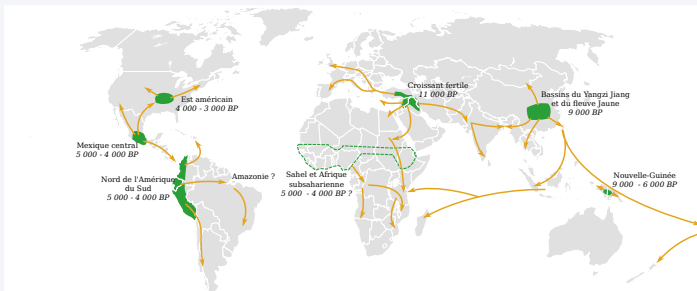
## L'eau

Des ressources inégalement réparties  $\Rightarrow$  infrastructures adaptées

## Le bâtis

De la protection la plus rudimentaire à la recherche du confort (thermique, ...)

## Agriculture: céréales, maraichage, élevage



D'après J. Diamond et al. (2003) "Farmers and Their Languages: The First Expansions", Science

# Dépendance et adaptation au climat: Quels secteurs ?

## L'eau

Des ressources inégalement réparties  $\Rightarrow$  infrastructures adaptées

## Le bâtis

De la protection la plus rudimentaire à la recherche du confort (thermique, ...)

## Agriculture: céréales, maraichage, élevage



Maïs  
575 mm/an  
635 10<sup>6</sup> tonnes



Riz  
770 mm/an  
585 10<sup>6</sup> tonnes



Blé  
550 mm/an  
557 10<sup>6</sup> tonnes



Sorgho  
475mm/an  
59 10<sup>6</sup> tonnes

Besoins en eau  
Production Année 2003 (FAO)

# Dépendance et adaptation au climat: Quels secteurs ?

## L'eau

Des ressources inégalement réparties  $\Rightarrow$  infrastructures adaptées

## Le bâtis

De la protection la plus rudimentaire à la recherche du confort (thermique, ...)

## Agriculture: céréales, maraichage, élevage

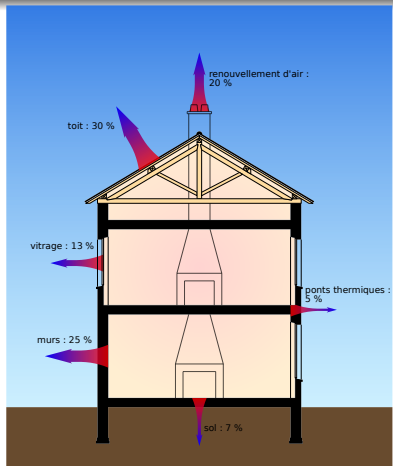
## Si les précédents secteurs sont des piliers des sociétés complexes

alors quels secteurs ne seraient pas dépendants du climat de près ou de loin?

# Dépendance et adaptation au climat: paramètres “décisionnels”?

## Pour se protéger/se prémunir

Saisonnalité (froid hivernal & chaleurs estivales) + événements hydro-météorologiques “impactants” (crues, sécheresse, canicule, ...)



# Dépendance et adaptation au climat: paramètres “décisionnels”?

## Pour se protéger/se prémunir

Saisonnalité (froid hivernal & chaleurs estivales) + événements hydro-météorologiques “impactants” (crues, sécheresse, canicule, ...)





# Dépendance et adaptation au climat: paramètres “décisionnels”?

## Pour se protéger/se prémunir

Saisonnalité (froid hivernal & chaleurs estivales) + événements hydro-météorologiques “impactants” (crues, sécheresse, canicule, ...)



# Dépendance et adaptation au climat: paramètres “décisionnels”?

## Pour se protéger/se prémunir

Saisonnalité (froid hivernal & chaleurs estivales) + événements hydro-météorologiques “impactants” (crues, sécheresse, canicule, ...)

## S'aider/s'appuyer sur les ressources climatiques

Énergies renouvelables, cultures, tourisme, ...



# Dépendance et adaptation au climat: paramètres “décisionnels”?

## Pour se protéger/se prémunir

Saisonnalité (froid hivernal & chaleurs estivales) + événements hydro-météorologiques “impactants” (crues, sécheresse, canicule, ...)

## S'aider/s'appuyer sur les ressources climatiques

Énergies renouvelables, cultures, tourisme, ...



# Dépendance et adaptation au climat: paramètres “décisionnels”?

## Pour se protéger/se prémunir

Saisonnalité (froid hivernal & chaleurs estivales) + événements hydro-météorologiques “impactants” (crues, sécheresse, canicule, ...)

## S'aider/s'appuyer sur les ressources climatiques

Énergies renouvelables, cultures, tourisme, ...



# Dépendance et adaptation au climat: paramètres “décisionnels”?

## Pour se protéger/se prémunir

Saisonnalité (froid hivernal & chaleurs estivales) + événements hydro-météorologiques “impactants” (crues, sécheresse, canicule, ...)

## S'aider/s'appuyer sur les ressources climatiques

Énergies renouvelables, cultures, tourisme, ...

## ⇒ Indicateurs spécifiques à chaque adaptation/solution

⇒ Obtenus sous hypothèse stationnaire .... Et la température moyenne ? et précipitations annuelle moyennes?

# Dépendance et adaptation au climat: paramètres “décisionnels”?

id	Station	$\bar{T}$ (°C)	$\bar{P}$ (mm/an)
755	EMBRUN	10.9	720
2192	BASEL-MULHOUSE	10.9	760
11243	TROYES-BARBEREY	11.0	640
737	LILLE-LESQUIN	11.0	730
2200	MILLAU	11.1	700
740	ALENCON	11.1	730

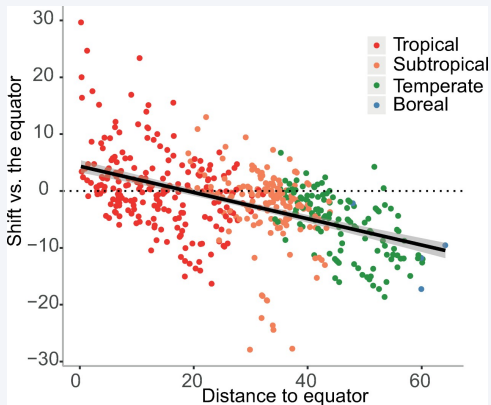
**Climat dans sa globalité influence les adaptations et les modes de vie**

Températures et précipitations moyennes ne reflètent pas toute cette finesse.

# Dépendance et adaptation au climat: paramètres “décisionnels”?

## Alors pourquoi s'inquiéter d'un réchauffement de qq degrés?

Une étude qui a fait du bruit: *Bastin et al. [2019a]*

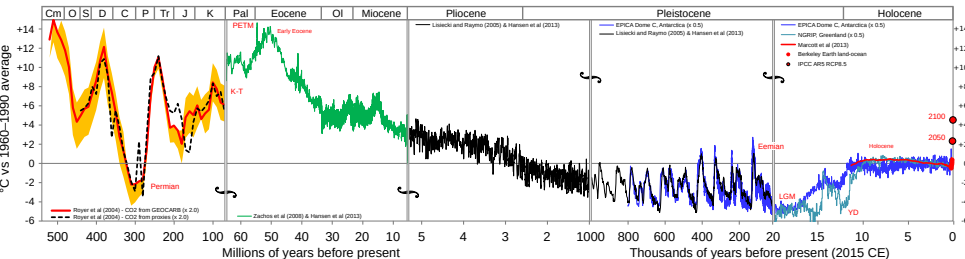


*“We notably predict that Madrid’s climate in 2050 will resemble Marrakech’s climate today, Stockholm will resemble Budapest, London to Barcelona, Moscow to Sofia, Seattle to San Francisco, Tokyo to Changsha.”*

$\Delta \bar{T}$  &  $\Delta \bar{P}$  à un endroit donné reflètent des changements du climat local pour  $\neq$  paramètres climatiques

# Un climat global stable depuis qq milliers d'années

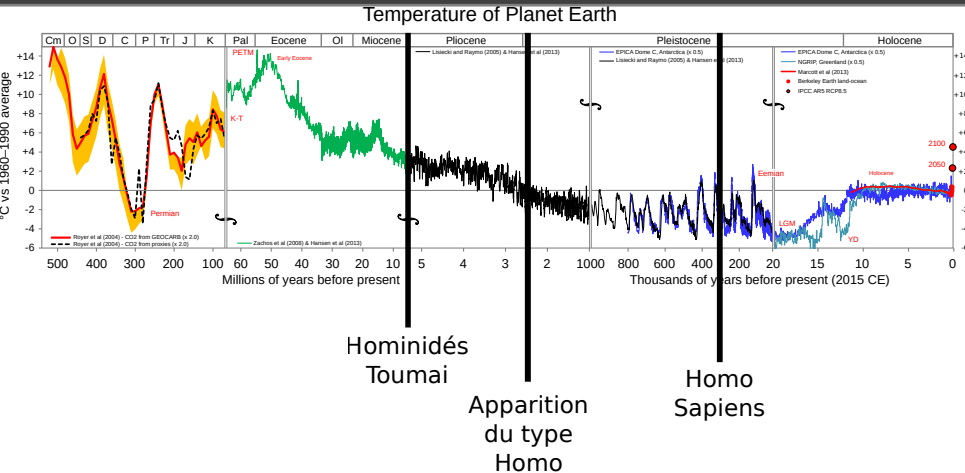
Temperature of Planet Earth



**La stabilité du climat: n'est-ce pas le paramètre essentiel pour le développement et l'adaptation des sociétés complexes?**

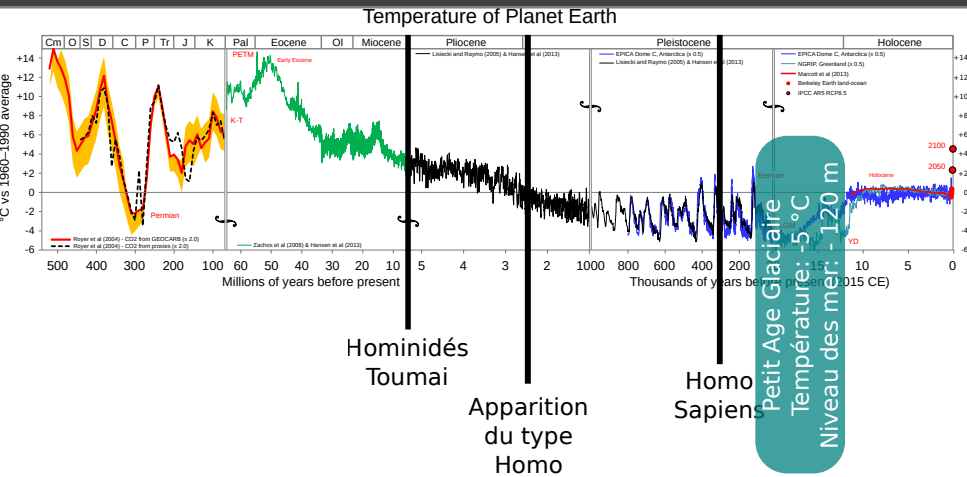


# Un climat global stable depuis qq milliers d'années

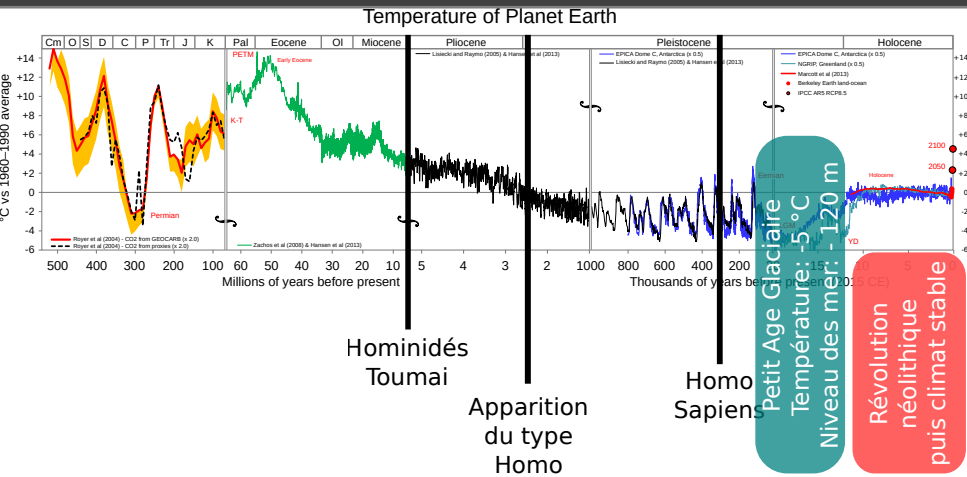


**La stabilité du climat: n'est-ce pas le paramètre essentiel pour le développement et l'adaptation des sociétés complexes?**

# Un climat global stable depuis qq milliers d'années



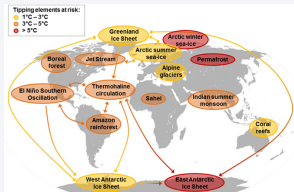
# Un climat global stable depuis qq milliers d'années



**La stabilité du climat: n'est-ce pas le paramètre essentiel pour le développement et l'adaptation des sociétés complexes?**

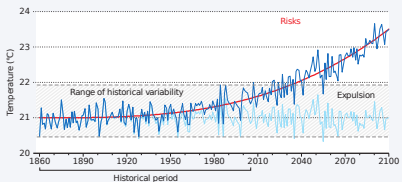
# Une “dérive” vers un nouveau climat

## Dérive & bascules climatiques



Steffen et al. [2018]

## Vers un climat inconnu



Power [2014]: “expulsion from history”

## Bref: R.D.V en “terra incognita”

### Future of the human climate niche

Chi Xu ( )<sup>a,1</sup>, Timothy A. Kohler<sup>b,c,d,e</sup>, Timothy M. Lenton<sup>f</sup>, Jens-Christian Svenning<sup>g</sup>, and Marten Scheffer<sup>c,h,i,1</sup>

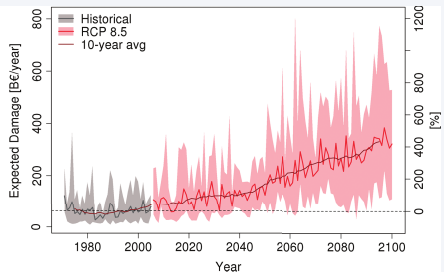
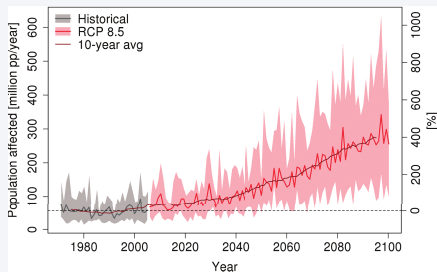
[www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1910114117](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1910114117)

PNAS Latest Articles | 1 of 6

*“We demonstrate that depending on scenarios of population growth and warming, over the coming 50 y, 1 to 3 billion people are projected to be left outside the climate conditions that have served humanity well over the past 6000 y.”*

# Extrêmes climatiques: s'adaptera t-on à tout?

Plus d'extrêmes: vagues de chaleur, sécheresses, pluies fortes, crues, ...  
[IPCC, 2014]



Peut-être que pour la plupart on peut imaginer s'en protéger

# Extrêmes climatiques: s'adaptera t-on à tout?

## Températures létales

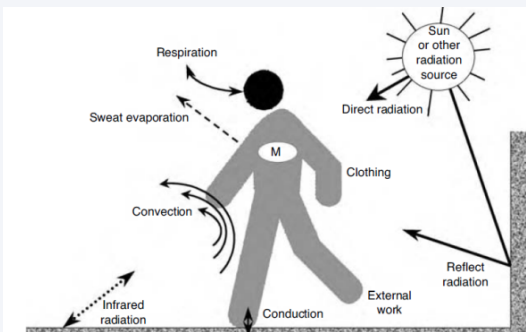


Fig. 1. The balance of human body temperature towards the environment [11]

*Sugiono et al. [2017]*

# Extrêmes climatiques: s'adaptera t-on à tout?

## Températures létales

- *Mora et al. [2017]*: Population affectée (plus d'1 fois par an)  $\approx$  30% aujourd'hui, pouvant aller jusqu'à  $\approx$  75% en 2100 (RCP8.5)
- An Emerging Tropical Cyclone-Deadly Heat Compound Hazard [*Matthews et al., 2019*]
- $TW \geq 35^{\circ}\text{C}$

SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE

### CLIMATOLOGY

## The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance

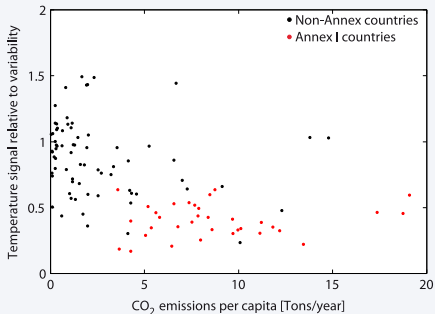
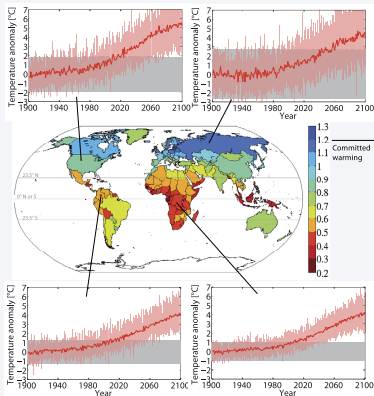
Colin Raymond<sup>1,2\*</sup>, Tom Matthews<sup>3</sup>, Radley M. Horton<sup>2,4</sup>

Humans' ability to efficiently shed heat has enabled us to range over every continent, but a wet-bulb temperature (TW) of 35°C marks our upper physiological limit, and much lower values have serious health and productivity impacts. Climate models project the first 35°C TW occurrences by the mid-21st century. However, a comprehensive evaluation of weather station data shows that some coastal subtropical locations have already reported a TW of 35°C and that extreme humid heat overall has more than doubled in frequency since 1979. Recent exceedances of 35°C in global maximum sea surface temperature provide further support for the validity of these dangerously high TW values. We find the most extreme humid heat is highly localized in both space and time and is correspondingly substantially underestimated in reanalysis products. Our findings thus underscore the serious challenge posed by humid heat that is more intense than previously reported and increasingly severe.

Intro. Tapage ou pas? Réchauffement Impacts&Adaptation || Atténuation Dimensionner & aménager Anecdotes Conclu.

# Bonus: quelques réflexions sur l'(in)équité / l'(in)justice climatique

## Zone Inter-tropicale



- Premières zones touchées par l'“expulsion from history”
- Idem côté extrêmes
- Faible contribution passée

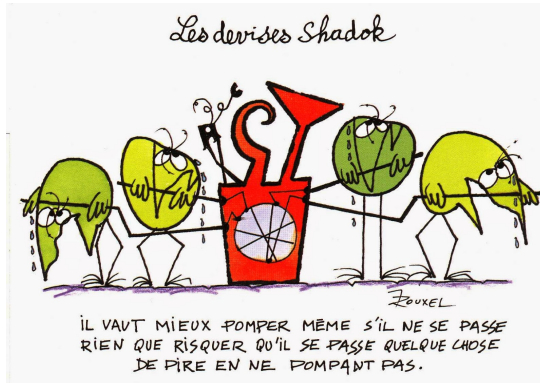


≈ 1h30

**Des questions / remarques ????**

**V. Pause 15' ???**

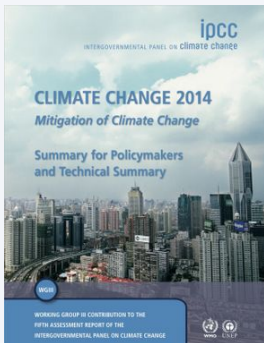
# VI. Atténuation du réchauffement climatique: des remèdes “salés”?



# Atténuation: un problème difficile à poser

## GT3 du GIEC: évaluer les coûts et bénéfices de l'atténuation

Intervention humaine pour réduire les sources ou augmenter les puits de GHG.



Un exercice difficile

- *“Many areas of climate policy-making involve value judgements and ethical considerations”*
- *“Among other methods, economic evaluation is commonly used to inform climate policy design.”*

# Atténuation: un problème difficile à poser

## Contre quoi on lutte ? et pourquoi?

À priori:

✗  $\Rightarrow \nearrow p\text{CO}_2$

✗  $\Rightarrow$  effet de serre additionnel  $\Rightarrow \nearrow \bar{T}$  dans l'absolue

✓ déstabilisation rapide et significative du climat

✓ attention aux remèdes pire que le mal et aux conflits d'usage: biodiversité, agriculture, ...

## Coût de l'atténuation?

Dépendance aux énergies fossiles: le pétrole c'est magique  $\Rightarrow \approx$  sevrage

Approche coût bénéfice

## Déclinaison aux échelles d'intérêts?

GIEC fournit des scénarios qu'ils faut déclinées à  $\neq$  échelles pour  $\neq$  secteurs de façon cohérente

# Petit aperçu au marché des scénarios disponibles

## Drawdown: une 100aine de solutions pour lutter contre le réchauffement

Communauté venant de tous bords et du monde entier. (lien)

## “Nega” scénarios: horizon 2050, approche par besoins.

NegaWatt (lien) et NegaTep (lien)

## Le plan Marshall de B&L evolution (lien)

Comment s'aligner sur 1 trajectoire compatible 1.5°C?  $\Rightarrow$  -63% d'émissions de CO2 entre 2017 et 2030.

- Interdictions: vente de véhicules neufs (usage particulier), voitures thermiques en centre urbains, chauffage au fioul, publicité sur le web, **vols avions hors Europe non justifiés, labour profond**
- Généralisation: télétravail (2j/semaine), moins de repas carnés
- Quotas: flux vidéo, **importation (café, chocolat)**, couvre-feu thermique (17° nuit).
- Objectifs: distances parcourues (**vélo**  $\times$  **6**, **1/2 voiture**), 10<sup>6</sup> bâtiments/an rénovés

# Petit aperçu au marché des scénarios disponibles

## Drawdown: une 100aine de solutions pour lutter contre le réchauffement

Communauté venant de tous bords et du monde entier. (lien)

## “Nega” scénarios: horizon 2050, approche par besoins.

NegaWatt (lien) et NegaTep (lien)

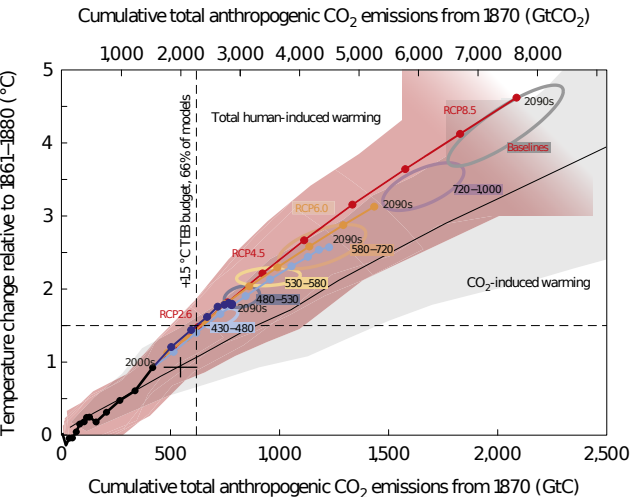
## Le plan Marshall de B&L evolution (lien)

Comment s'aligner sur 1 trajectoire compatible 1.5°C? ⇒ -63% d'émissions de CO2 entre 2017 et 2030.

- Interdictions: vente de véhicules neufs (usage particulier), voitures thermiques en centre urbains, chauffage au fioul, publicité sur le web, **vols avions hors Europe non justifiés, labour profond**
- Généralisation: télétravail (2j/semaine), moins de repas carnés
- Quotas: flux vidéo, **importation (café, chocolat)**, couvre-feu thermique (17° nuit).
- Objectifs: distances parcourues (**vélo × 6, 1/2 voiture**), 10<sup>6</sup> bâtiments/an rénovés

**C'est pas un peu exagéré?**

# $\overline{\Delta T_{global}} = 1.5 \text{ à } 2^\circ ?$ quel budget?

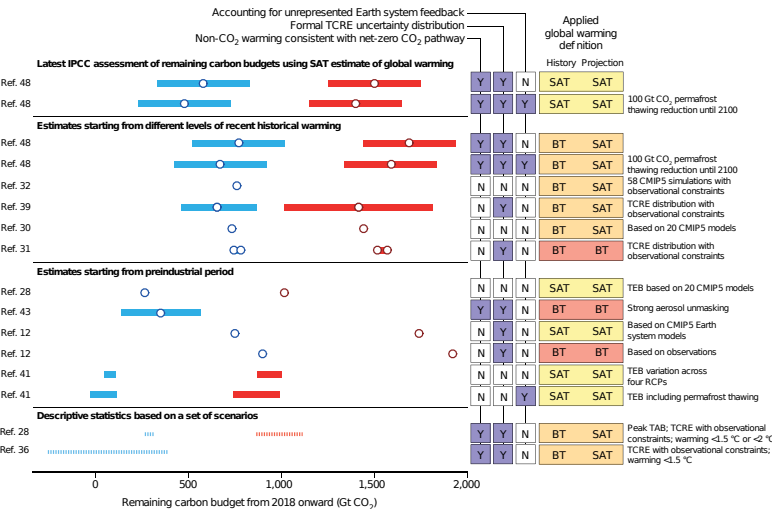


## Figure emblématique

- Réponse simple d'un système complexe:  $\overline{\Delta T_{global}} \propto pCO_2 \propto \text{cumul CO}_2 \text{ émis}$ .
- Outil d'aide à la décision
  - $\overline{\Delta T_{global}} \Rightarrow$  lien vers impacts.
  - Cumul CO<sub>2</sub> émis  $\Rightarrow$  lien vers causes. **Budget carbone & trajectoires?**



# $\Delta T_{global} = 1.5 \text{ à } 2^\circ ?$ quel budget?



1.5°  
 ≈ 500 GtCO<sub>2</sub>

2°  
 ≈ 1000 GtCO<sub>2</sub>

Target 1.5°

Target 2°

# $\Delta T_{global} = 1.5 \text{ à } 2^\circ$ ? trajectoires?

## Le point A (émissions actuelles)

- fossil fuel: 40 GtCO<sub>2</sub>eq/an
- LULC: 5 GtCO<sub>2</sub>eq/an

→ Bilan pour l'atmosphère: +20 GtCO<sub>2</sub>eq/an

Émissions cumulées depuis 1850  $\approx$  2400 GtCO<sub>2</sub>eq (Airborne fraction = 0.45 stable)

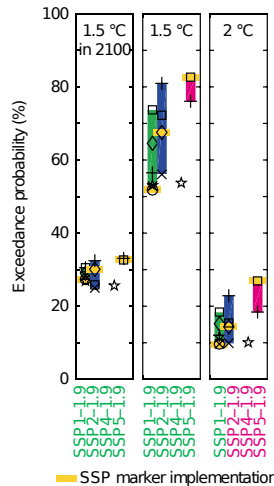
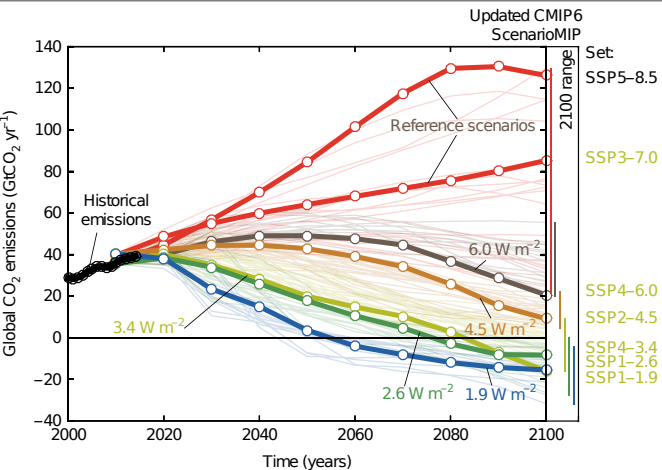
## Le point B (émissions nettes)

- Si dépassement budget: émissions nettes négatives
- Si pas dépassement: atteinte des émissions nettes 0 (stabilisation)

## Un gouffre entre A et B (AR6)?

- 1.5° 500 GtCO<sub>2</sub>eq ( $\approx$  10 ans au rythme actuel)
- 1.7° 850 GtCO<sub>2</sub>eq (< 15 ans au rythme actuel)
- 2.0° 1350 GtCO<sub>2</sub>eq ( $\approx$  20 ans)

# $\Delta T_{global} = 1.5 \text{ à } 2^\circ?$ trajectoires?



# $\Delta \overline{T}_{global} = 1.5 \text{ à } 2^\circ$ : en bref

## Pour une cible $\Delta \overline{T}_{global}$

- un budget
- réduction
- émissions nettes 0 (**neutralité carbone**)
- émissions nettes négatives si besoin



≠ **neutralité  
climatique**

$\Delta \overline{T}_{global}$	< 1.5° C (RCP1.9)	< 2° C (RCP2.6)
Budget (GtCO <sub>2</sub> )	< 500 GtCO <sub>2</sub>	≈ 1000 GtCO <sub>2</sub>
50% de réduction en	2030 ( <b>7%/an</b> )	2050 (2.5%/an)
Émissions nettes 0 (neutralité)	2050	2080
Émissions nettes négatives	✓	✓

# $\Delta \overline{T}_{global} = 1.5 \text{ à } 2^\circ$ : en bref

## Pour une cible $\Delta \overline{T}_{global}$

- un budget
- réduction
- émissions nettes 0 (**neutralité carbone**)
- émissions nettes négatives si besoin



≠ **neutralité  
climatique**

$\Delta \overline{T}_{global}$	< 1.5° C (RCP1.9)	< 2° C (RCP2.6)
Budget (GtCO <sub>2</sub> )	< 500 GtCO <sub>2</sub>	≈ 1000 GtCO <sub>2</sub>
50% de réduction en	2030 ( <b>7%/an</b> )	2050 (2.5%/an)
Émissions nettes 0 (neutralité)	2050	2080
Émissions nettes négatives	✓	✓

## Des réactions/questions ?

Comparaison covidéene?

# Se rendre compte par soi-même de l'effort à fournir

## Avoir une idée des ordres de grandeur

Via des calculateurs de bilan CO2

- Calculateur CO2 individuel: <http://avenirclimatique.org/micmac/index.php>
- Calculateur CO2 France: <http://mission-climat.io/about>
- Calculateur CO2 Monde: <https://en-roads.climateinteractive.org>

## Mais surtout ...

Se faire un avis sur les implications des  $\neq$  choix/techniques/solutions au sein d'un monde complexe:

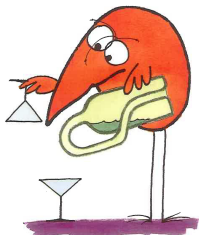
- Possibles externalités positives/négatives
- Socio-techniques
- Démocratiques/politiques
- ...

≈ 2h

**Des questions / remarques ????**

# VII. Dimensionner & aménager: Comment poser les problèmes? (et donc penser les solutions)

*La devise Shadok de la semaine*



S'IL N'Y A PAS DE SOLUTION  
C'EST QU'IL N'Y A PAS DE PROBLÈME.



# Adaptation vs atténuation: un pb mal posé?

## Crise(s), climat: plan de transformation de l'économie française

PRÉSENTATION D'UN CHANTIER D'URGENCE

MAI 2020



### Défis du futur

Dimensionner & concevoir des solutions à des pb complexes.

Prenant en compte:

- la non-stationnarité, l'incertitude et des objectifs multiples (adaptation)
- sous contraintes physiques & socio-eco-politiques (atténuation)

Mots clefs: Résilience, No-regrets, Modularités, Adaptables

# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

## Dimensionnement de digues/barrages/canalisation eaux pluviales



Méthodes de dimensionnement: Gumbel, GEV, Gradex, etc.

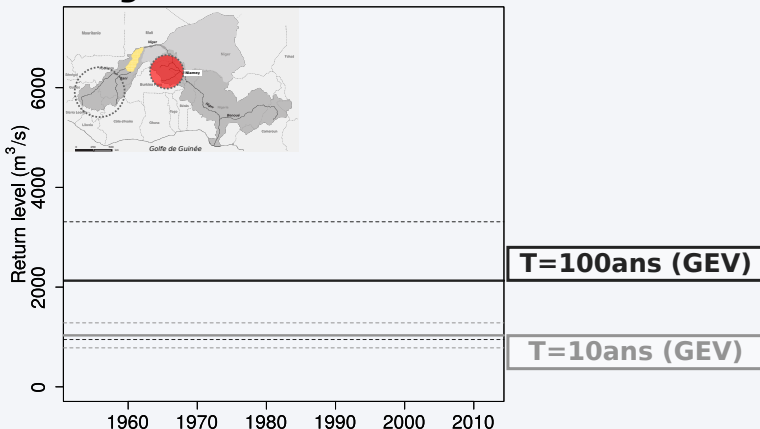
Conçues pour des séries d'extrêmes stationnaires

Comment faire lorsque la fréquence des crues change?

# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

Exemple: évolution des débits de crues sur le Fleuve Niger

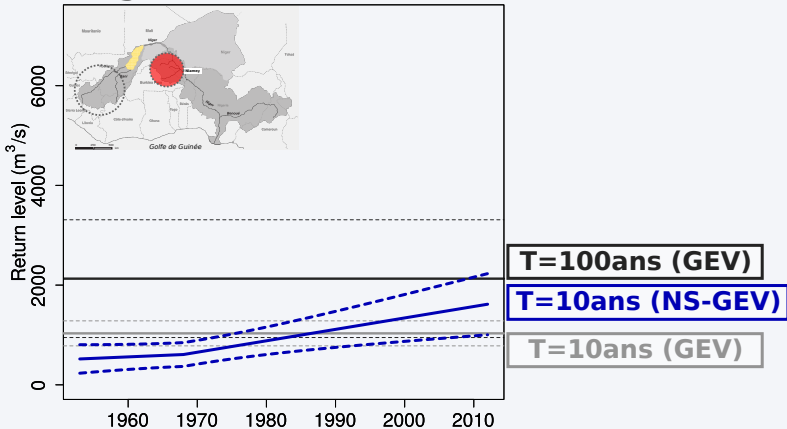
## Right bank tributaries - Return levels



# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

Exemple: évolution des débits de crues sur le Fleuve Niger

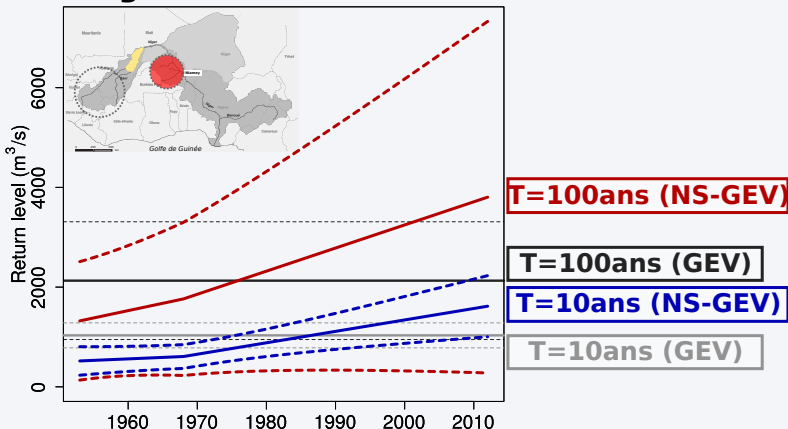
## Right bank tributaries - Return levels



# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

Exemple: évolution des débits de crues sur le Fleuve Niger

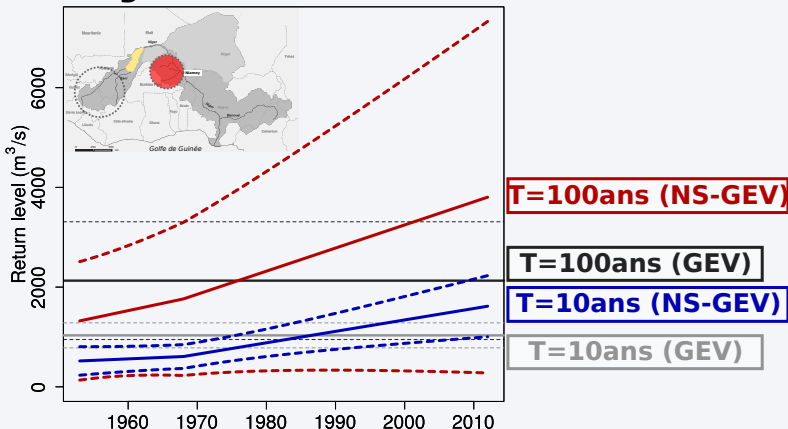
## Right bank tributaries - Return levels



# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

Exemple: évolution des débits de crues sur le Fleuve Niger

## Right bank tributaries - Return levels



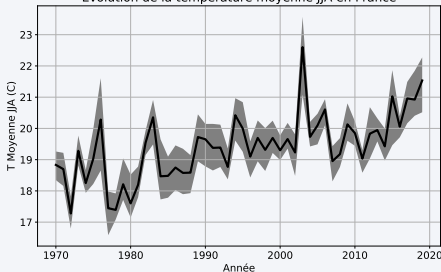
**Non-stationnarité: L'objectif de l'ouvrage ne change pas: mais que faire lorsque les niveaux de retour doublent en 50 ans?**

# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

## Retenue collinaire pour irrigation



Évolution de la température moyenne JJA en France



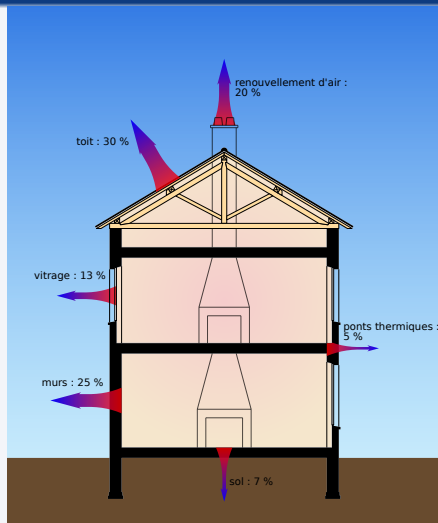
- Demande des plantes: ↗ (JJA: + 0.5K·Decade<sup>-1</sup>) et ressource estivale: ↘
- Contraintes réglementaires sur les usages de l'eau: ???
- Possibilité de changer les pratiques et les cultures: ???

**Incertitude très forte: doit être pensé dans un cadre plus global de l'exploitation.**

**⇒ Existe t-il des solutions plus résilientes? moins dépendantes d'aléas externes?**

# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

## Isolation des bâtiments



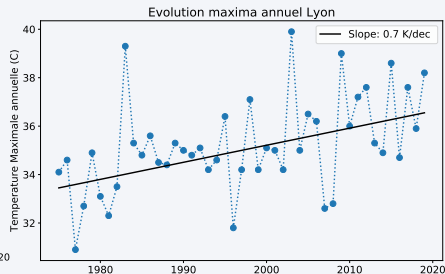
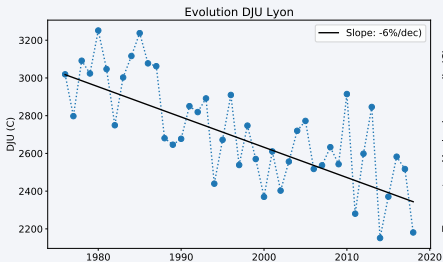
La problématique principale était l'isolation contre le froid (paramètre DJU  $\leq 19^{\circ}\text{C}$ ) **mais** la problématique de se protéger des chaleurs estivales devient un enjeu



# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

## Isolation des bâtiments

⇒ Une solution mutli-objectifs pour confort d'hiver et d'été + d'autres paramètres non évoqués (choix des matériaux, protection du bâtis, ...)



# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

## Isolation des bâtiments

⇒ Une solution mutli-objectifs pour confort d'hiver et d'été + d'autres paramètres non évoqués (choix des matériaux, protection du bâtis, ...)

Exemple d'aberration:



# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

## Complexité et mauvais remèdes

Ouverture d'une brèche afin de limiter les crues du Sénégal ...

4 octobre 2003: 4 m de largeur



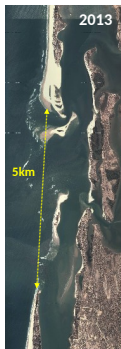
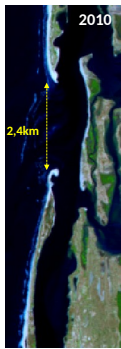
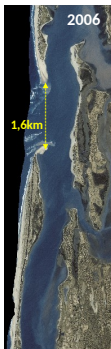
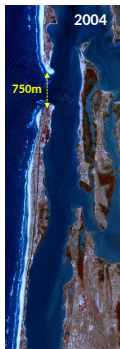
6 oct. 2003: 200 m



# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

## Complexité et mauvais remèdes

Ouverture d'une brèche afin de limiter les crues du Sénégal ...



Source: DIENG (2013)

# Dimensionner: non stationnarité, multi-objectifs & sous contraintes

## Complexité et mauvais remèdes

Ouverture d'une brèche afin de limiter les crues du Sénégal ...

**Problème engendré: salinisation des terres par incursion d'eau de mer.**

**Raison: ce n'était "pas dans le viseur"**

**Exemples nombreux dans la "maitrise de l'environnement"**

≈ 2h15

**Des questions / remarques ????**

# VIII. “debunkage” autour de l’affichage de neutralité carbone & climatique: le marché des anecdotes



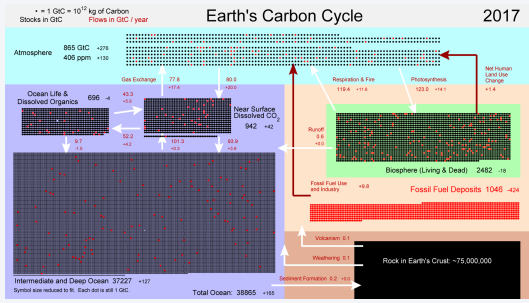
# Les options à l'échelle globale sur la table

## Option 1: simplifier le message et/ou négocier avec les chiffres



# Le mythe de l'affirmation 2 tonnes CO2/hab/an = neutralité?

Correspond au puits carbone actuel de la végétation par habitant



Beaucoup d'efforts mais pas neutre (airborne fraction)

## Potentiellement neutre si:

- point de passage dans une trajectoire (e.g. 2tonnes/hab/an en 2050) qui atterrit à 0.
- techniques anthropiques de stockage carbone de 2tonnes/hab/an.

⇒ Suffisamment flou dans la SNBC

# Le mythe de l'affirmation 2 tonnes CO<sub>2</sub>/hab/an = neutralité?

## Option 1: simplifier le message et/ou négocier avec les chiffres

Pas forcément mal-intentionné mais NON 2 tonnes CO<sub>2</sub>/hab/an  $\neq$  neutralité

## Option 2: compenser nos émissions

# Je compense donc je (con)suis?

**Principe: 1kg CO<sub>2</sub>eq émis = 1kg stocké (e.g. dans les arbres.)**



Exemple:

Un eucalyptus de 12-15 ans

8 mètres de haut, 40 cm de diamètre

≈ 1 m<sup>3</sup> de bois ≈ 800kg

Matière sèche (65%): 520kg

dont la moitié de C: 260 kg

Stockage CO<sub>2</sub>: ≈ 1 tonnes de CO<sub>2</sub>

# Je compense donc je (con)suis?

## Un peu plus compliqué que cela

une forêt est plus que la somme des arbres qu'elle contient

### Stock:

Forêt tropicale: 50kgC/m<sup>2</sup>

Forêt tempérée: 40kgC/m<sup>2</sup>

Forêt boréale: 15kgC/m<sup>2</sup>

### Flux:

Forêt tropicale: 400 gC/m<sup>2</sup>/yr

Forêt tempérée: 300 gC/m<sup>2</sup>/yr

Forêt boréale: 100-200 gC/m<sup>2</sup>/yr

Grassland: 100 gC/m<sup>2</sup>/yr

## Et avec nouvel écosystème forestier

Attention à ne faut pas oublier l'écosystème original:  $\Delta$ Stock et  $\Delta$  Flux

## Si tout le monde compense ses émissions alors c'est ok?

Oui, la neutralité concept surtout valide à l'échelle mondiale **mais**:

- est-ce théoriquement possible?
- si oui, quels écueils à éviter (dans la pratique)?

# Je compense donc je (con)suis?

## Compenser (t)héroïquement: la limite physique surface forestable

- Débat dans la communauté scientifique
  - Discussions sur: surface (a)(re)forestable & quantité stockable par m<sup>2</sup>
- ⇒ **Hypothèses héroïques** de *Bastin et al. [2019b]*: **10 millions de km<sup>2</sup>** (Surfaces émergées: 140 Millions de km<sup>2</sup>, dont 40 déjà forêts.)

## Stock C (troncs,racines&biomes)

Méthodes: règle de 3, arguments historiques, stocks moyens dans les forêts, biblio [*Bonan, 2008; Jones et al., 2016*]

≈ 100 GTC [40–200] en 40 ans ( $\tau$  forêt mature)

Au mieux 2.5GTC/yr (≈ 1/4 émissions actuelles):  
pas suffisant + réalisable 1 seule fois

## Flux C long-terme

Airborne fraction, règle de trois et NEE

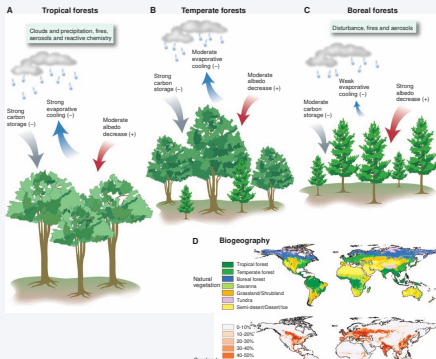
≈ 1GT CO<sub>2</sub>eq/an ⇒ < 5% de nos émissions actuelles.

# Je compense donc je (con)suis?

## Compenser (t)héroïquement: le temps une autre limite physique

- Temps d'émissions **V.S.** temps de stockage
  - dette de carbone  $\Rightarrow \Delta$  forçage radiatif
  - intérêts de la dette: perte de surface forestable [Bastin et al., 2019b]
- Temps de résidence:  $\tau_{fossilfuel}=10^7$  ans **V.S.**  $\tau_{Cbiologique} \approx 10^2$  ans. **Garantie?**

## ET la neutralité climatique?



# Je compense donc je (con)suis?

## Programmes de forestation à grande échelle

⇒ Impacts par nature importants, pouvant générer

- “externalités négatives”: climat & hydrologie régional [*Trabucco et al., 2008*], perte de biodiversité [*Hua et al., 2016; Wang et al., 2019*], accaparement des terres ⇒ maintien des inégalités (géographiques, de richesse, inter-génération, ...)
- co-bénéfices socio & environnementaux [*Locatelli et al., 2015; Brancalion and Chazdon, 2017*]

## À retenir: Des précautions à prendre

Pas facile de faire son analyse: marketing fort et chiffres douteux non vérifiables **Mais** de potentiels projets intéressants (e.g. Silva?)

# Je compense donc je (con)suis?

## Option 1: simplifier le message et/ou négocier avec les chiffres

Pas forcément mal-intentionné mais NON 2 tonnes CO<sub>2</sub>/hab/an  $\neq$  neutralité

## Option 2: compenser nos émissions

- Échelle globale: au rythme actuelle de nos émissions (même en divisant par 2, 3, ou 4) impossible d'être neutre carbone/climatiquement rapidement.
- Externalités négatives potentiellement sérieuses et nombreuses

## Option 3: rejouer la COP21 et son schisme des réalités



# Assumer un schisme de réalités (e.g. COP21)

La communauté internationale a signé l'accord de Paris et vise 1.5°C 😊

*“contenant l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1.5°C par rapport aux niveaux préindustriels”*



PARIS2015  
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE  
COP21·CMP11



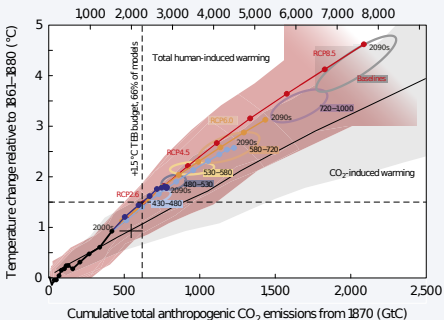
Sauf que ...

# Assumer un schisme de réalités (e.g. COP21)

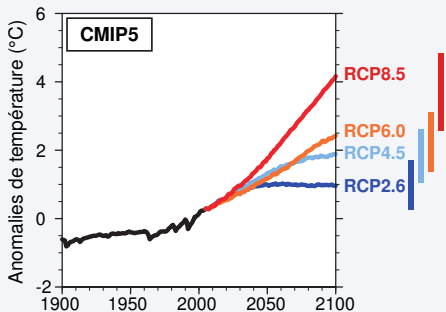
## 1.5° : déjà dans l'atmosphère 😞

À qq GtCO<sub>2</sub>eq près:

Cumulative total anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions from 1870 (GtCO<sub>2</sub>)



## 2° risquent d'être dépassés 😞



- Compilation des NDCs (promesses) des pays:  $\approx +3 + 3.5^\circ$
- Écart entre promesses et actions se creusent

# Résumé des options à l'échelle globale

## Option 1: simplifier le message et/ou négocier avec les chiffres

Pas forcément mal-intentionné mais NON 2 tonnes CO<sub>2</sub>/hab/an  $\neq$  neutralité

## Option 2: compenser nos émissions

- Échelle globale: au rythme actuelle de nos émissions (même en divisant par 2, 3, ou 4) impossible d'être neutre carbone/climatiquement rapidement.
- Externalités négatives potentiellement sérieuses et nombreuses

## Option 3: rejouer la COP21 et son schisme des réalités

Assumer d'afficher la neutralité: marketing et science bashing  $\Rightarrow$  quelle part de responsabilité?

# Résumé des options à l'échelle globale

## Option 1: simplifier le message et/ou négocier avec les chiffres

Pas forcément mal-intentionné mais NON 2 tonnes CO2/hab/an  $\neq$  neutralité

## Option 2: compenser nos émissions

- Échelle globale: au rythme actuelle de nos émissions (même en divisant par 2, 3, ou 4) impossible d'être neutre carbone/climatiquement rapidement.
- Externalités négatives potentiellement sérieuses et nombreuses

## Option 3: rejouer la COP21 et son schisme des réalités

Assumer d'afficher la neutralité: marketing et science bashing  $\Rightarrow$  quelle part de responsabilité?

## Option 4: être malhonnête, seule voie des intérêts divergents?

e.g. AirFrance ("flirte avec le greenwashing, cette pratique qui consiste à se donner, à tort, une image d'entreprise écoresponsable." V. Masson Delmotte).

# Neutralité à l'échelle individuelle: autopsie d'une solution qui ne fonctionne pas pour moi

Si tout le monde fait cela: ça marche: 😊😊😊

- Éviter: on retire tout le superflu, le gras
- Réduire: on diminue l'impact de ce qui ne peut être réduit
- On compense le reste

Outils de Bilan CO2:

- MicMac: <http://avenirclimatique.org/micmac/simulationCarbone.php>
- Ademe: <https://nosgestesclimat.fr/>

Exemple d'une stratégie ERC "volontariste"

# Neutralité à l'échelle individuelle: autopsie d'une solution qui ne fonctionne pas pour moi

## Éviter: "émissions de luxe"

?????

## Réduire: "émissions de subsistance"

- Habitation:
- Alimentation:
- Transport:
- Service public:
- Biens & Services:

?????

# Neutralité à l'échelle individuelle: autopsie d'une solution qui ne fonctionne pas pour moi

## Éviter: "émissions de luxe"

avion ? smart-phone & autre objets connectés ? compte épargne rémunéré ?

## Réduire: "émissions de subsistance"

- Habitation: 100-1000 kgCO<sub>2</sub>
  - Alimentation: 1000-1500 kgCO<sub>2</sub>
  - Transport: 1000 kgCO<sub>2</sub>
  - Service public: 1000 kgCO<sub>2</sub>
  - Biens & Services: 1000 kgCO<sub>2</sub>
- ⇒ 4-5 tonnes CO<sub>2</sub> (25% professionnel)

## Compenser pro (1 tCO<sub>2</sub>/hab/an)

On foreste le campus (120 ha sans stock/flux initial :-D) ) et on compte que les 6000 personnels

D'abord 40 ans:  $\Delta$  Stock  $\approx$  800kg CO<sub>2</sub>/an/hab

Puis:  $\Delta$  Flux  $\approx$  200kg CO<sub>2</sub>/an/hab

## Et le reste (4 tCO<sub>2</sub>/hab/an)

D'abord 40 ans:  $\approx$  1000 m<sup>2</sup> (a/re)foresté

Puis:  $\Delta$  Flux  $\approx$  4000 m<sup>2</sup> (a/re)foresté

Jouable ?? SAU?? Surface déjà en forêts??

# Neutralité à l'échelle individuelle: autopsie d'une solution qui ne fonctionne pas pour moi

## Éviter: "émissions de luxe"

avion ? smart-phone & autre objets connectés ? compte épargne rémunéré ?

## Réduire: "émissions de subsistance"

- Habitation: 100-1000 kgCO<sub>2</sub>
  - Alimentation: 1000-1500 kgCO<sub>2</sub>
  - Transport: 1000 kgCO<sub>2</sub>
  - Service public: 1000 kgCO<sub>2</sub>
  - Biens & Services: 1000 kgCO<sub>2</sub>
- ⇒ 4-5 tonnes CO<sub>2</sub> (25% professionnel)

## Compenser pro (1 tCO<sub>2</sub>/hab/an)

On foreste le campus (120 ha sans stock/flux initial :-D) ) et on compte que les 6000 personnels

D'abord 40 ans:  $\Delta$  Stock  $\approx$  800kg CO<sub>2</sub>/an/hab

Puis:  $\Delta$  Flux  $\approx$  200kg CO<sub>2</sub>/an/hab

## Et le reste (4 tCO<sub>2</sub>/hab/an)

D'abord 40 ans:  $\approx$  1000 m<sup>2</sup> (a/re)foresté

Puis:  $\Delta$  Flux  $\approx$  4000 m<sup>2</sup> (a/re)foresté

Jouable ?? SAU?? Surface déjà en forêts??

**Neutralité: Difficilement solvable, isn't it?**

⇒ Ne veut pas dire qu'il ne faille pas éviter, réduire et planter des arbres (ou autre).



# En résumé

## Neutralité

- carbone  $\neq$  climat
  - définitions ici: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/glossary/>
- Neutralité carbone=Émissions nettes **zero** à l'échelle **mondiale**.
- Neutralité climatique qui ajoute des contraintes à la neutralité carbone

**Ce n'est pas une opinion**

## Afficher la neutralité à court terme: une bonne idée?

1. ERC:
  - théoriquement impossible (mondiale comme locale): implique d'assumer des inégalités/injustices de richesse et entre générations.
  - en pratique: d'autres impacts environnementaux & sociaux
2. Assumer: marketing, greenwashing science bashing

**Opinion personnelle:** Dans les deux cas, ce n'est pas souhaitable

# En résumé

## Contribuer à l'atteinte de la neutralité: où sont les leviers?

- à échelle individuelle : ERP?
- à l'échelle collective: s'attaquer aux facteurs d'émissions

**Répartition de l'effort entre les deux?**

## Le collectif c'est politique

Facteurs d'émissions dépendent de secteurs

**Certains secteurs peuvent avoir intérêt à changer:**

1. incompréhension
2. résistance au changement
3. qui assume le risque ?
4. certains même (agriculture, bâtiment) pourraient s'approcher de 0 émissions voir devenir des puits

**Cela va à l'encontre d'intérêts pour d'autres secteurs/catégories sociales.**

≈ 2h40

**Des questions / remarques ????**

## IX. Conclusion

### *Devise Shadok*



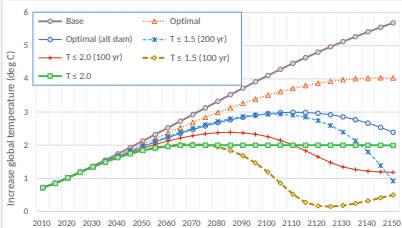
# À ramener chez soi!

## Des questions et avis à se faire?

- Il y a t-il un sujet carbonno-climatique?
- Si oui quel est le problème?
- Quelles leçons tirer du sujet Climatiques?

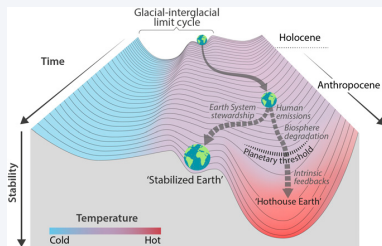
# Ce dont on a parlé

## Nordhaus (économiste)



VS.

## Rockström (physicien)

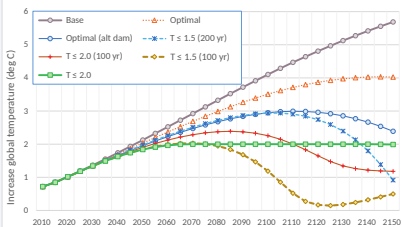


## Un choix à faire ou les deux faces de la même pièce?

GT1 Ça va continuer à se réchauffer.

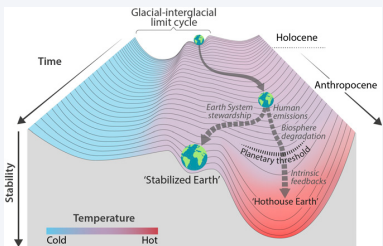
# Ce dont on a parlé

## Nordhaus (économiste)



VS.

## Rockström (physicien)



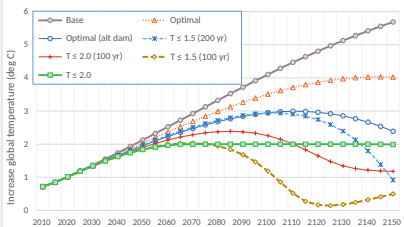
## Un choix à faire ou les deux faces de la même pièce?

**GT1** Ça va continuer à se réchauffer.

**GT2** Impacts prévus importants: on ne s'adaptera pas à tout et ça dépendra du niveau de réchauffement.

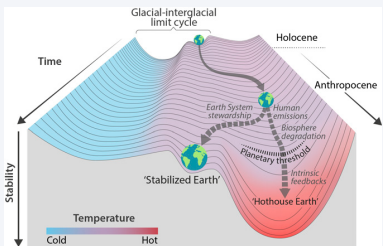
# Ce dont on a parlé

## Nordhaus (économiste)



VS.

## Rockström (physicien)



## Un choix à faire ou les deux faces de la même pièce?

**GT1** Ça va continuer à se réchauffer.

**GT2** Impacts prévus importants: on ne s'adaptera pas à tout et ça dépendra du niveau de réchauffement.

**GT3** Le Sevrage énergétique risque d'être "salé" mais peu de chances qu'on y échappe:

- énergie (sur)abondante et (quasi)gratuite: c'est fini (AIE)
- pression sociétés civiles? alternatives socio-techniques? ....



# Ce dont on a parlé

## Qui/quel secteur ??



**ne dépend pas du climat?**  
**ne dépend pas d'énergie fossiles?**



## Difficile de se faire une opinion sourcée et argumentée.

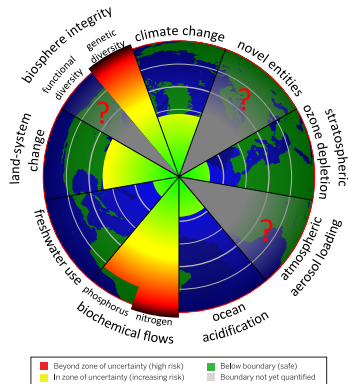
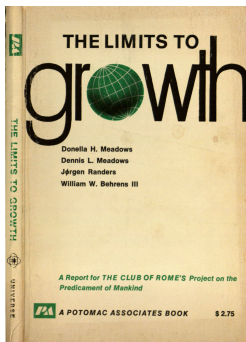
- Sujets complexes par nature (multi-domaines, multi-échelles, inter-relations) ⇒ temps et échange (≠ points de vue argumentés peuvent co-exister.)
- Relai médiatique, lois & mesures, mobilisation société civile. ⇒ canaux classiques: format court, anxigène, biaisé, partisan.

**Bref: passionnant, passionné (affect), & épineux ("Wicked problem")**

Des ingrédients explosifs ?

# Ce dont on a pas parlé: Autres limites planétaires

[Meadows et al., 1972; Steffen et al., 2015b]

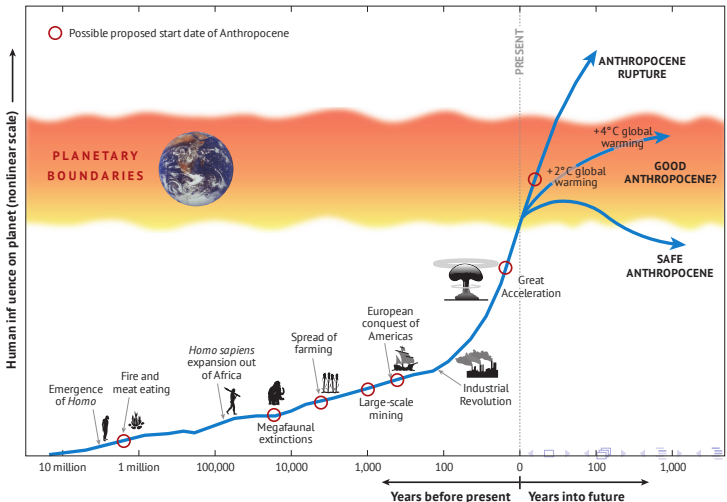


**Nombreuses similarités**

# Ce dont on a pas parlé: Autres limites planétaires [Meadows et al., 1972; Steffen et al., 2015b]

## Sujet carbonno-climatique: exemple emblématique de l'Anthropocène

Causes & conséquences partagées [Steffen et al., 2015a; Malhi, 2017]



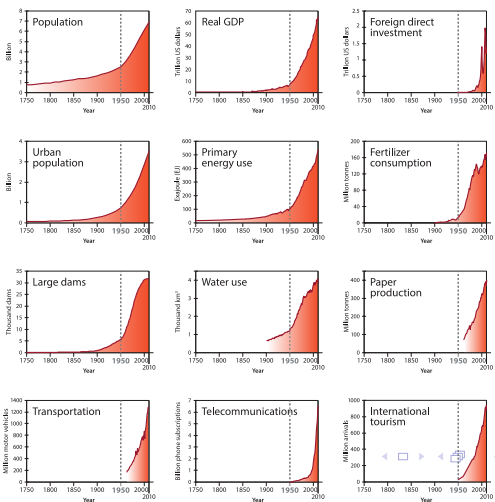
# Ce dont on a pas parlé: Autres limites planétaires

[Meadows et al., 1972; Steffen et al., 2015b]

## Sujet carbonno-climatique: exemple emblématique de l'Anthropocène

Causes & conséquences partagées [Steffen et al., 2015a; Malhi, 2017]

Socio-economic trends



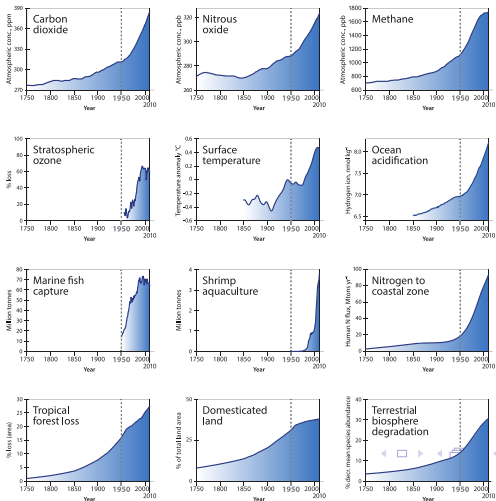
# Ce dont on a pas parlé: Autres limites planétaires

[Meadows et al., 1972; Steffen et al., 2015b]

## Sujet carbonno-climatique: exemple emblématique de l'Anthropocène

Causes & conséquences partagées [Steffen et al., 2015a; Malhi, 2017]

Earth system trends



# Ce dont on a pas parlé: Autres limites planétaires

[Meadows et al., 1972; Steffen et al., 2015b]

## Sujet carbonoclimatique: exemple emblématique de l'Anthropocène

Causes & conséquences partagées [Steffen et al., 2015a; Malhi, 2017]

## Anthropocène et limites planétaires: des problèmes complexes

Pas de solutions simples

- Atténuation: “Sevrage” & effets secondaires
- Questions autour de l'adaptation
- Technique: qu'un aspect du pb **Et** ambivalente.
- Des intérêts divergents [Seto et al., 2016]

**Mêmes risques en termes de “greenwashing” & “science bashing”**

# Ce dont on a pas parlé: Autres limites planétaires

[Meadows et al., 1972; Steffen et al., 2015b]

## Enjeux forts + affect + intérêts divergents $\Rightarrow$ désinformation?

- Non consciemment: complexité du pb, part de subjectivité
- Consciemment: marketing, greenwashing

## Fake vs real news: asymétrie du combat argumenté? [Langin, 2018]



- Message court & simpliste
- Messenger aux intérêts divergents
- Conforte la "cible"



- Message "fin" & long
- Autocensure du messenger
- Cible difficile à atteindre (Déni & réactions exagérées)

## En bref: personne n'est à l'abri

Vigilance: sources, croisement d'infos.

Séparation: faits objectifs || opinion étayée || préférence personnelle || acte de foi.

# Animation avant de partir

## Pourquoi cette animation?

- Inclusion & participation
- Prendre la température dans  $\neq$  groupes
- Amélioration: contenu pédagogique **ET** posture/ton

## Consigne

1 post-it = 1 seule idée (1 réaction)

## Question

CHANGEMENT CLIMATIQUE: BILAN, IMPACTS & ATTÉNUATION.

QUELLES LEÇONS TIRER DU SUJET CARBONO-CLIMATIQUE?

- # 1 Quelle réaction en voyant le titre de l'exposé? attentes? avis? ressentis?
- # 2 **Rapport d'étonnement: qu'est-ce qui vous a le plus étonné? choqué? remué?**



# Questions

< [geremy.panthou@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:geremy.panthou@univ-grenoble-alpes.fr) >

- J.-F. Bastin, E. Clark, T. Elliott, S. Hart, J. van den Hoogen, I. Hordijk, H. Ma, S. Majumder, G. Manoli, J. Maschler, L. Mo, D. Routh, K. Yu, C. Zohner, and T. Crowther. Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *PLOS ONE*, 14(7):e0217592, 2019a.
- J.-F. Bastin, Y. Finegold, C. Garcia, D. Mollicone, M. Rezende, D. Routh, C. M. Zohner, and T. W. Crowther. The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448):76–79, 2019b.
- G. B. Bonan. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320(5882):1444–1449, 2008. ISSN 0036-8075, 1095-9203. doi: 10.1126/science.1155121. URL <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1155121>.
- P. H. Brancalion and R. L. Chazdon. Beyond hectares: four principles to guide reforestation in the context of tropical forest and landscape restoration. *Restoration Ecology*, 25(4):491–496, 2017. ISSN 1061-2971. Publisher: Wiley Online Library.
- E. R. Bush, R. C. Whytock, L. Bahaa-el din, S. Bourgeois, N. Bunnefeld, A. W. Cardoso, J. T. Dikangadissi, P. Dimbonda, E. Dimoto, J. Edzang Ndong, K. J. Jeffery, D. Lehmann, L. Makaga, B. Momboua, L. R. W. Momont, C. E. G. Tutin, L. J. T. White, A. Whittaker, and K. Abernethy. Long-term collapse in fruit availability threatens Central African forest megafauna. *Science*, 370(6521):1219–1222, Dec. 2020. ISSN 0036-8075, 1095-9203. doi: 10.1126/science.abc7791. URL <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.abc7791>.
- J.-L. Dufresne and J. Treiner. L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit ! *La Météorologie*, 8(72):31, 2011. ISSN 0026-1181. doi: 10.4267/2042/39839. URL <http://hdl.handle.net/2042/39839>.
- B. C. Glavovic, T. F. Smith, and I. White. The tragedy of climate change science. *Climate and Development*, pages 1–5, Dec. 2021. ISSN 1756-5529, 1756-5537. doi: 10.1080/17565529.2021.2008855. URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17565529.2021.2008855>.
- F. Hua, X. Wang, X. Zheng, B. Fisher, L. Wang, J. Zhu, Y. Tang, D. W. Yu, and D. S. Wilcove. Opportunities for biodiversity gains under the world's largest reforestation programme. *Nature Communications*, 7(1), 2016.
- IPCC. *Climate change 2014: synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2014.
- C. D. Jones, P. Ciais, S. J. Davis, P. Friedlingstein, T. Gasser, G. P. Peters, J. Rogelj, D. P. van Vuuren, J. G. Canadell, A. Cowie, R. B. Jackson, M. Jonas, E. Kriegler, E. Littleton, J. A. Lowe, J. Milne, G. Shrestha, P. Smith, A. Torvanger, and A. Wiltshire. Simulating the Earth system response to negative emissions. *Environmental Research Letters*, 11(9):095012, Sept. 2016. ISSN 1748-9326. doi: 10.1088/1748-9326/11/9/095012. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/9/095012>.
- K. Langin. Fake news spreads faster than true news on Twitter – thanks to people, not bots. *Science*, Mar. 2018. ISSN 0036-8075, 1095-9203. doi: 10.1126/science.aat5350. URL <http://www.sciencemag.org/news/2018/03/fake-news-spreads-faster-true-news-twitter-thanks-people-not-bots>.
- B. Locatelli, C. P. Catterall, P. Imbach, C. Kumar, R. Lasco, E. Marín-Spiotta, B. Mercer, J. S. Powers, N. Schwartz, and M. Uriarte. Tropical reforestation and climate change: beyond carbon. *Restoration Ecology*, 23(4):337–343, July 2015. ISSN 1061-2971, 1526-100X. doi: 10.1111/rec.12209. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.12209>.

- Y. Malhi. The Concept of the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 42(1):77–104, Oct. 2017. ISSN 1543-5938, 1545-2050. doi: 10.1146/annurev-environ-102016-060854. URL <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-102016-060854>.
- T. Matthews, R. L. Wilby, and C. Murphy. An emerging tropical cyclone–deadly heat compound hazard. *Nature Climate Change*, 9(8):602–606, Aug. 2019. ISSN 1758-678X, 1758-6798. doi: 10.1038/s41558-019-0525-6. URL <http://www.nature.com/articles/s41558-019-0525-6>.
- D. Meadows, D. Meadows, J. Randers, and W. Behrens III. The limits to growth: a report to the club of Rome (1972). *Google Scholar*, 1972.
- D. Meadows, D. Meadows, and J. Randers. *Beyond the limits: global collapse or a sustainable future*. Earthscan Publications Ltd., 1992. ISBN 1-85383-131-X.
- D. Meadows, J. Randers, and D. Meadows. *The limits to growth: the 30-year update*. Earthscan, London, reprint edition, 2009. ISBN 978-1-84407-144-9. OCLC: 553770281.
- C. Mora, B. Dousset, I. Caldwell, F. Powell, R. Geronimo, C. Bielecki, C. Counsell, B. Dietrich, E. Johnston, L. Louis, M. Lucas, M. McKenzie, A. Shea, H. Tseng, T. Giambelluca, L. Leon, E. Hawkins, and C. Trauernicht. Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 7(7):501–506, 2017.
- S. Power. Expulsion from history. *Nature*, 511(7507):38, 2014.
- K. Pulkkinen, S. Undorf, F. Bender, P. Wikman-Svahn, F. Doblas-Reyes, C. Flynn, G. C. Hegerl, A. Jönsson, G.-K. Leung, J. Roussos, T. G. Shepherd, and E. Thompson. The value of values in climate science. *Nature Climate Change*, 12(1):4–6, 2022. ISSN 1758-678X, 1758-6798. doi: 10.1038/s41558-021-01238-9. URL <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01238-9>.
- J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. A. Foley. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263):472–475, Sept. 2009. ISSN 0028-0836, 1476-4687. doi: 10.1038/461472a. URL <http://www.nature.com/articles/461472a>.
- K. C. Seto, S. J. Davis, R. B. Mitchell, E. C. Stokes, G. Unruh, and D. Üрге-Vorsatz. Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 41(1):425–452, Nov. 2016. ISSN 1543-5938, 1545-2050. doi: 10.1146/annurev-environ-110615-085934. URL <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-110615-085934>.
- W. Steffen, W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney, and C. Ludwig. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1):81–98, Apr. 2015a. ISSN 2053-0196, 2053-020X. doi: 10.1177/2053019614564785. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2053019614564785>.
- W. Steffen, K. Richardson, J. Rockstrom, S. E. Cornell, I. Fetzer, E. M. Bennett, R. Biggs, S. R. Carpenter, W. de Vries, C. A. de Wit, C. Folke, D. Gerten, J. Heinke, G. M. Mace, L. M. Persson, V. Ramanathan, B. Reyers, and S. Sorlin. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223):1259855–1259855, 2015b.
- W. Steffen, J. Rockström, K. Richardson, T. M. Lenton, C. Folke, D. Liverman, C. P. Summerhayes, A. D. Barnosky, S. E. Cornell, M. Crucifix, J. F. Donges, I. Fetzer, S. J. Lade, M. Scheffer, R. Winkelmann, and H. J. Schellnhuber. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33):8252, 2018. doi: 10.1073/pnas.1810141115. URL <http://www.pnas.org/content/115/33/8252.abstract>.

- S. Sugiono, S. E. Swara, W. Wijanarko, and D. H. Sulistyarini. Investigating the Impact of Ornamental Plants Correlated with Indoor Thermal Comfort and Eco-Energy. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 8(5):221, Sept. 2017. ISSN 2036-9921, 2036-9913. doi: 10.15866/irece.v8i5.12703. URL [http://www.praiseworthyprize.org/jsm/index.php?journal=irece&page=article&op=view&path\[\]=19873](http://www.praiseworthyprize.org/jsm/index.php?journal=irece&page=article&op=view&path[]=19873).
- A. Trabucco, R. J. Zomer, D. A. Bossio, O. van Straaten, and L. V. Verchot. Climate change mitigation through afforestation/reforestation: A global analysis of hydrologic impacts with four case studies. page 18, 2008.
- X. Wang, F. Hua, L. Wang, D. S. Wilcove, and D. W. Yu. The biodiversity benefit of native forests and mixed-species plantations over monoculture plantations. *Diversity and Distributions*, 25(11):1721–1735, Nov. 2019. ISSN 1366-9516, 1472-4642. doi: 10.1111/ddi.12972. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ddi.12972>.