AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

COLLOQUE AFPSVT 07/07/2015
« CLIMAT, ATMOSPHERE ET HYDROSPHERE »

Le climat : un enjeu planétaire contemporain

PARIS2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE
COP21·CMP11

COP 19-Varsovie -2013

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

PARIS2015

-Qu'entend-t-on par « dérèglement » climatique ?

-Quel est l'état des lieux pour les dernières décennies ?

-Quel rôle joué par les activités humaines ?

-Effet de serre : quels sont les mécanismes en jeu ?

10h30 **Jean-Louis DUFRESNES (LMD)** :
« Bilan radiatif, effet de serre et changements climatiques"

Quel est l'enjeu de la COP21 ?

Il s'agit d'aboutir, pour la première fois, à un accord universel et contraignant permettant de lutter efficacement contre le dérèglement climatique et d'impulser/d'accélérer la transition vers des sociétés et des économies résilientes et sobres en carbone.

Pour cela, le futur accord devra traiter, de façon équilibrée, de l'atténuation – c'est-à-dire des efforts de baisse des émissions de gaz à effet de serre permettant de contenir le réchauffement global à 2°C - et de l'adaptation des sociétés aux dérèglements climatiques déjà existants.

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

PARIS2015

-Quelles difficultés pour les élèves ?

-Quels modèles didactiques possibles ?

11h30 **Philippe COLIN (LDAR)** :

« Comment enseigner le bilan radiatif de la Terre ?"

Il s'agit d'aboutir, pour la première fois, à un accord universel et contraignant permettant de lutter efficacement contre le dérèglement climatique et d'impulser/d'accélérer la transition vers des sociétés et des économies résilientes et sobres en carbone.

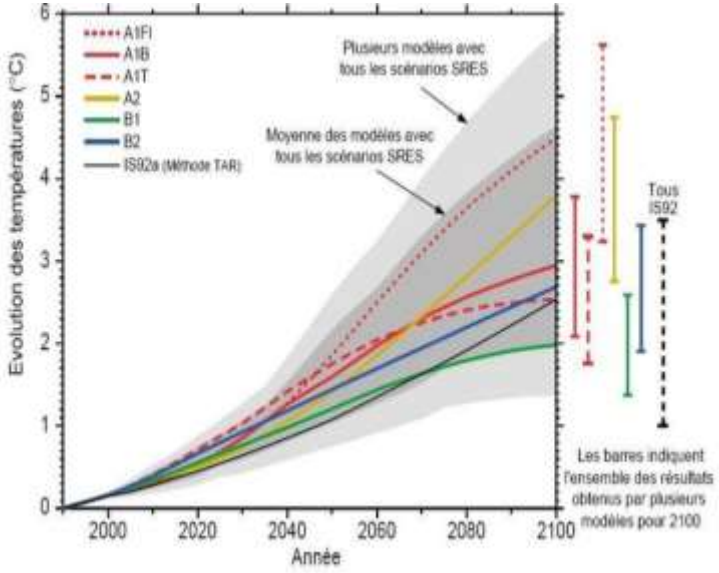
Pour cela, le futur accord devra traiter, de façon équilibrée, de l'atténuation – c'est-à-dire des efforts de baisse des émissions de gaz à effet de serre permettant de contenir le réchauffement global à 2°C - et de l'adaptation des sociétés aux dérèglements climatiques déjà existants.

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

PARIS2015

-Comment un modèle peut-il rendre compte de la complexité du système climatique ?

-Quels paramètres sont à prendre en compte dans les projections futures ?



14h **Didier PAILLARD (LSCE)** :
« Climats et modèles"

Il s'agit d'aboutir, pour la première fois, à un accord universel et contraignant permettant de lutter efficacement contre le dérèglement climatique et d'impulser/d'accélérer la transition vers des sociétés et des économies résilientes et sobres en carbone.

Pour cela, le futur accord devra traiter, de façon équilibrée, de l'atténuation – c'est-à-dire des efforts de baisse des émissions de gaz à effet de serre permettant de contenir le réchauffement global à 2°C - et de l'adaptation des sociétés aux dérèglements climatiques déjà existants.

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

PARIS2015

-Comment devenir « sobre » en carbone ?

-Quelle place pour les énergies alternatives aujourd'hui et demain ?

15h40 **Sylvain LASSONDE (LSCE)** :

« Les énergies renouvelables : utilisations et perspectives "

Il s'agit d'aboutir, pour la première fois, à un accord universel et contraignant permettant de lutter efficacement contre le dérèglement climatique et d'impulser/d'accélérer la transition vers des sociétés et des économies résilientes et sobres en carbone.

Pour cela, le futur accord devra traiter, de façon équilibrée, de l'atténuation – c'est-à-dire des efforts de baisse des émissions de gaz à effet de serre permettant de contenir le réchauffement global à 2°C - et de l'adaptation des sociétés aux dérèglements climatiques déjà existants.

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

PARIS2015

-Comment « éduquer au choix » lorsque l'on traite la question du dérèglement climatique ?

-Quels sont les enjeux pour un enseignant traitant cette question dite « socialement vive » ?

16h **Monique DUPUIS (IG), Benoit URGELLI (ISPEF) et Caroline LENINGER-FREZAL (UP7D)** :
« Enseigner une question socialement vive : *Les dérèglements climatiques"*

Il s'agit d'aboutir, pour la première fois, à un accord universel et contraignant permettant de lutter efficacement contre le dérèglement climatique et d'impulser/d'accélérer la transition vers des sociétés et des économies résilientes et sobres en carbone.

Pour cela, le futur accord devra traiter, de façon équilibrée, de l'atténuation – c'est-à-dire des efforts de baisse des émissions de gaz à effet de serre permettant de contenir le réchauffement global à 2°C - et de l'adaptation des sociétés aux dérèglements climatiques déjà existants.

AFPSVT
Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre

CLIMAT, ATMOSPHERE ET HYDROSPHERE

Enjeux contemporains
(politiques, écologiques, économiques, sociaux)

Enjeux scientifiques

Enjeux didactiques et éducatifs

Bilan radiatifs, effet de serre et changements climatiques

Jean-Louis Dufresne

jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr

Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS, UPMC, ENS, X) Institut Pierre Simon Laplace.

Paris, 7 juillet 2015

Plan

I. Base physique et rapide historique

II. Variations du climat et rôle des activités humaines

III.Projections des climats futurs

IV.Paléoclimats et variabilité naturelle

Naissance de la physique du climat

Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaire, J. Fourrier, 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 **Joseph Fourrier**

1.Rayonnement solaire (17681830) *2.Rayonnement infrarouge*

3.Conduction avec le centre de la Terre

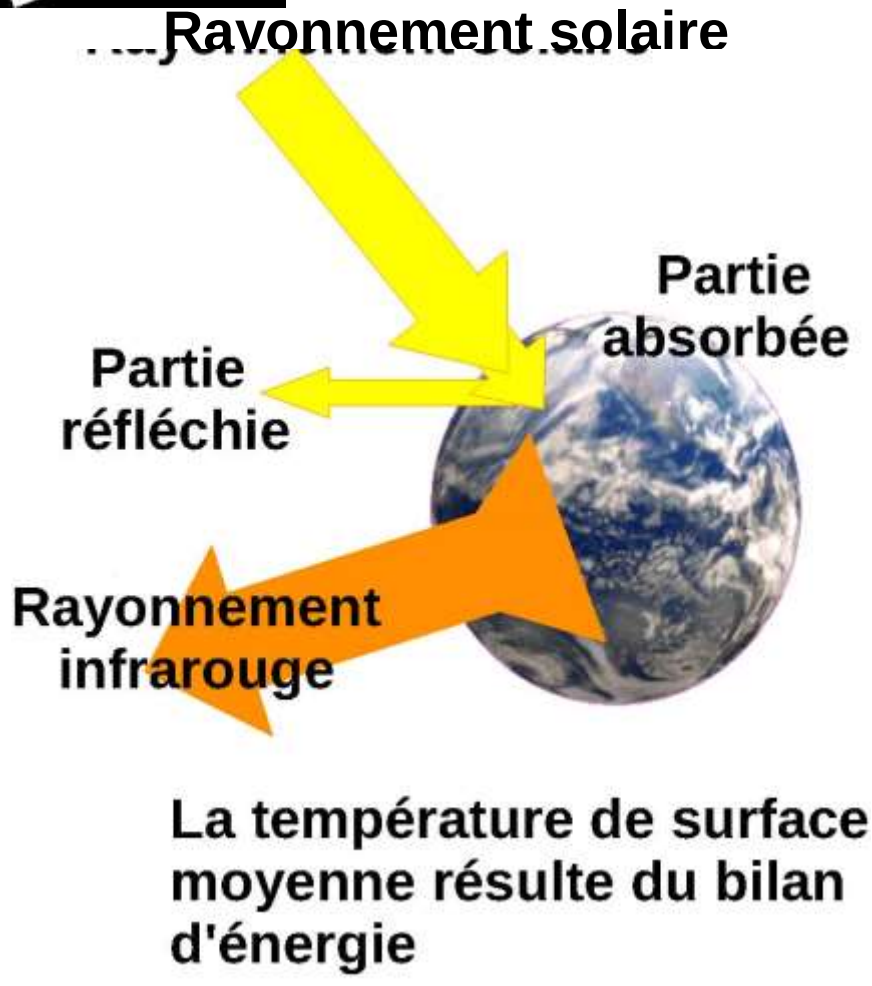
- Il pressent l'importance de tous changements d'ensoleillement

- 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]

Température d'équilibre d'une planète



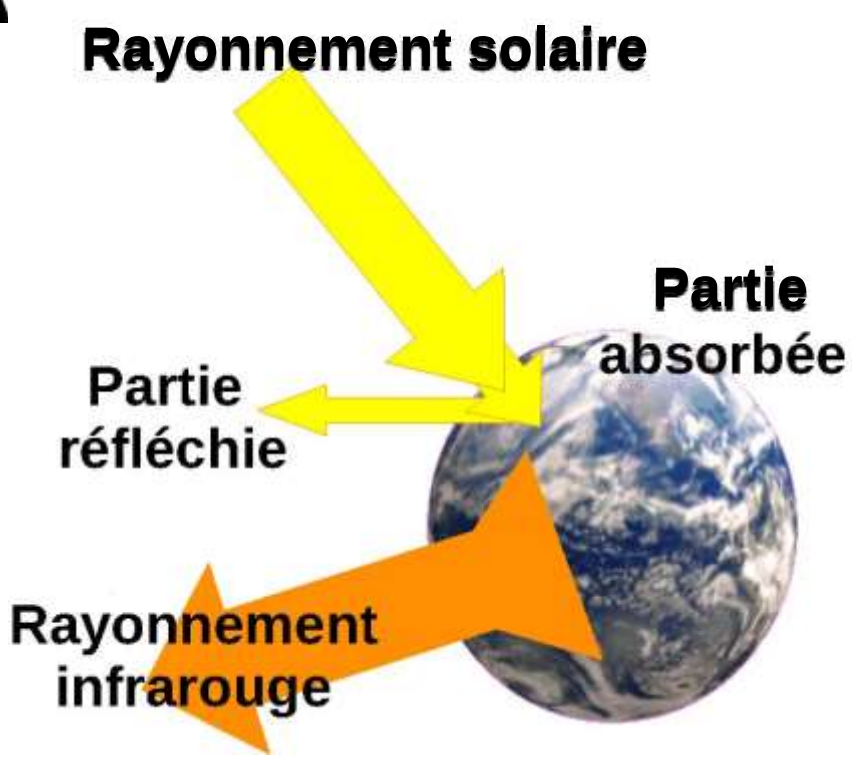
Équilibre énergétique: flux infrarouge émis = fluxsolaire absorbé

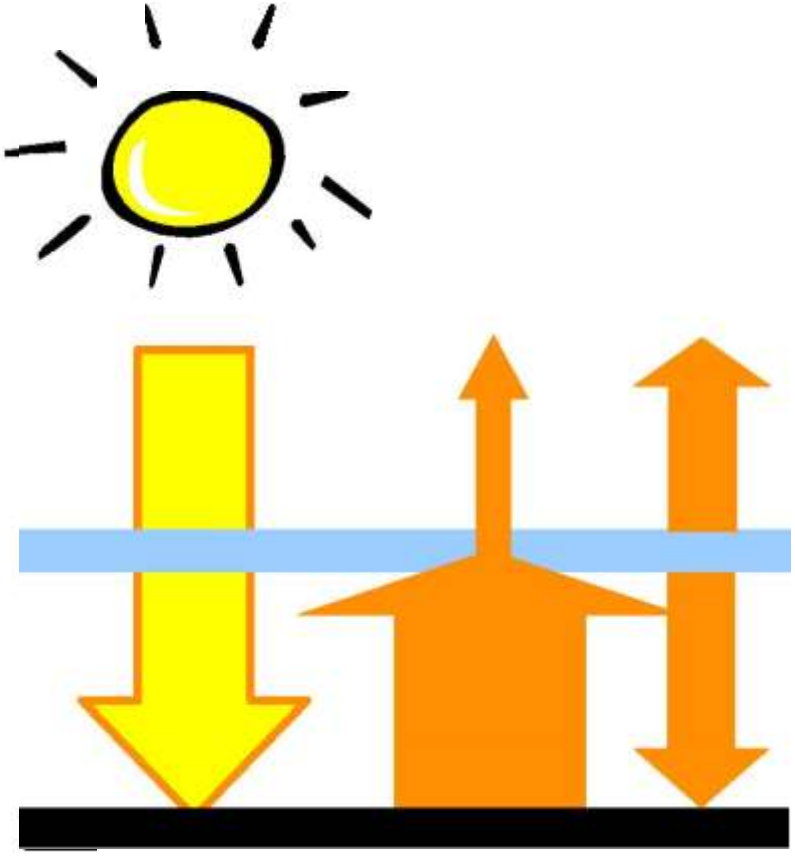
On observe que la ***Terre réfléchit 30 %*** du rayonnement solaireincident, ce qui implique à une ***température***radiative d'équilibre de ***-18°C.***

La ***température*** de surface ***mesurée*** est d'environ ***15°C***.

La ***différence*** entre ces deux températures est dueà ***l'effet de serre***.

Température d'équilibre d'une planète

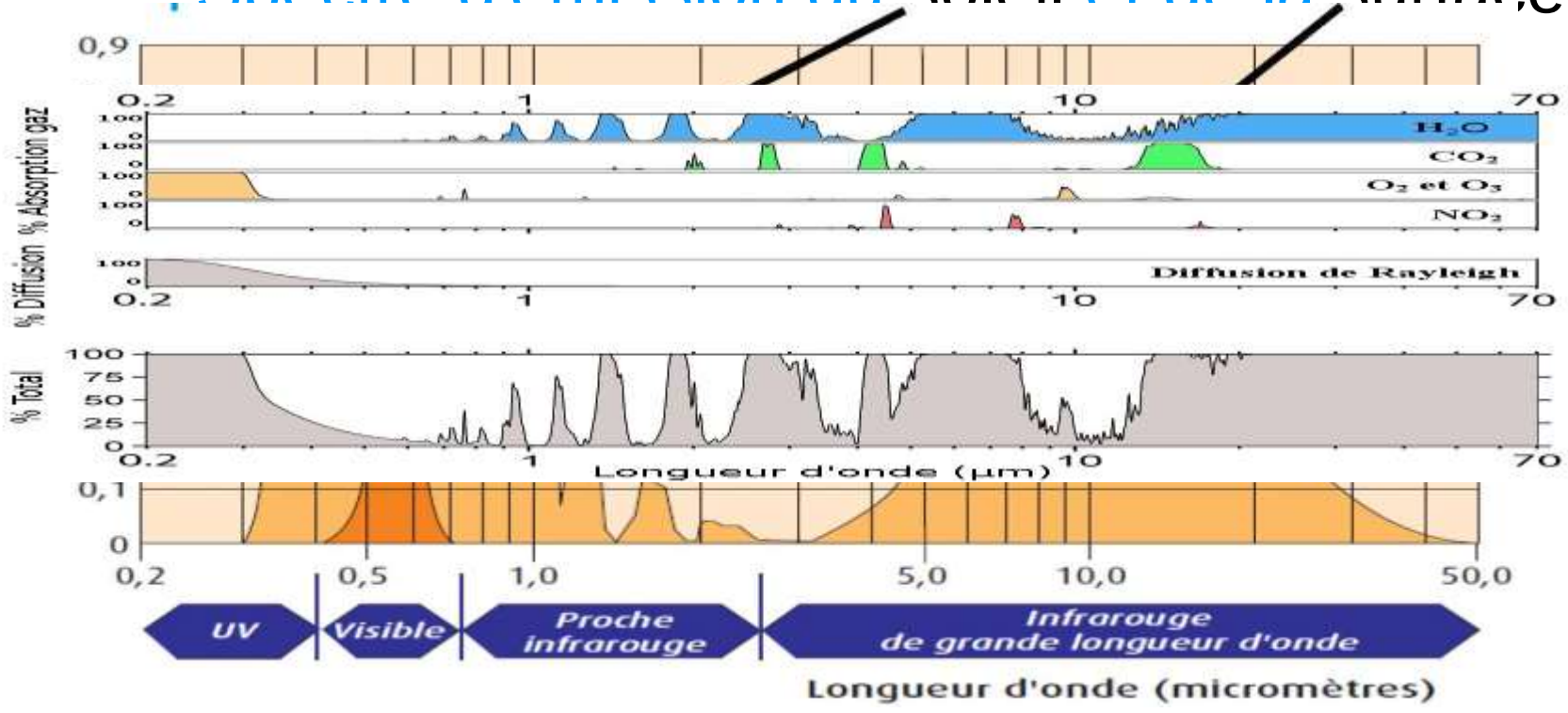




Analogie de l'effet de serre

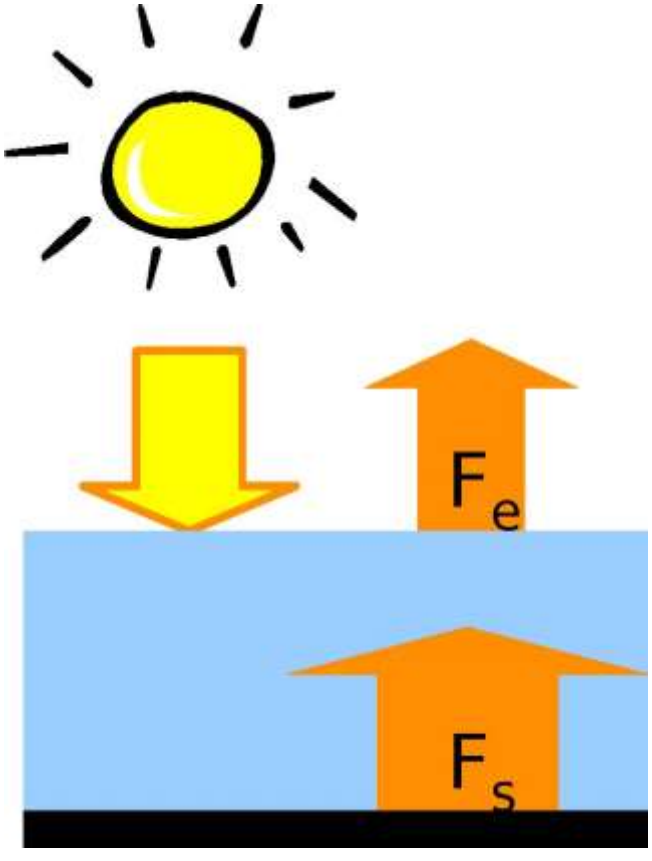
La température de surface moyenne résulte du bilan d'énergie

Spectre d'émission du soleil et de la surface

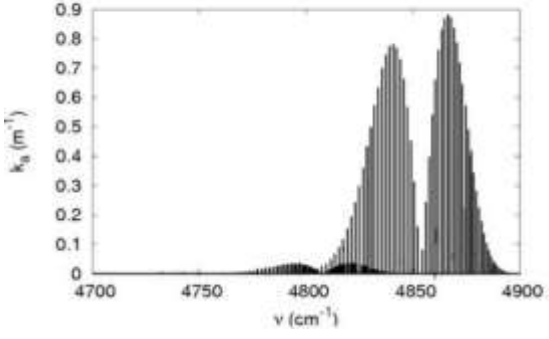


Absorptivité de l'atmosphère

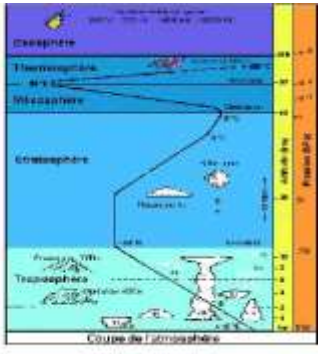
Effet de serre



Effet de serre:
$G=F_s-F_e$



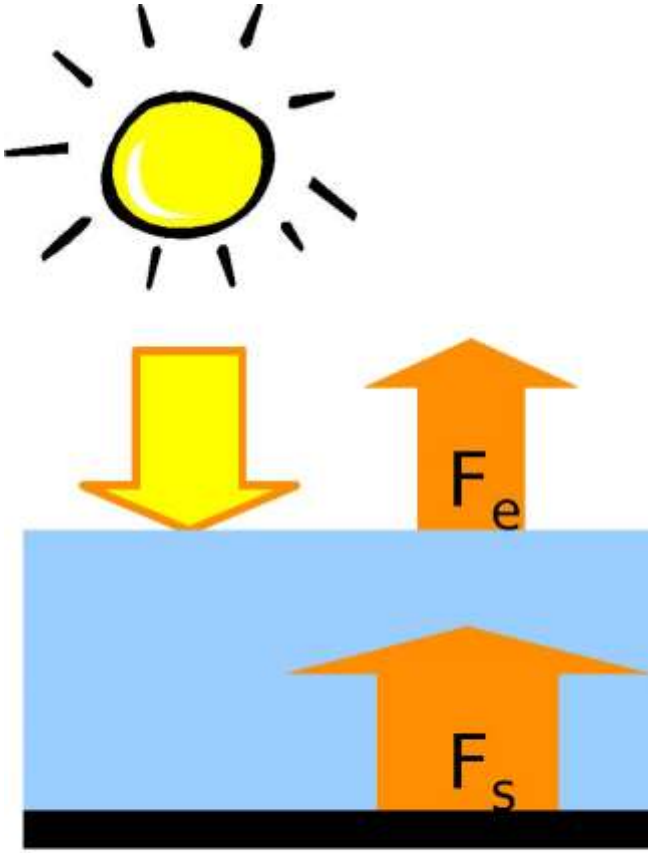
Propriétésd'ab sorptionsdes gaz



Profil vertical de la température et dela composition del'atmosphère

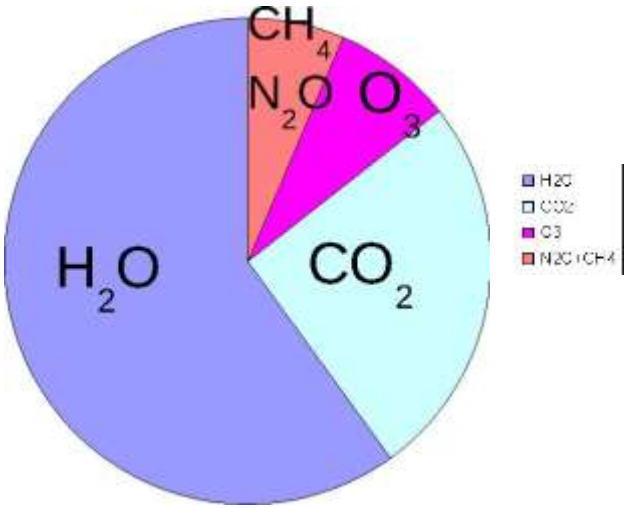
Calcul des flux radiatifs **F** et de l'effet de serre **G**

Principaux gaz à effet de serre pour l'atmosphère terrestre



Effet de serre:
$G=F_s-F_e$

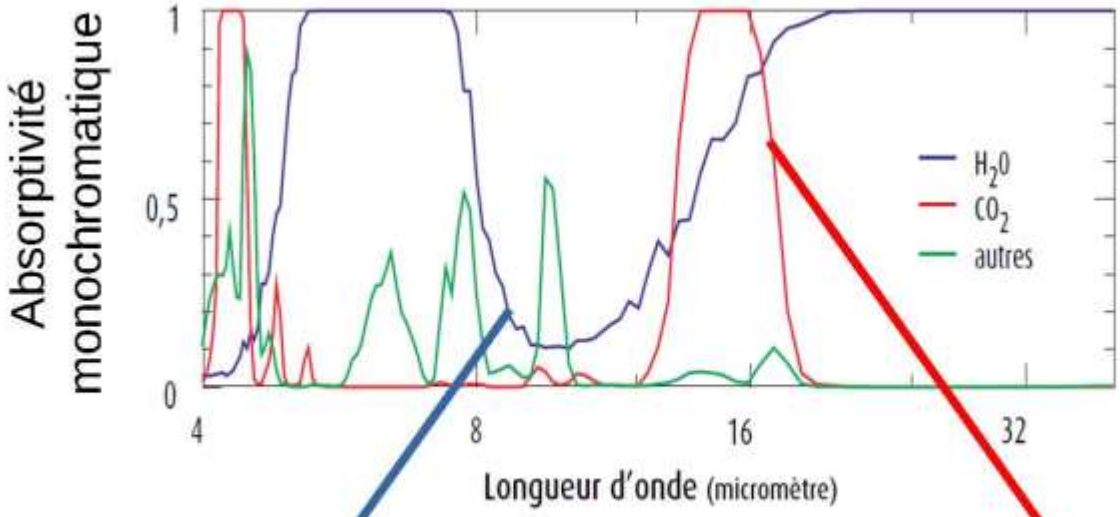
Contribution à l'effet de serre

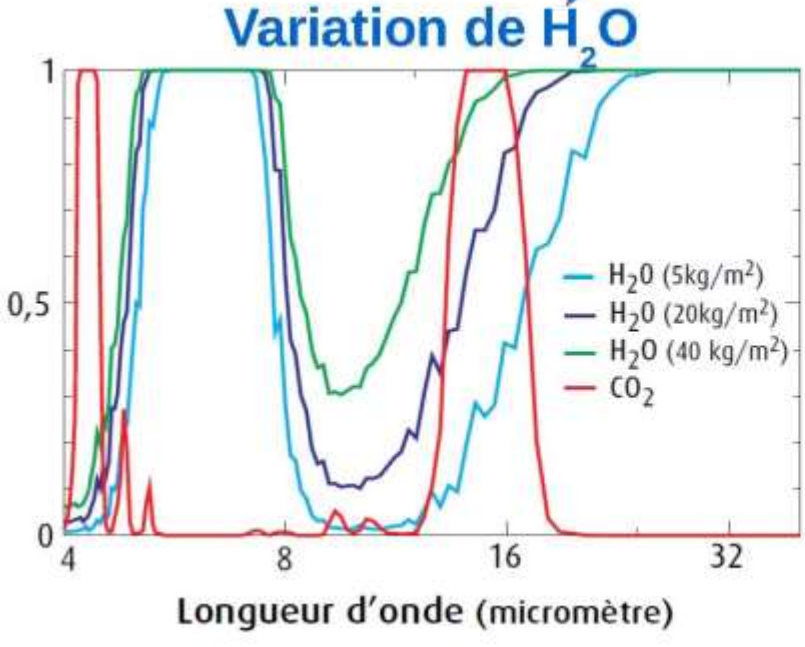


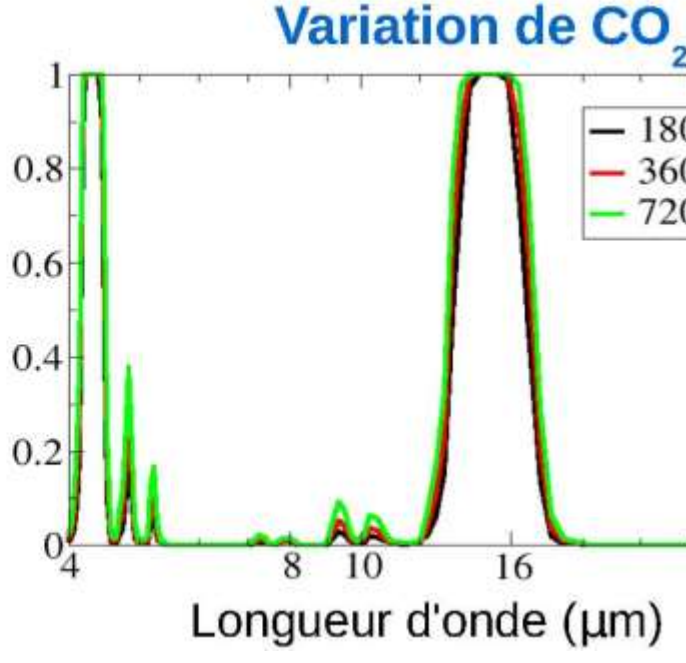
Source: Meehl and Trenberth, 1997

Effet de serre	(W.m^{-2}):	
Vapeur d'eau	75	60%
CO_2	32	26%
ozone	10	8%
N_2O+CH_4	8	6%

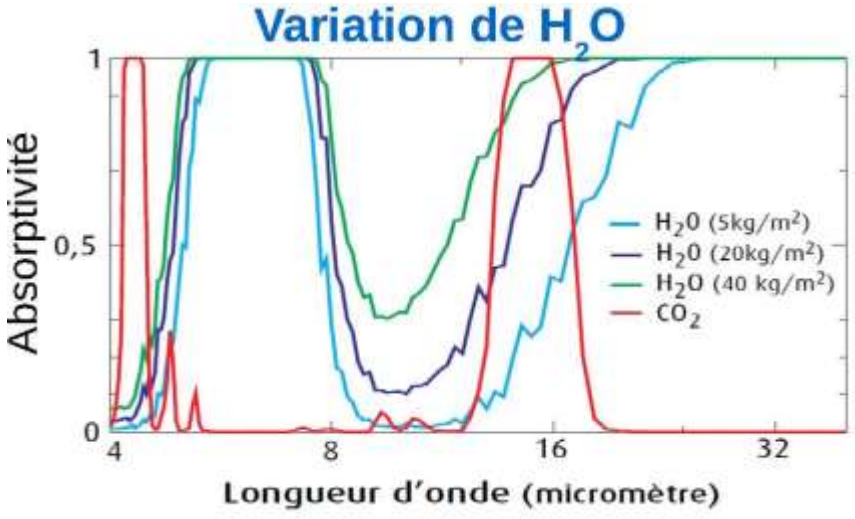
Absorption des gaz dans l'infrarouge

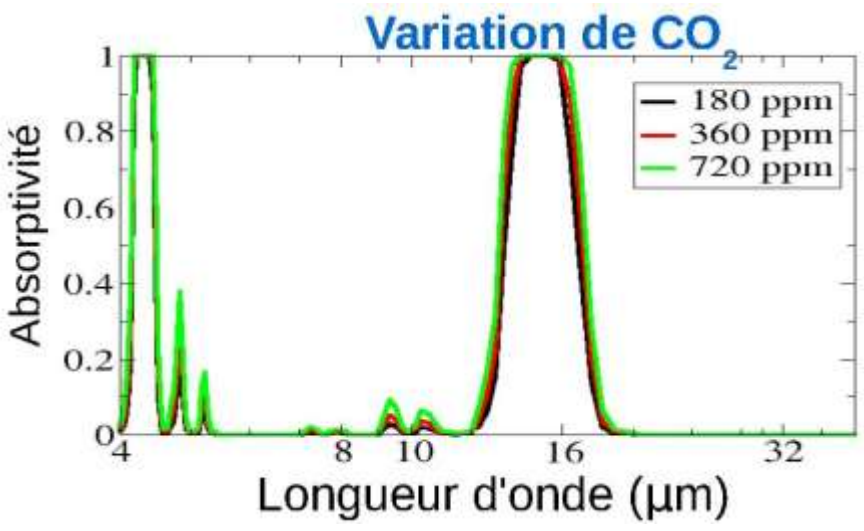




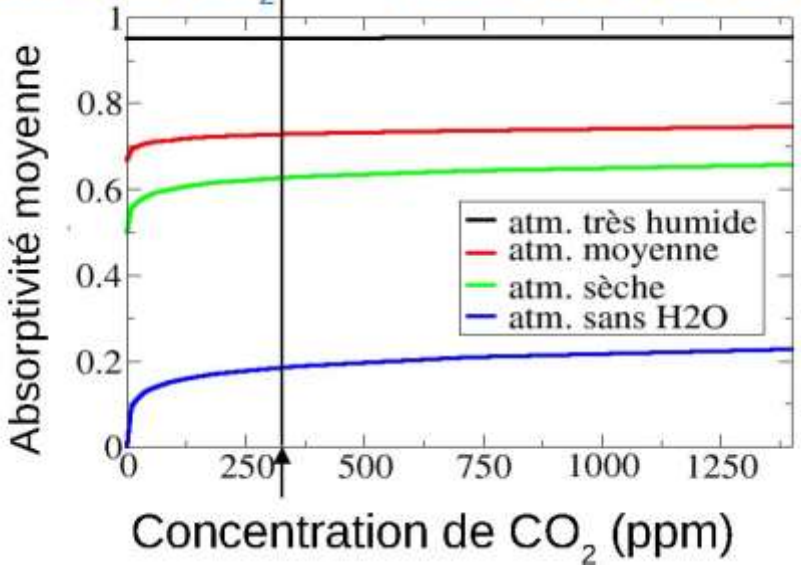


Absorption des gaz dans l'infrarouge



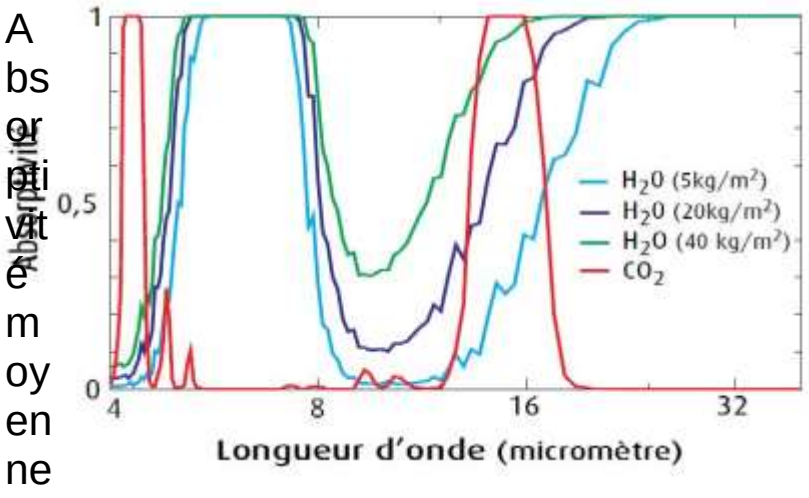


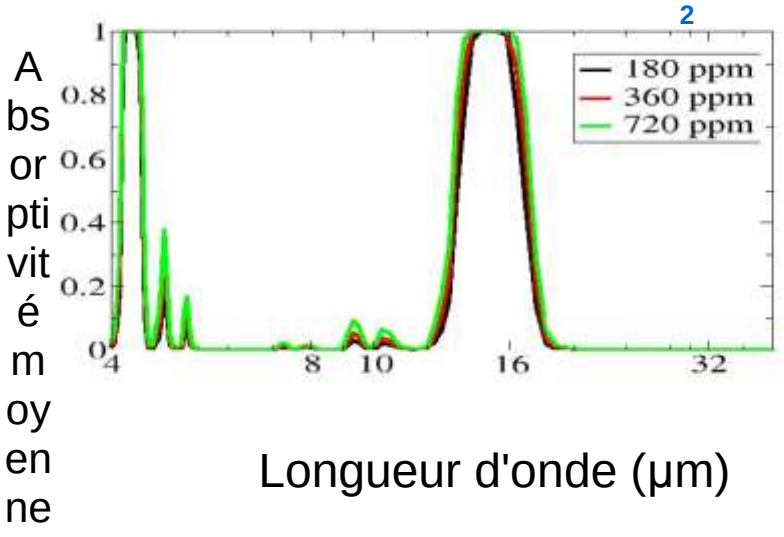
Absorptivité de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en *fonction du CO_2* pour *différentes valeurs de H_2 0*



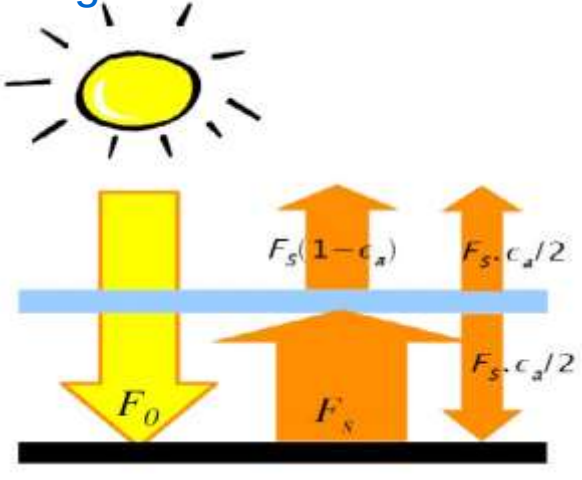
Variation de la concentration des gaz

Variation de HO_2

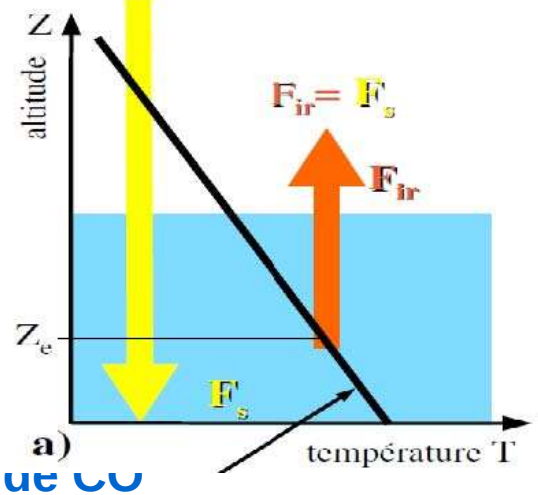




Modèle d'interprétation:
analogie de « l'effet de serre »

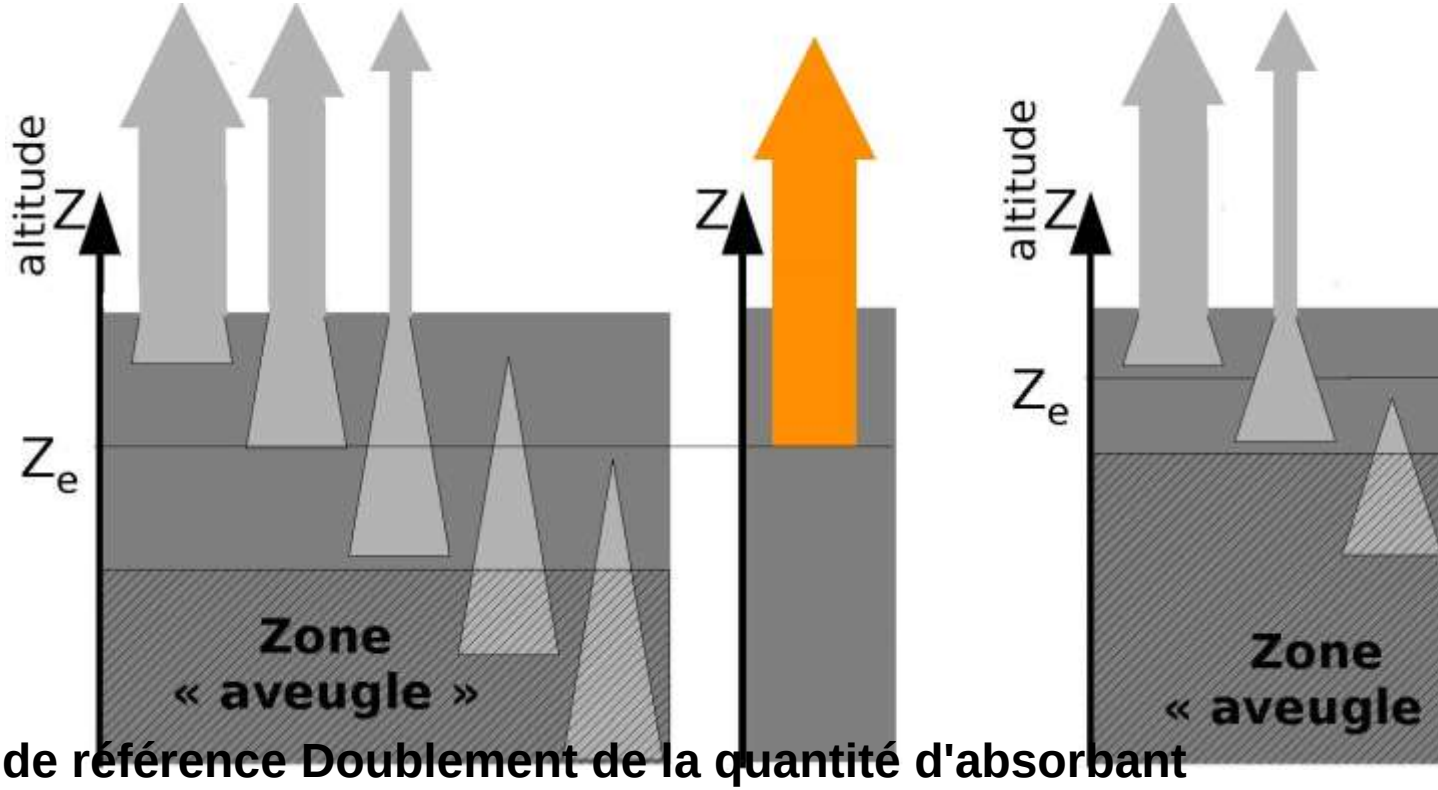


Modèle d'interprétation:
altitude d'émission

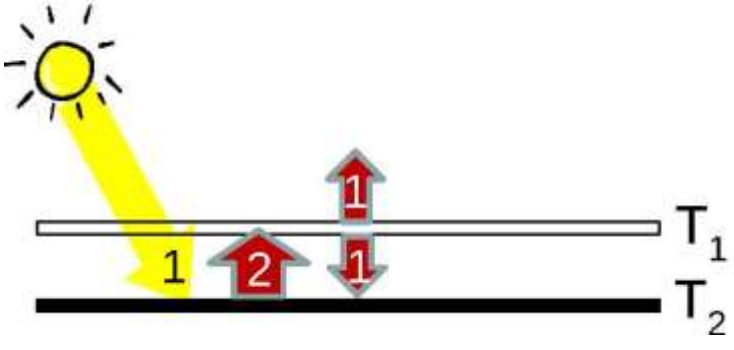


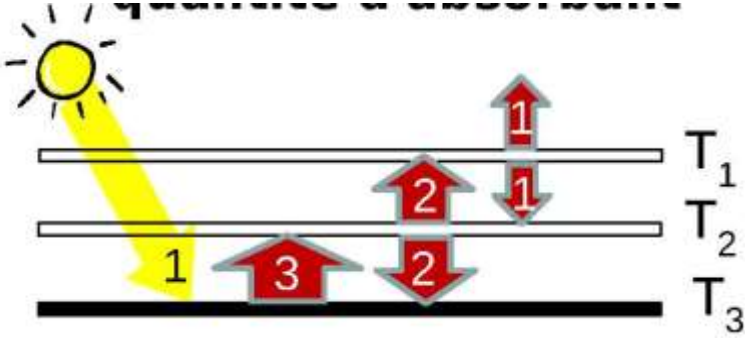
Variation de CO

Altitude d'émission



Configuration de référence Doublement de la quantité d'absorbant





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 deCO2
- Critique: la Terre « régule » la concentration de CO2
- Calcul de la variation de température due à une variation de CO2
- Critique: la variation de CO2 ne change pas l'absorption du rayonnementinfrarouge par l'atmosphère

A partir des années 1960:

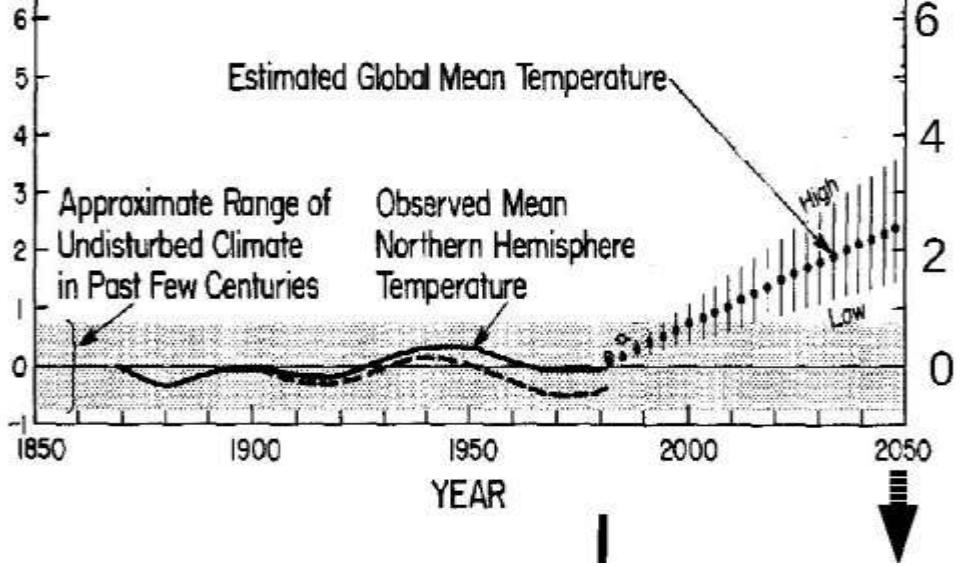
- Rayonnement infra-rouge mieux connu

On observe un accroissement de la concentration de CO2

Premier calcul « moderne » de l'accroissement de température en réponseà un accroissement de CO2

Développement des modèles de climat

Observations des variations des paléoclimats



imatiques alors que
eu augmenté

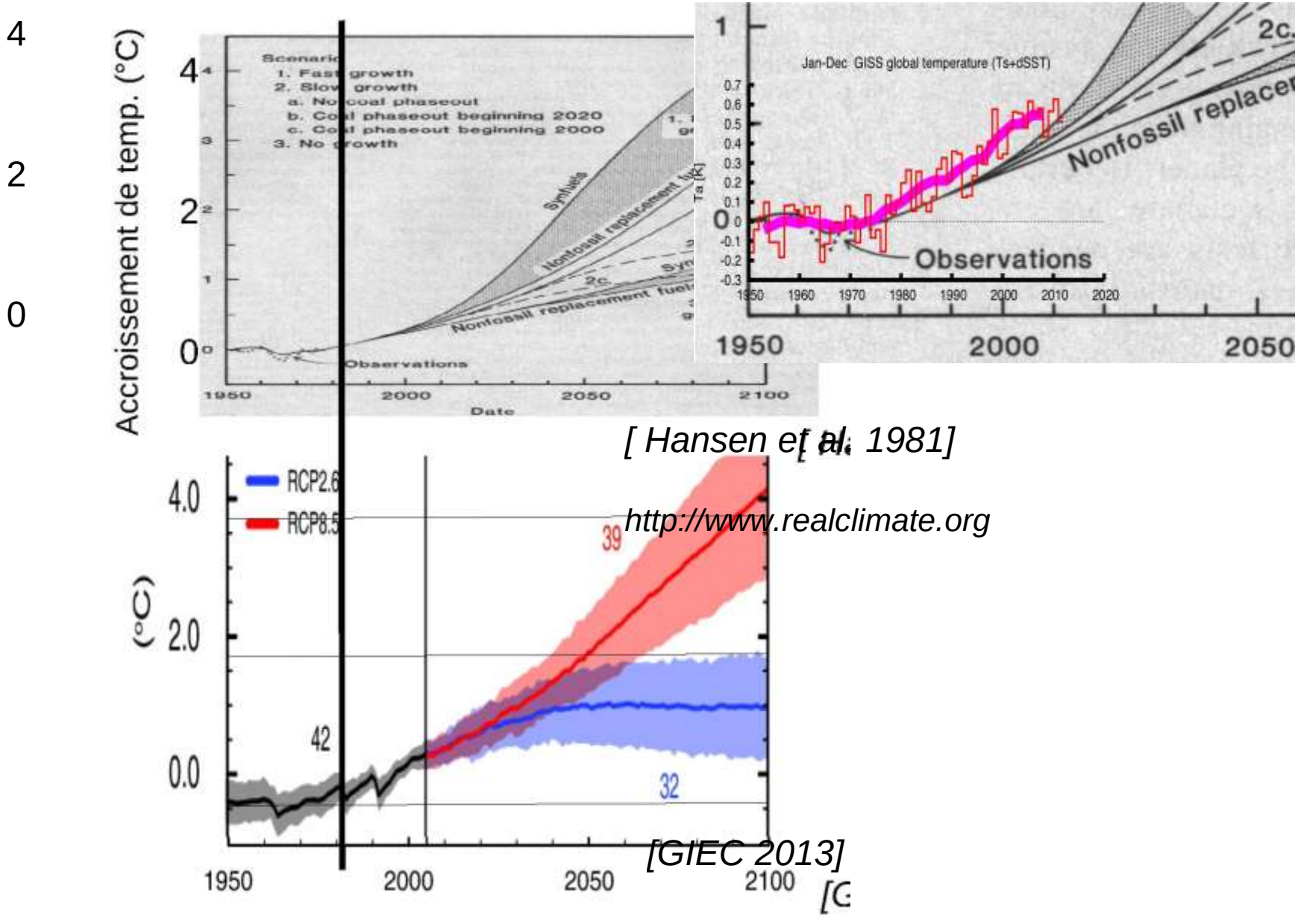
[Kellogg 1977]

(W.m-2):

75	60%
32	26%
10	8%
8	6%

[GIEC 2	4 6

Premières projections climatiques alors que la température a peu augmenté



[Hansen et al. 1981]

http://www.realclimate.org

[GIEC 2013]

Plan

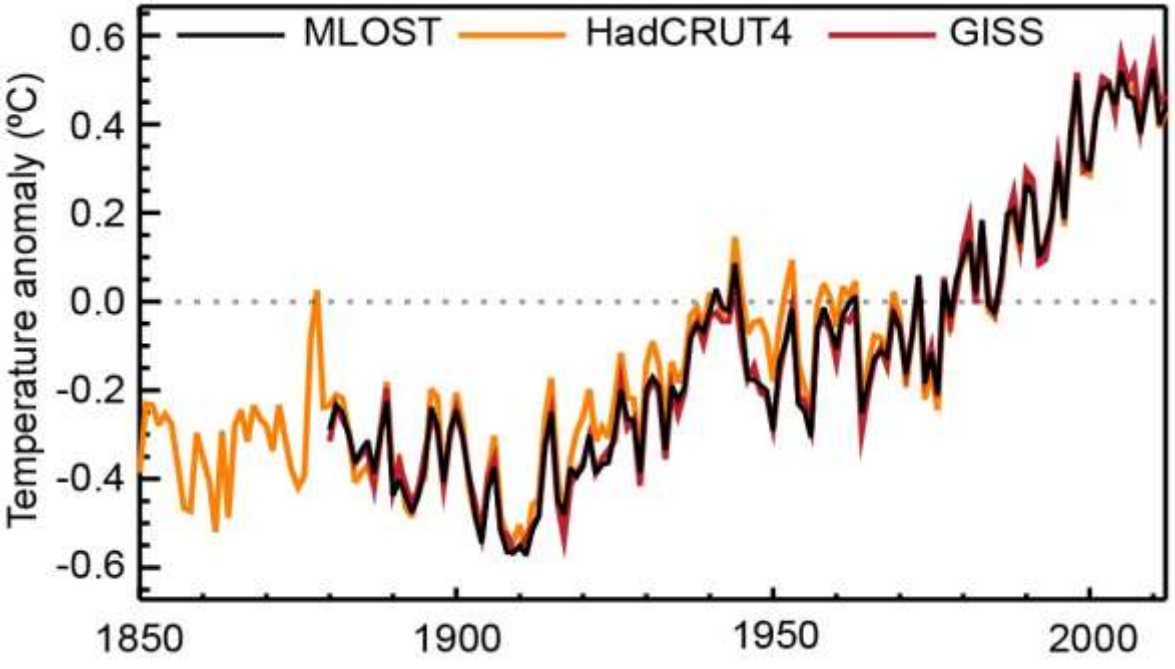
I. Base physique et rapide historique

II. Variations du climat et rôle des activités humaines

III. Projections des climats futurs

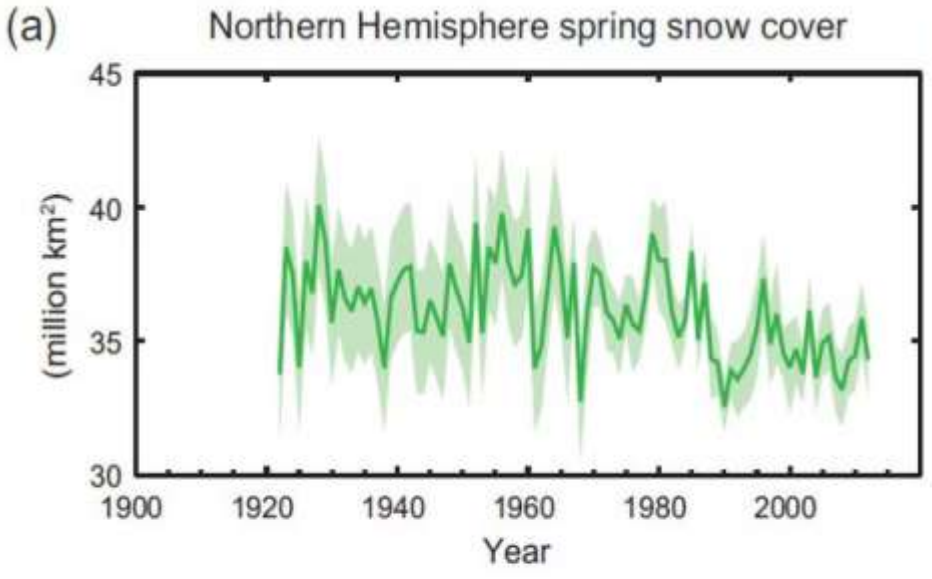
IV. Paléoclimats et variabilité naturelle

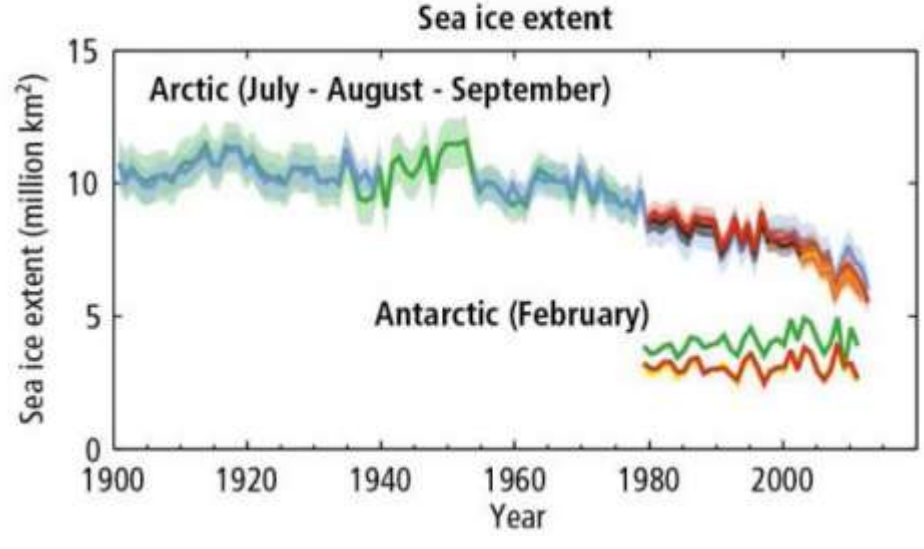
Variation de la moyenne de température de surface

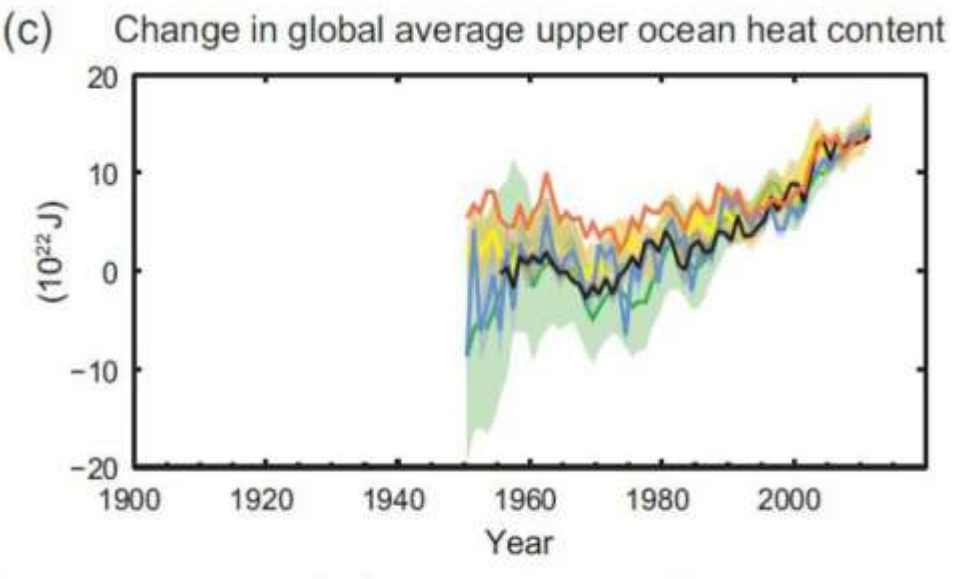


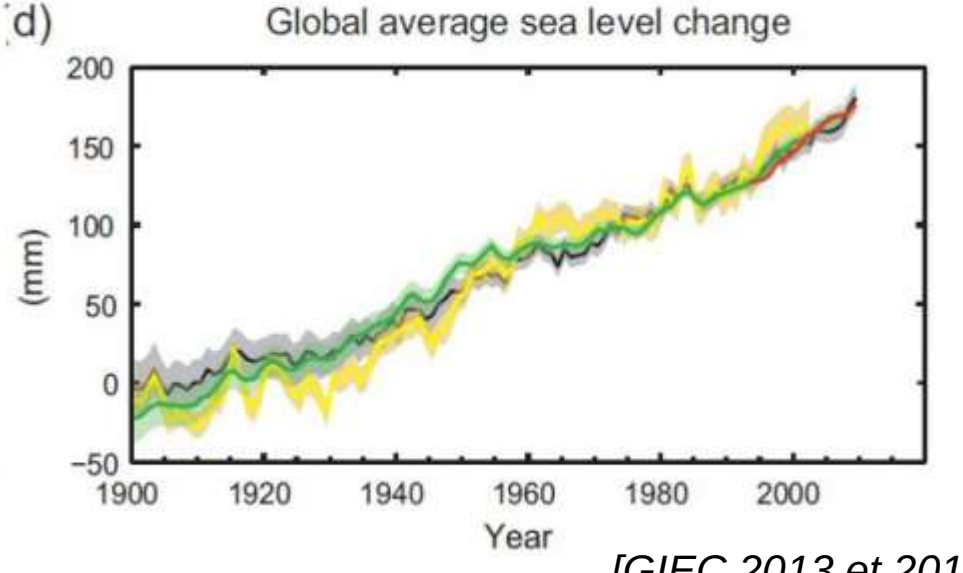
[GIEC 201

Variations du climat et rôle des activités humaines



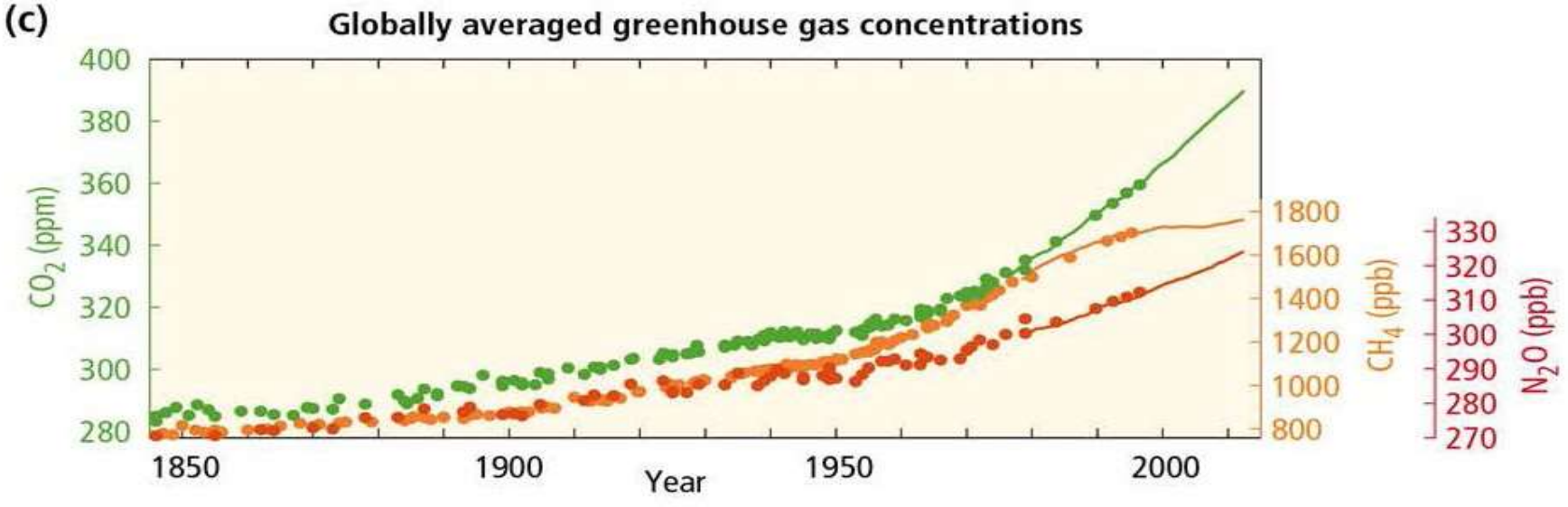


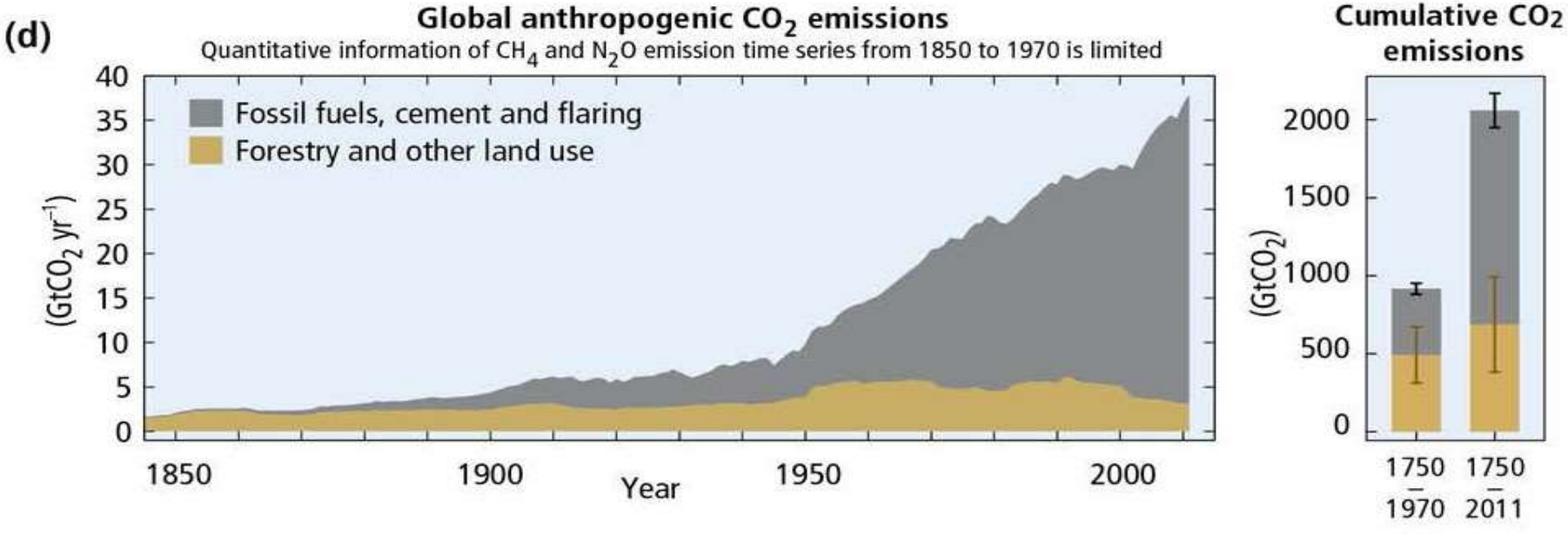




[GIEC 2013 et 201

Variations du climat et rôle des activités humaines



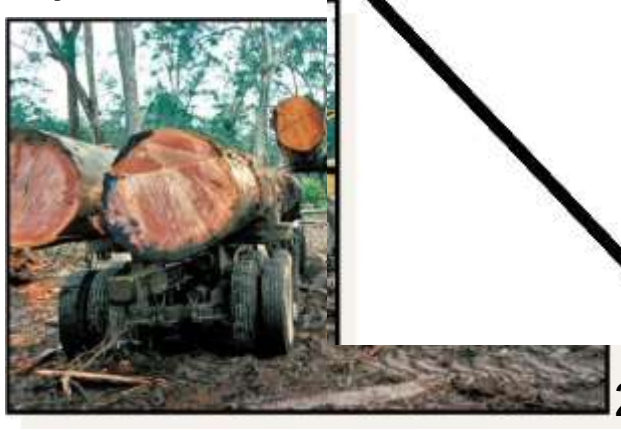


Emissions moyennes de CO_2 pour 2003-2012

1 GtC = 3.67 $GtCO_2$

8,6 ± 0,4 GtC y^{-1}

0,8 ± 0,5 GtC y^{-1}



2,6 ± 0,5 GtC y^{-1} **45%**

2,6 ± 0,8 PgC y^{-1} **27%**

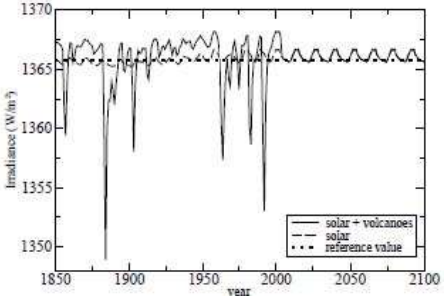
27%

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

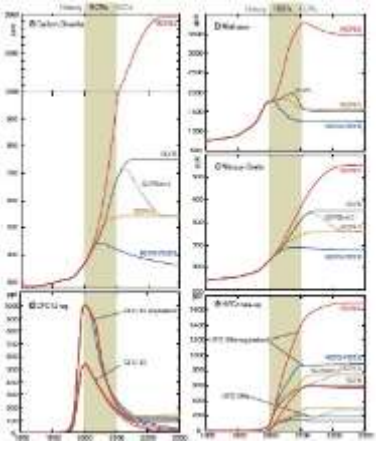
Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL

Forçages naturels et anthropiques

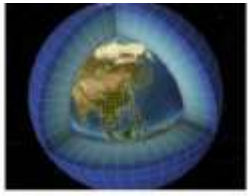
Soleil et volcans



Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs



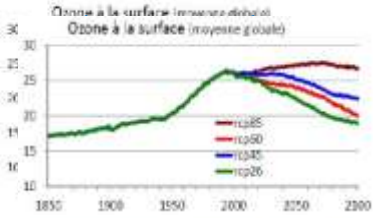
Concentration de CO_2



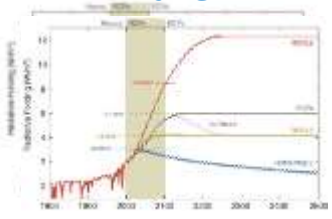
Modèle de climat

- 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

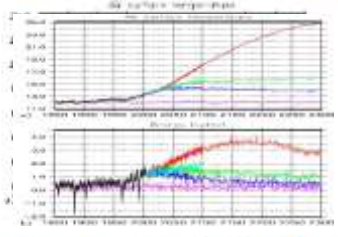
Composition de l'atmosphère



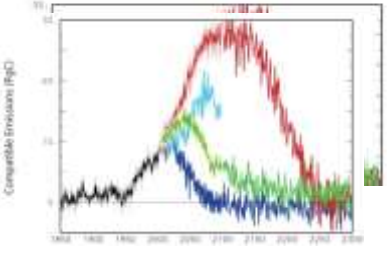
Forçage radiatif



Changement climatique



Émission autorisée de CO_2

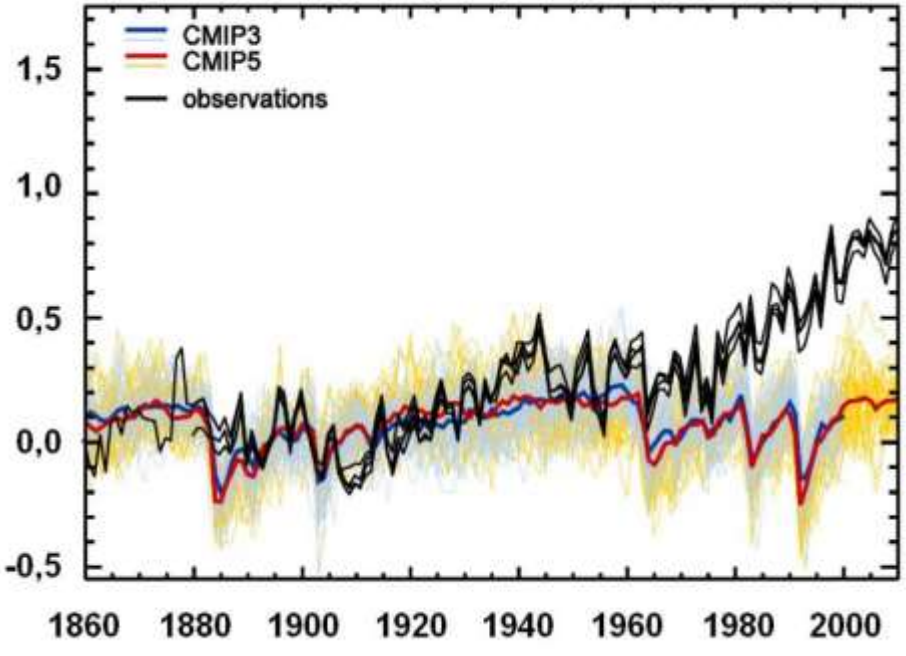


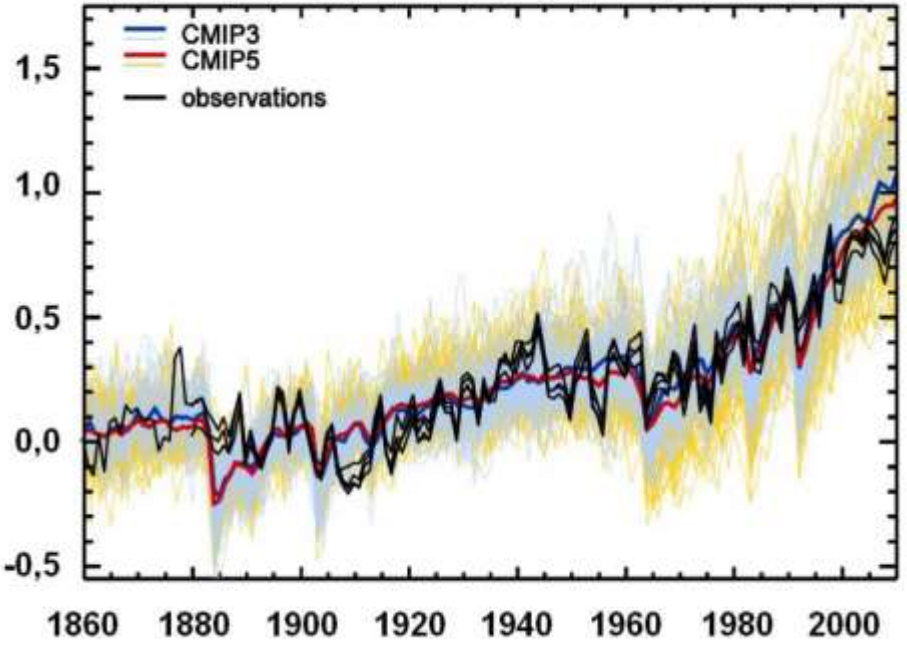
Évolution récente de la température de surface de la Terre

Test d'hypothèse sur le rôle des activités humaines

Simulations avec forçages naturels seulement

Simulations avec forçages naturels et anthropiques





[GIEC, 2013]

Plan

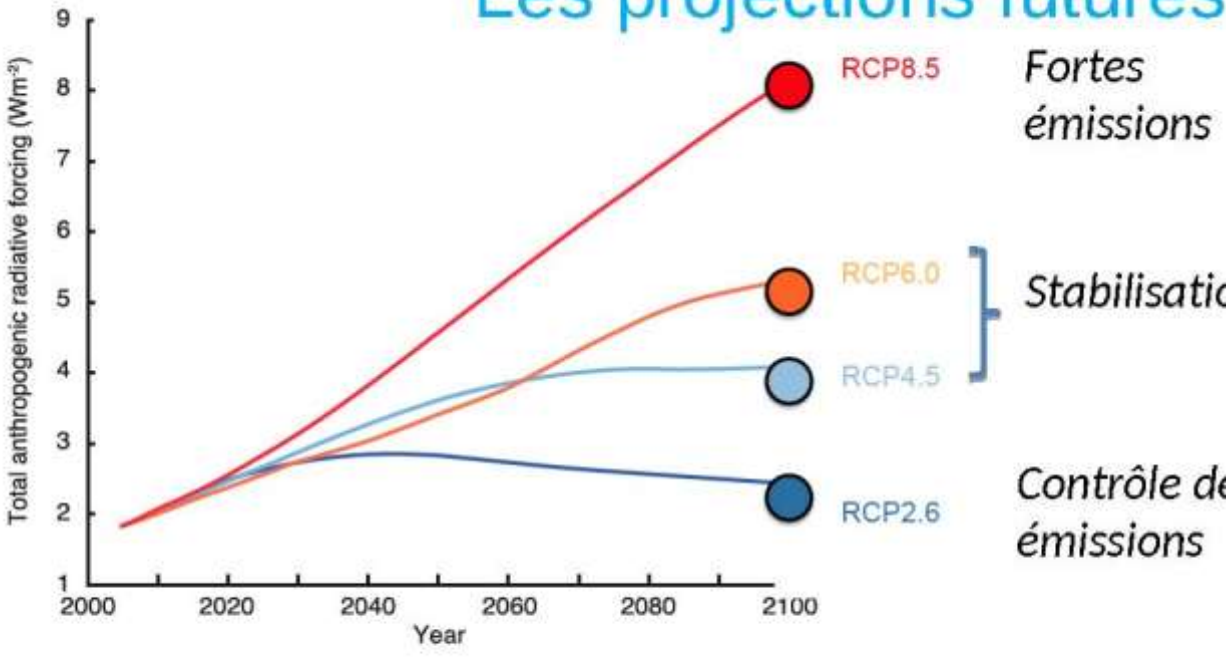
I. Base physique et rapide historique

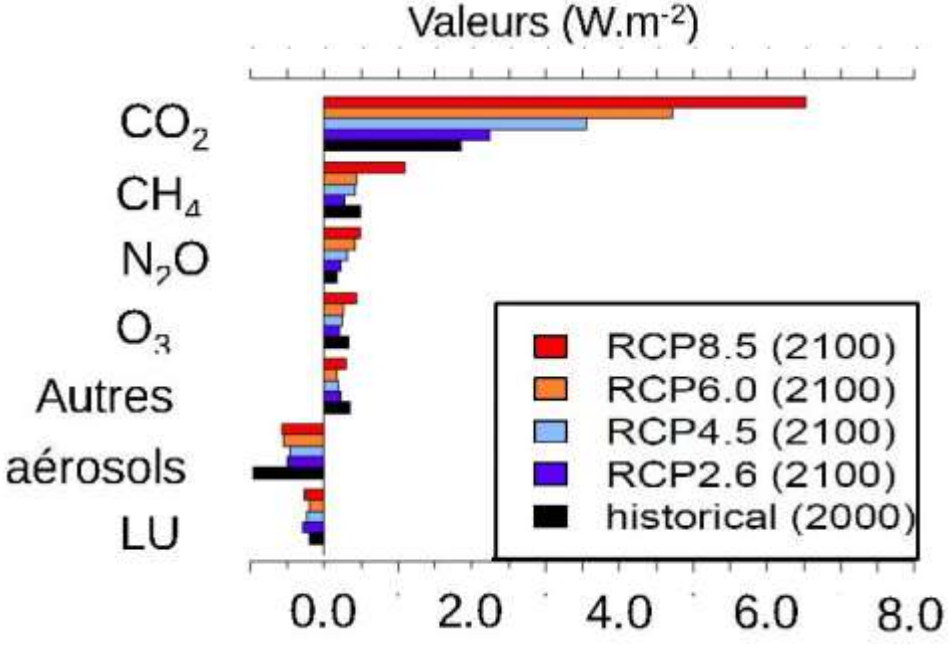
II. Variations du climat et rôle des activités humaines

III.Projections des climats futurs

IV. Paléoclimats et variabilité naturelle

Les projections futures





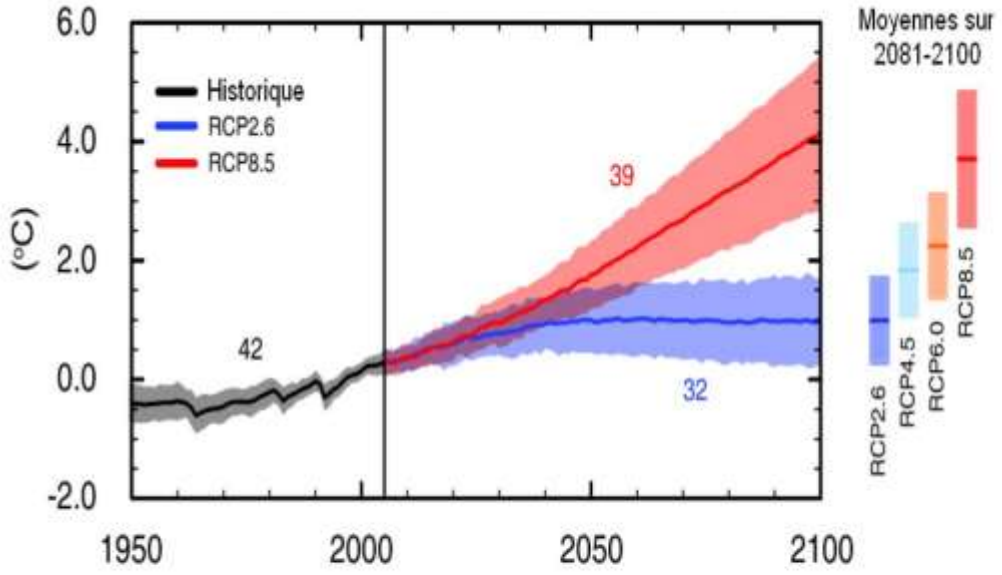
Forte

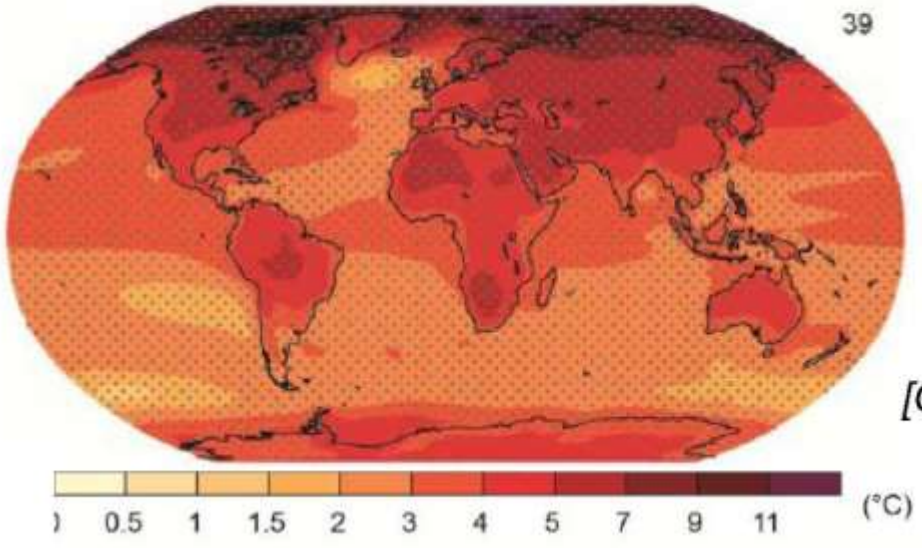
ons

*Contribution des forçages individuels au forçage total (référence **1850**)*

Température de surface

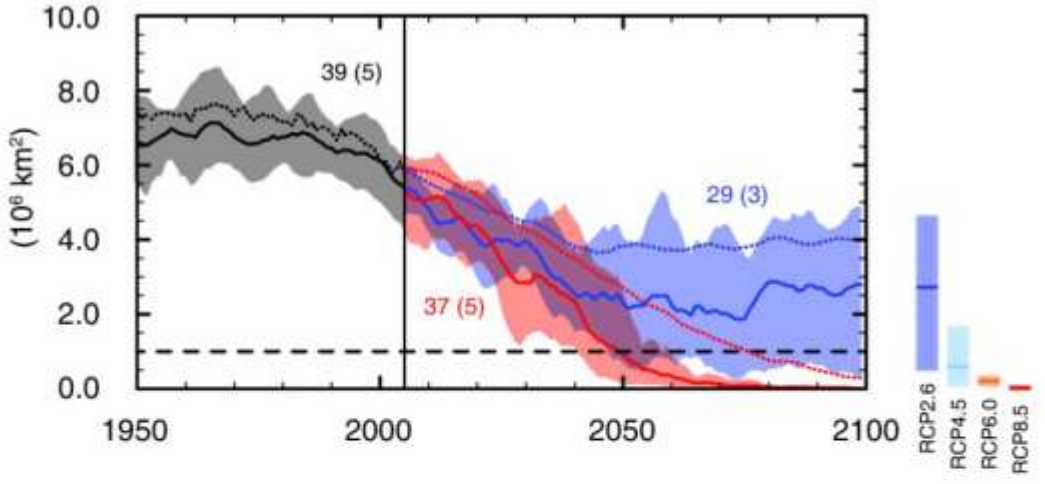
glo
(40

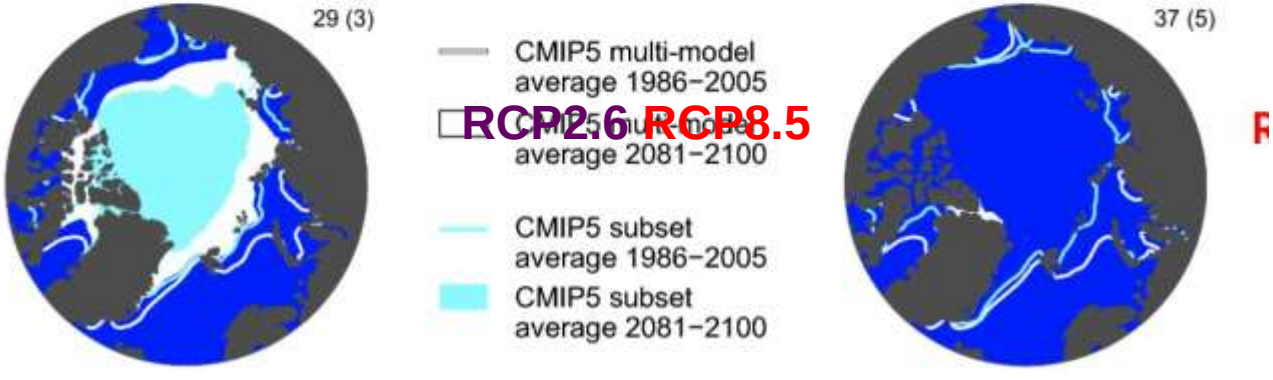




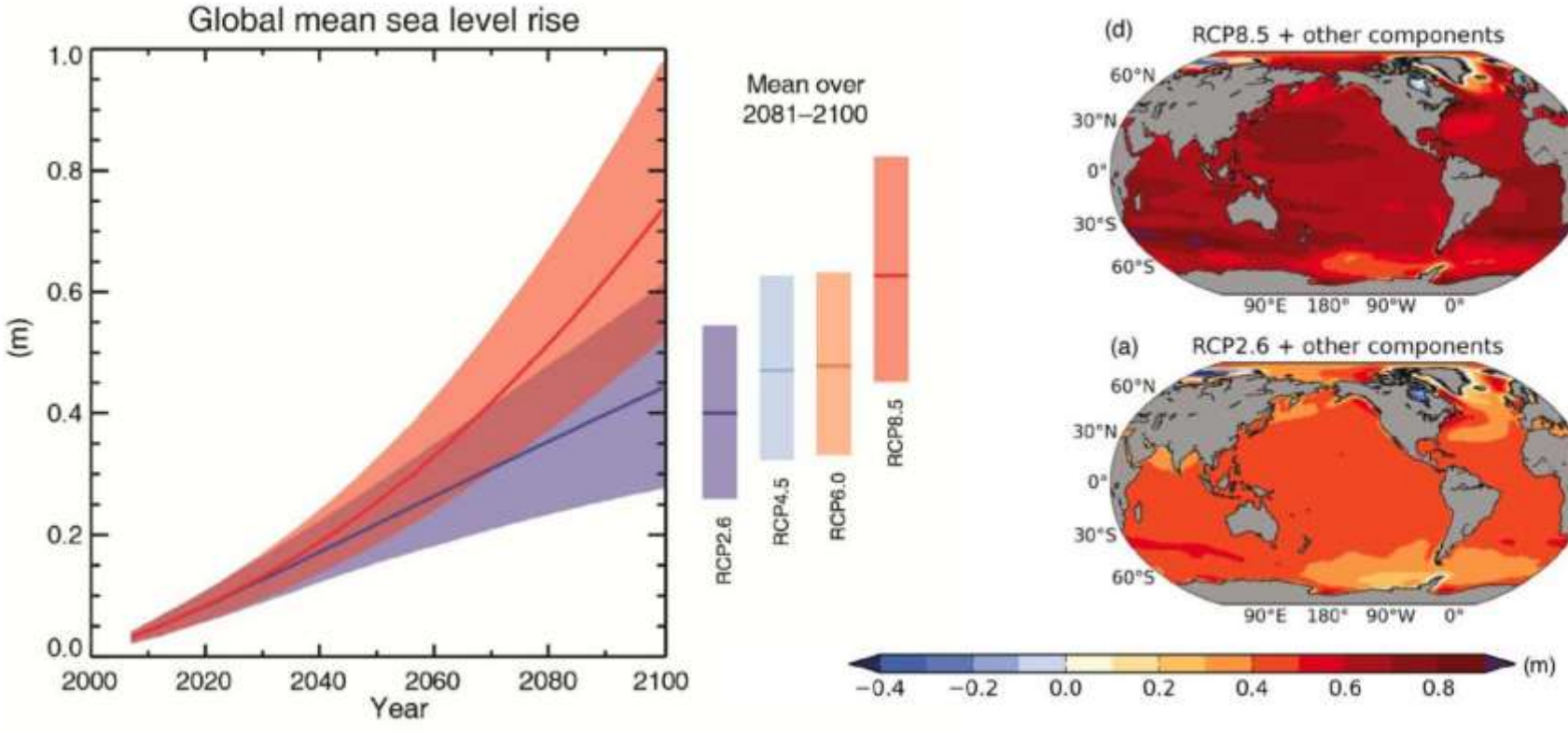
[GIEC, 2013]

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



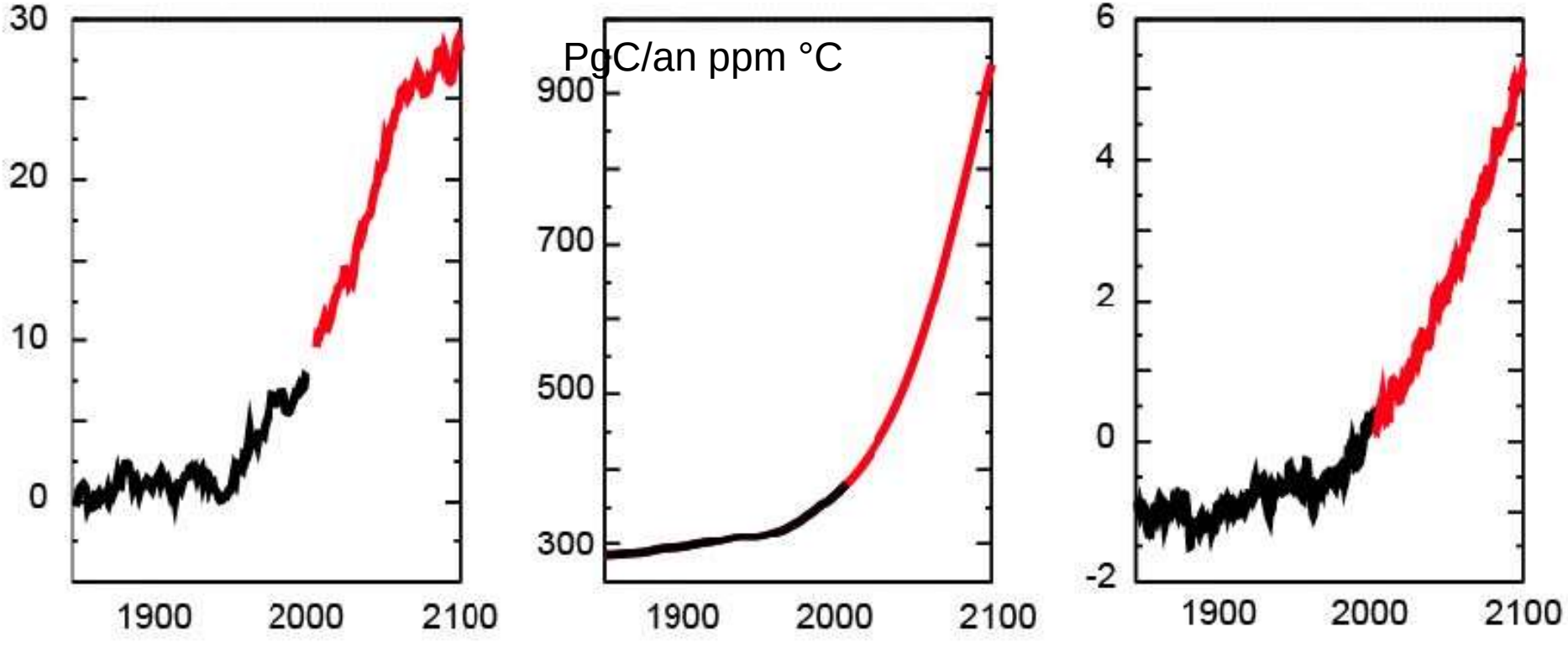


RCP2.6 RCP8.5


Global mean sea level rise
(m)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2000
2020
2040
2060
2080
2100
Year
Mean over
2081–2100
RCP2.6
RCP4.5
RCP6.0
RCP8.5
(d)
RCP8.5 + other components
60°N
30°N
0°
30°S
60°S
90°E
180°
90°W
0°
(a)
RCP2.6 + other components
−0.4
−0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
(m)

Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO_2, Température moyenne

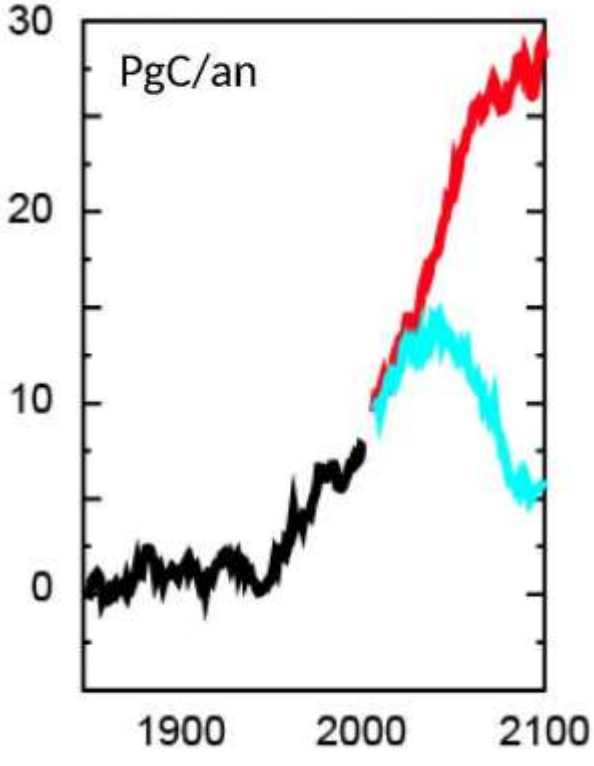
>> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent

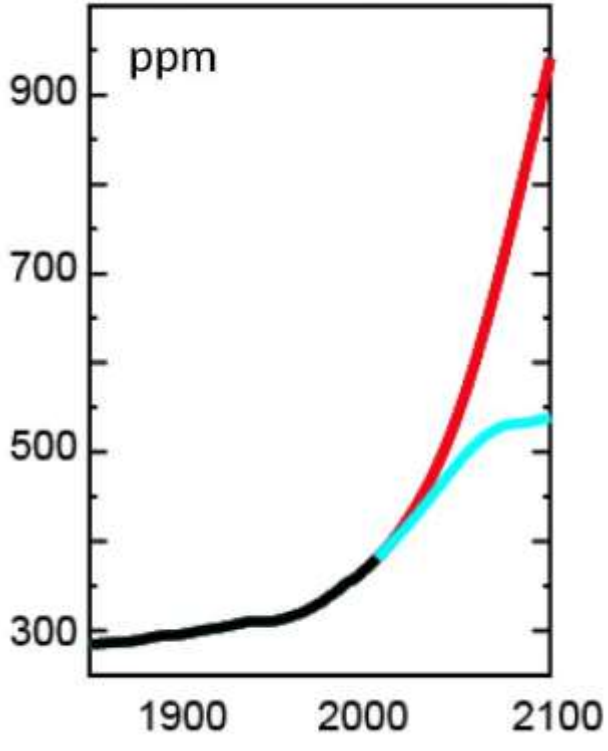


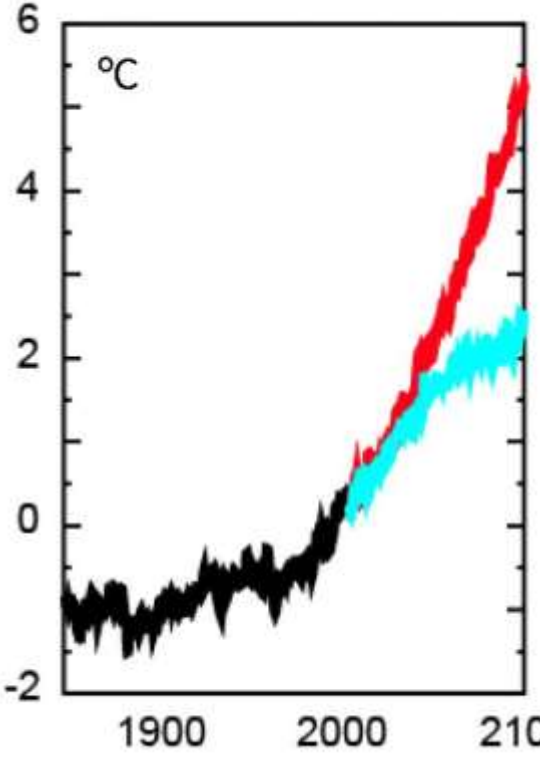
Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO_2, Température moyenne

>> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures au Scénario Médian :

pour stabiliser les concentrations à





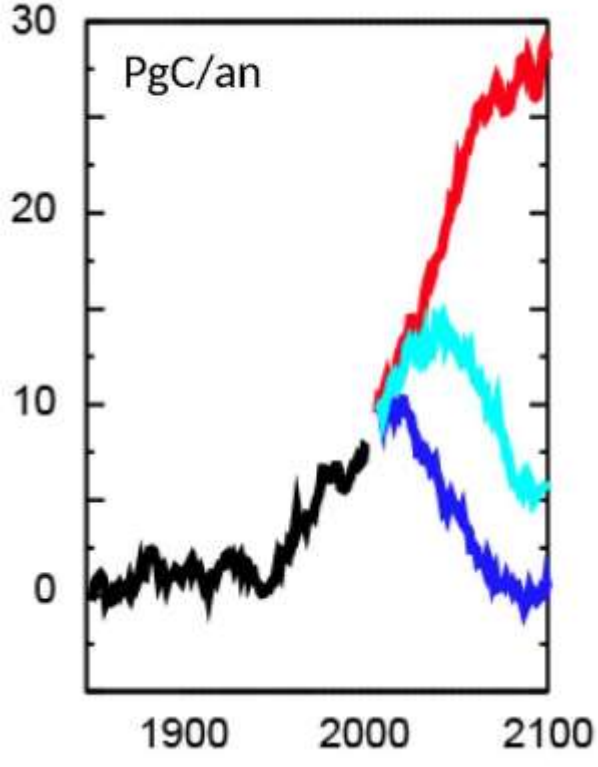


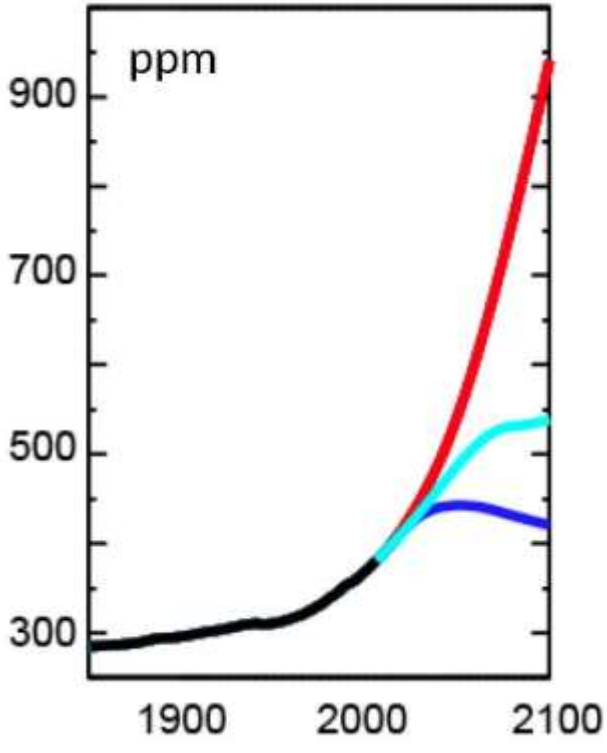
Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO_2, Température moyenne

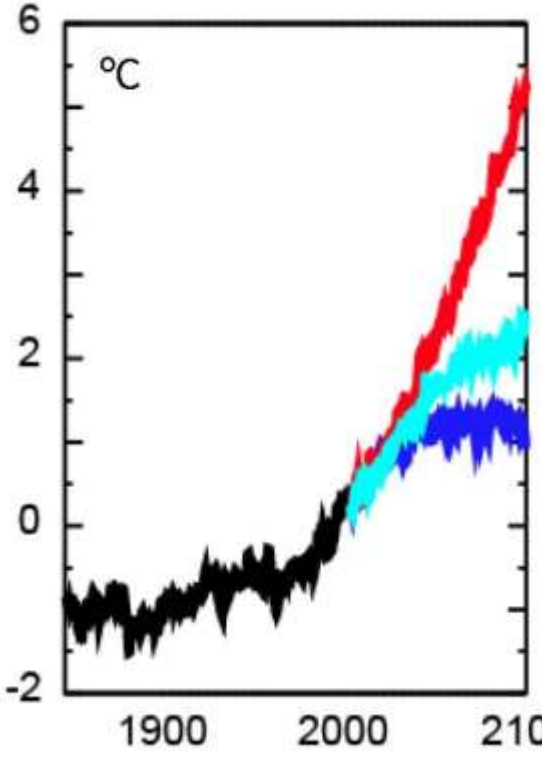
>> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures

>> **Scénario Médian** :

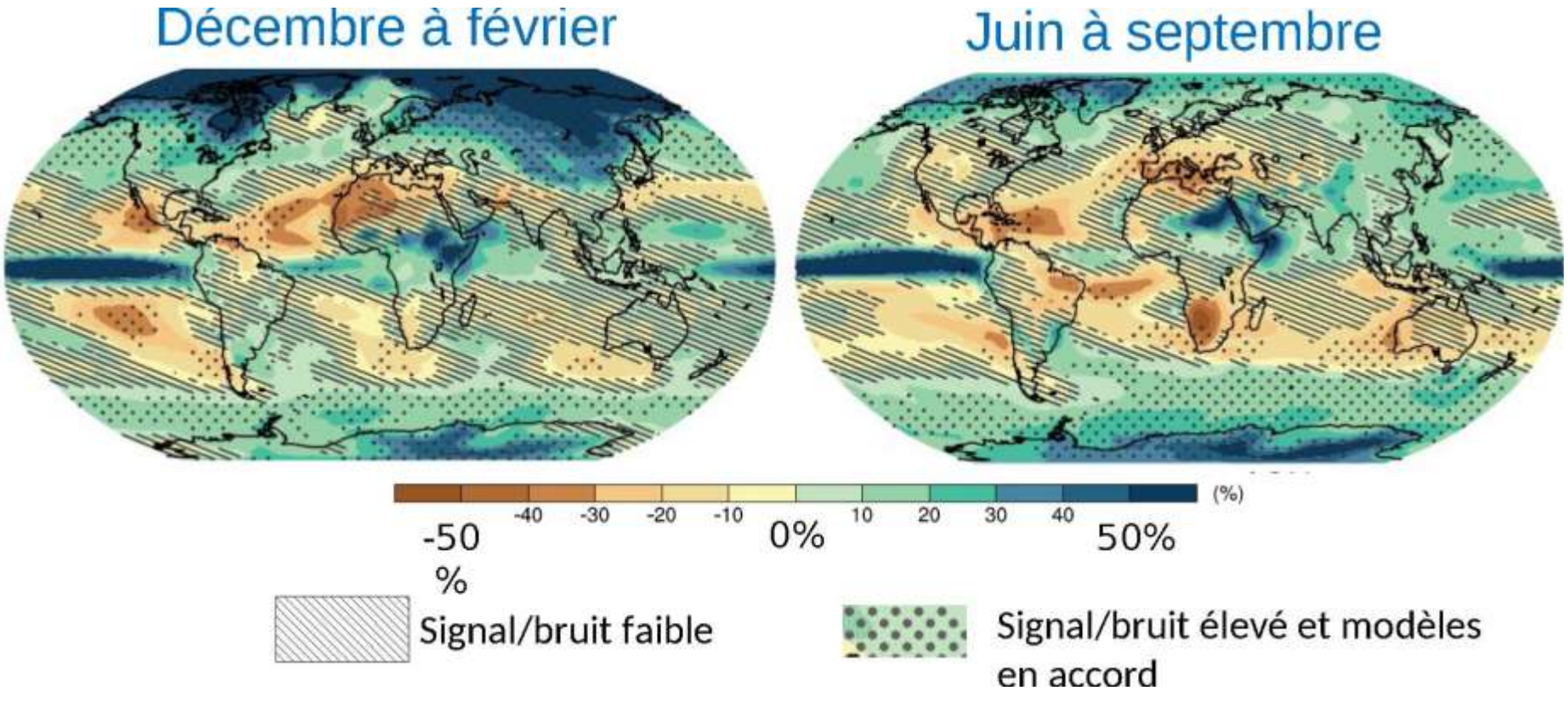
pour stabiliser les concentrations à 550 ppm, il faut décroitre fortement les émissions. Mais les







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



39 modèles CMIP5

[GIEC, AR5]

Évènements extrêmes: tendances passées et futures

Phénomène	Probabilité depuis 1950	Contribution humaine	Probabilité au début / fin du XXIe siècle
Périodes/vagues de chaleur 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 **épisodes de précipitations abondantes**	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 **sécheresses**	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 **cyclonique tropicale** 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

Plan

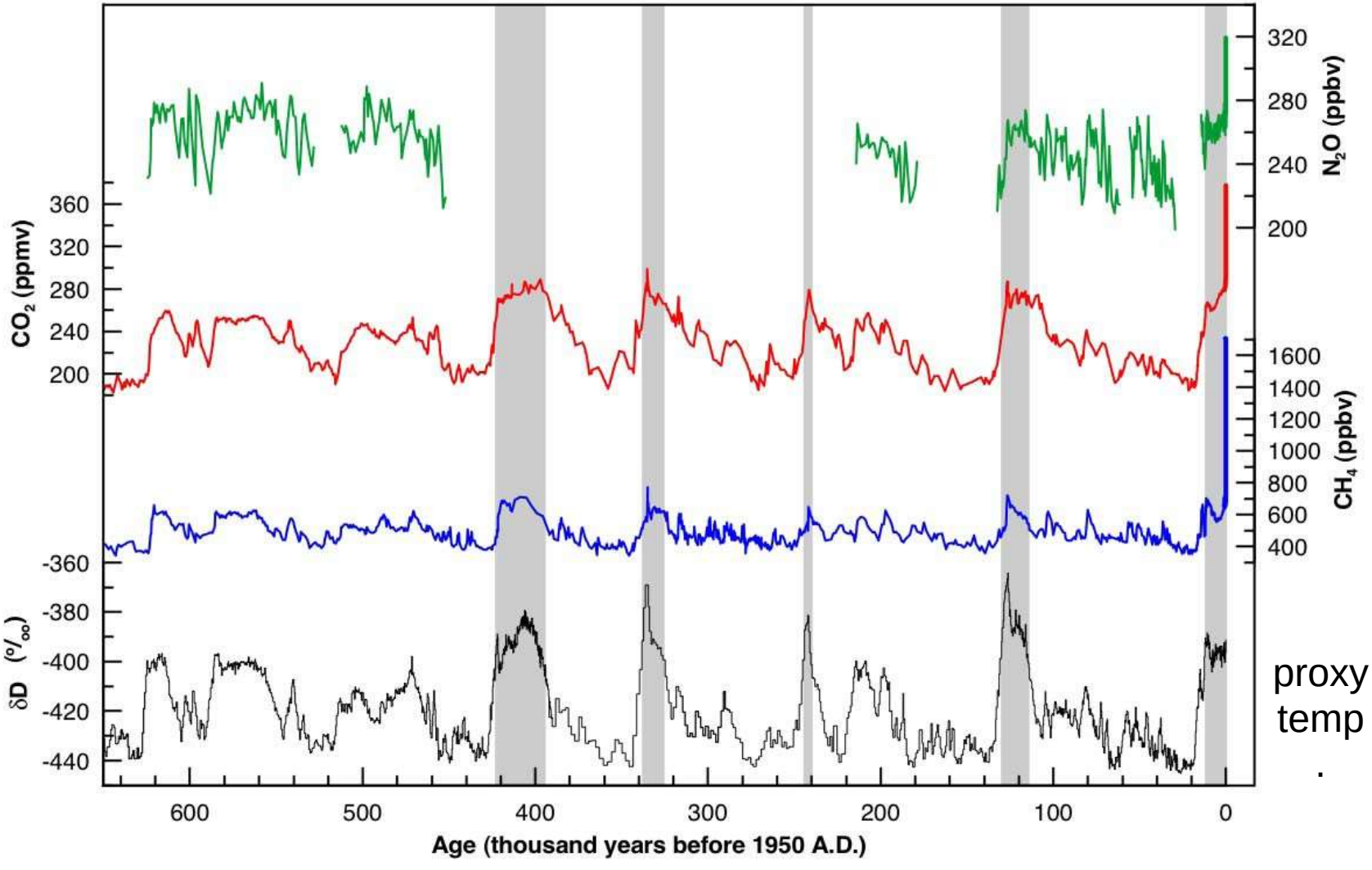
I. Base physique et rapide historique

II. Variations du climat et rôle des activités humaines

III. Projections des climats futurs

IV. Paléoclimats et variabilité naturelle

Reconstructions à partir de carottages glaciaires et observations récentes

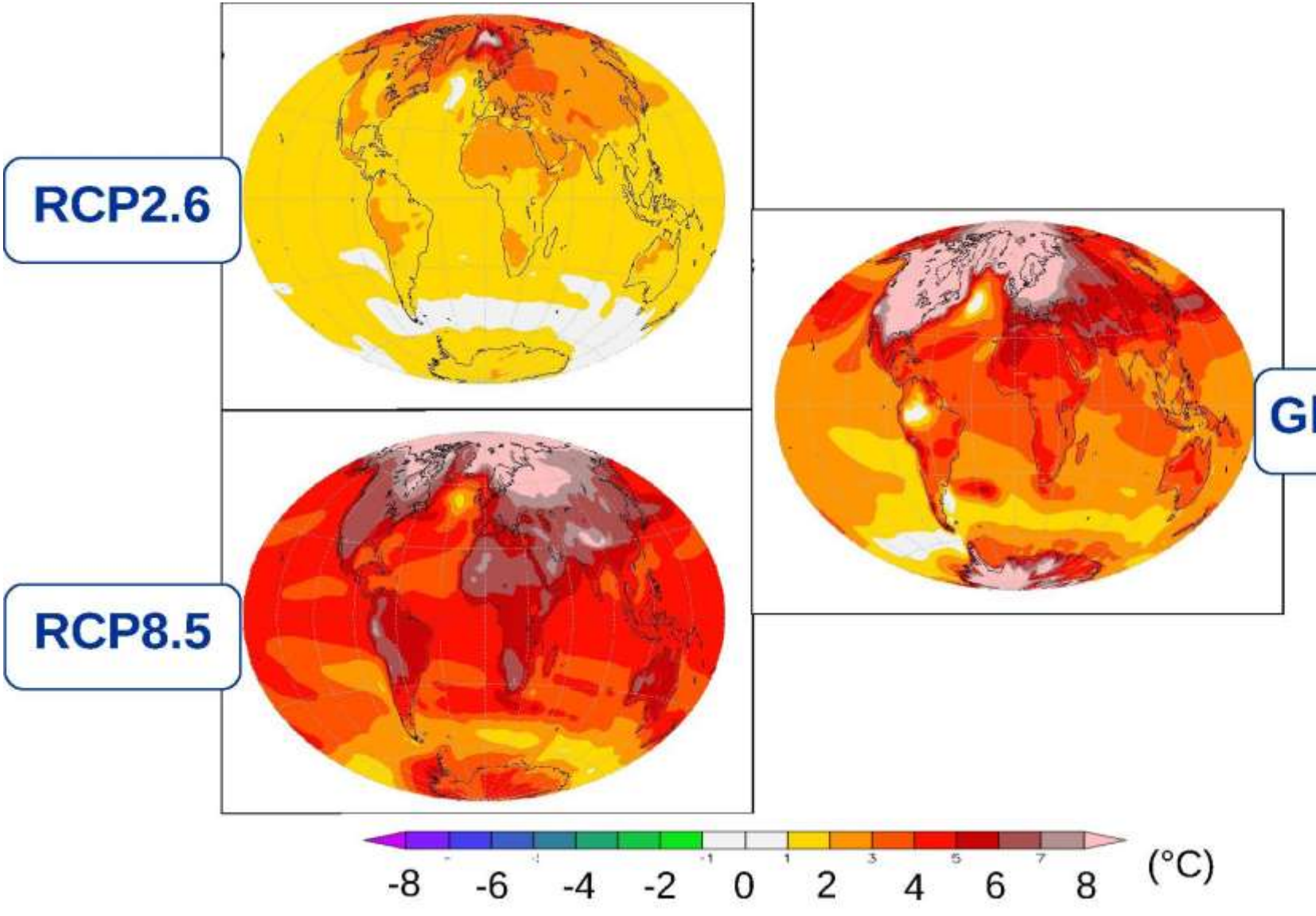


proxy
temp
.

[GIEC, 201

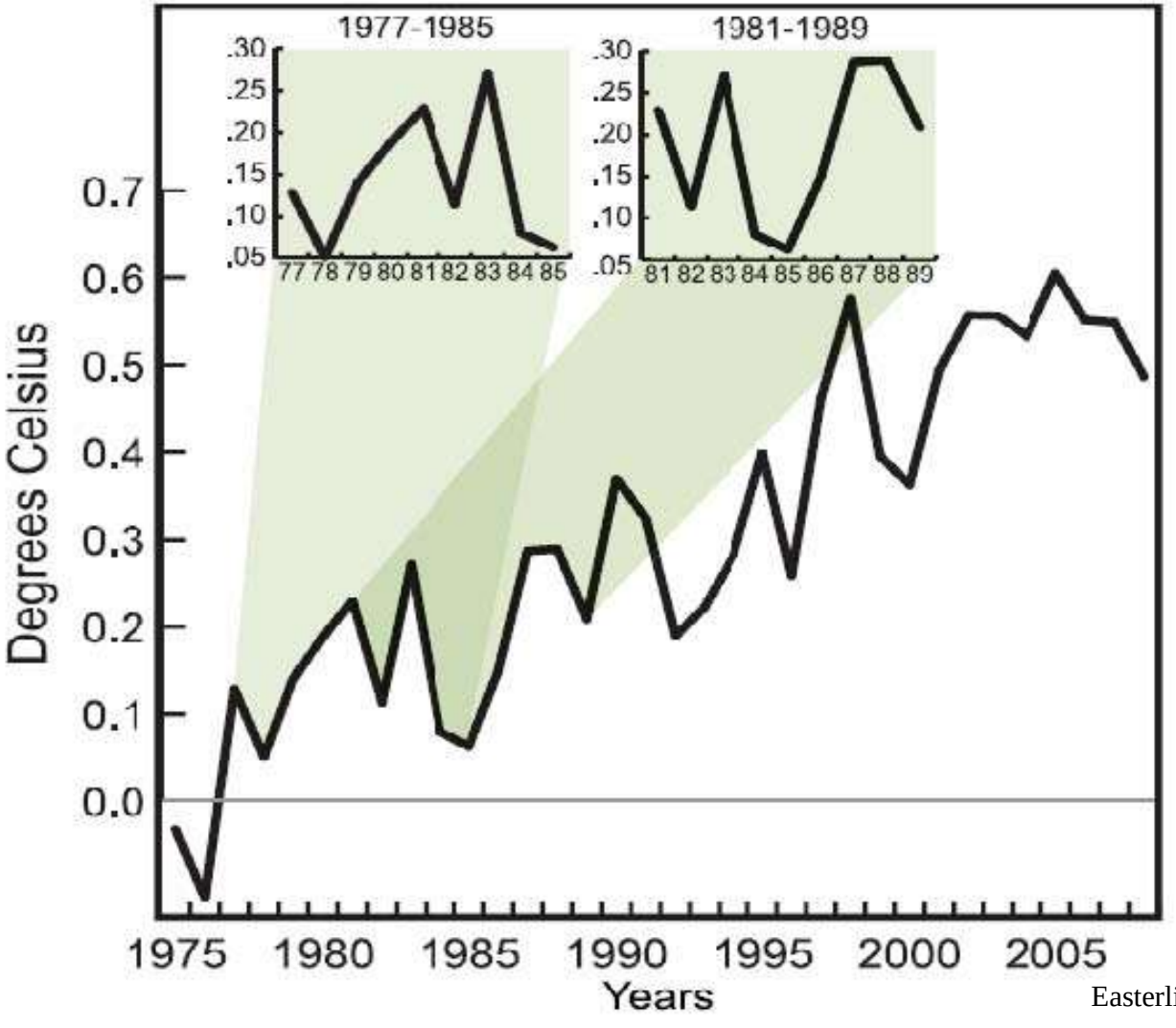
Changement de température de surface

Différence entre **2100** et **1990** IPSL-CM5A-LR



Les variations du climat sont elle régulières?Variations et variabilité du climat

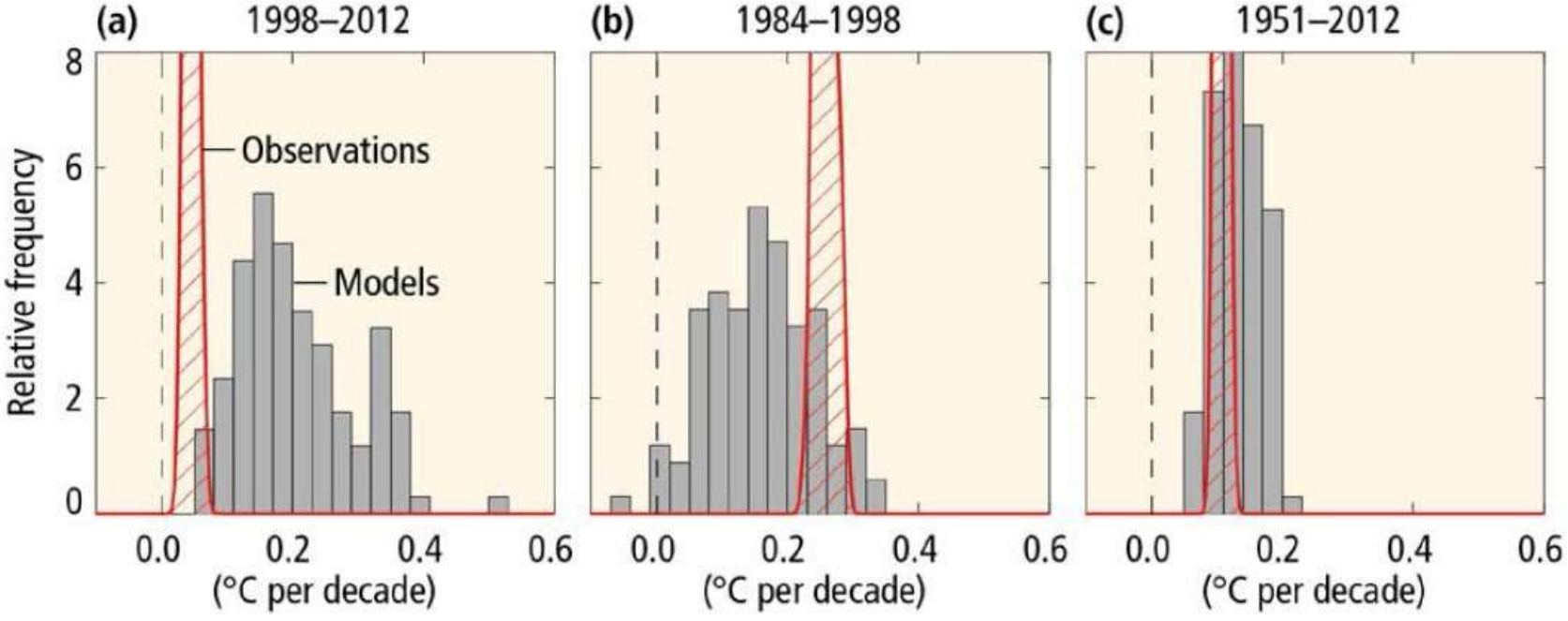
Observée



Easterling and Wehner, 2009

Les variations du climat sont elle régulières?Variations et variabilité du climat

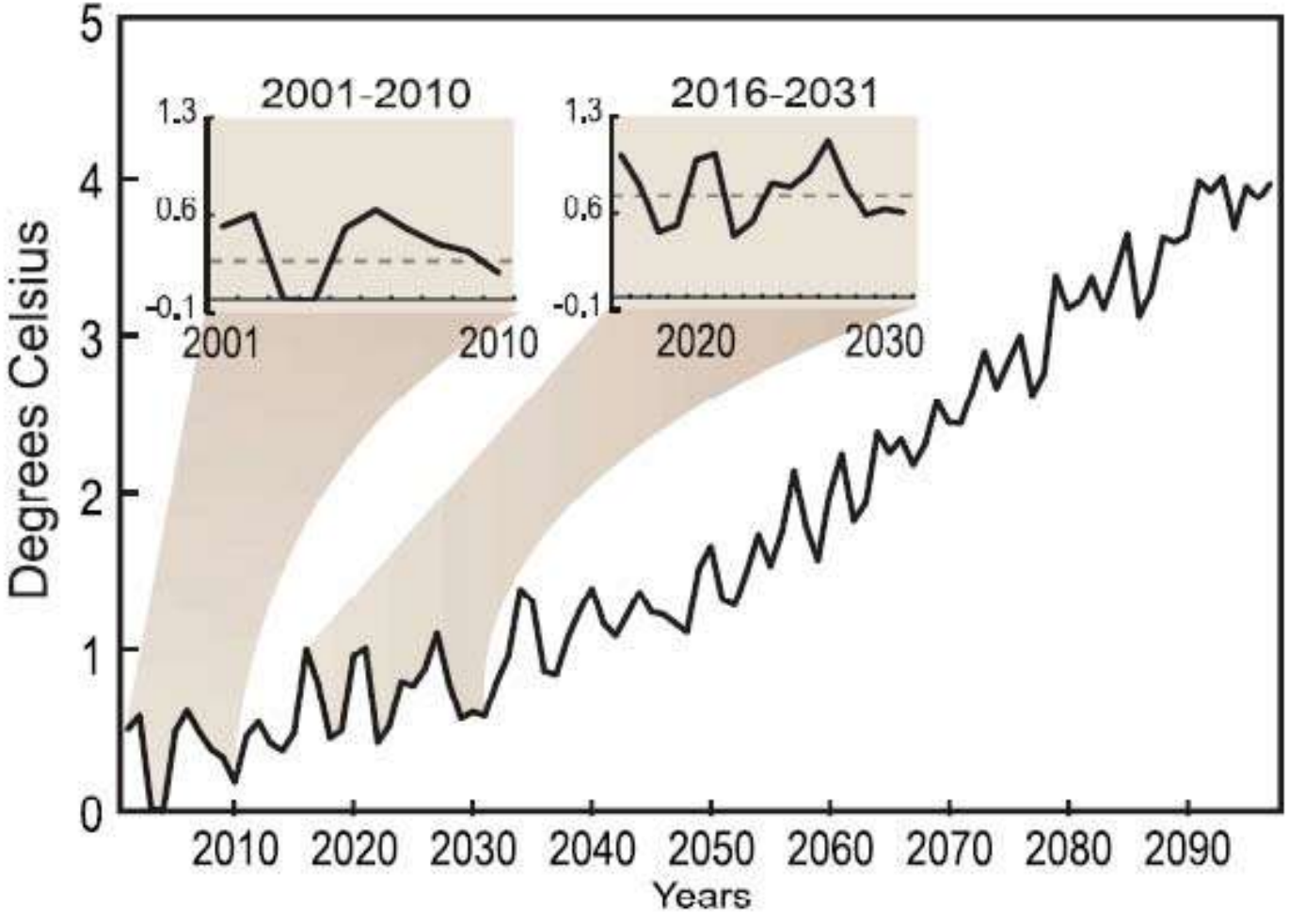
Tendances observées et simulées



[GIEC, 201

Les variations du climat sont elle régulières?Variations et variabilité du climat

Simulations



Easterling and Wehner, 2009

Conclusions

- L'effet de serre est un phénomène physique bien compris,mais compliqué... est très mal nommé
- Lorsque l'on modifie le CO2, on modifie l'effet de serre... mais aussi tout le climat (vapeur d'eau, nuage, océan...), ce quimodifie le bilan énergétique (rétroaction).
- L'accroissement de la température globale et le rôle dominantdes activités humaines sont maintenant bien établis, compris
- Les questions relatives aux changements climatiquesévoluent: passage de l'alerte à la quantification, la descriptionet l'anticipation des risques associés
- Il y a un saut d'ordre de grandeurs sur les exigences vis-à-visdes modèles climatiques. Importance de la représentation des processus et de la compréhension des phénomènes climatiques

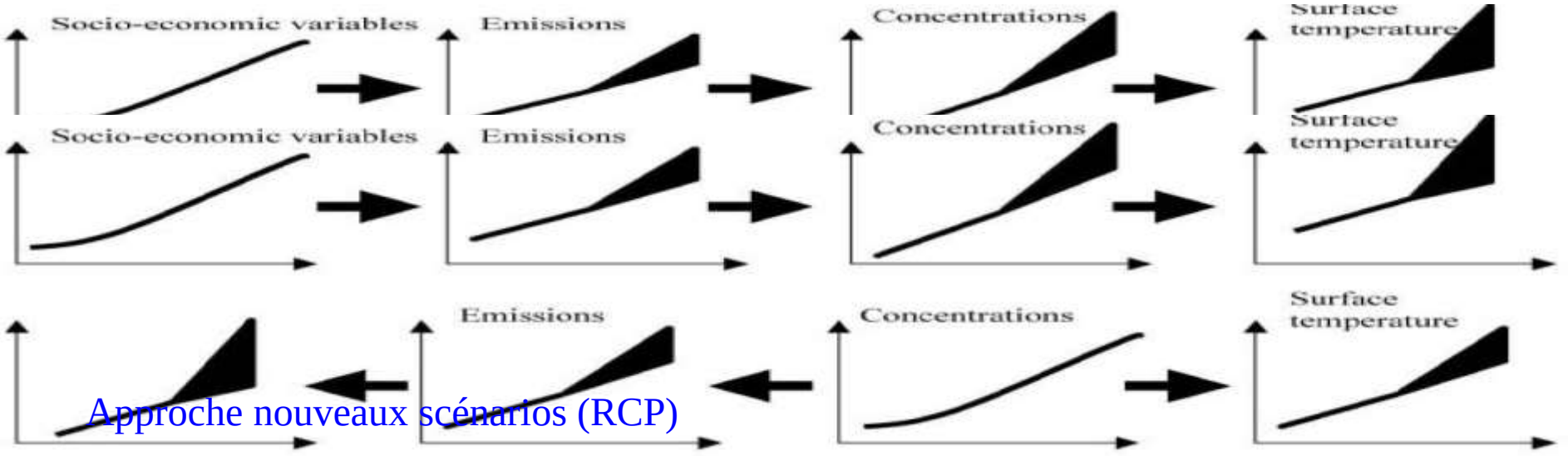
- Plus on s'intéresse aux phénomènes régionaux, aux courtes échelles de temps (décennies) ou aux phénomènes extrêmes,plus les incertitudes et la variabilité naturelle deviennentimportants

Merci de votre attention

Les projections futures

Explorations des futurs possibles. Repose sur des scénarios d'émissions ou de concentration des gaz à effet de serre et précurseurs des aérosols

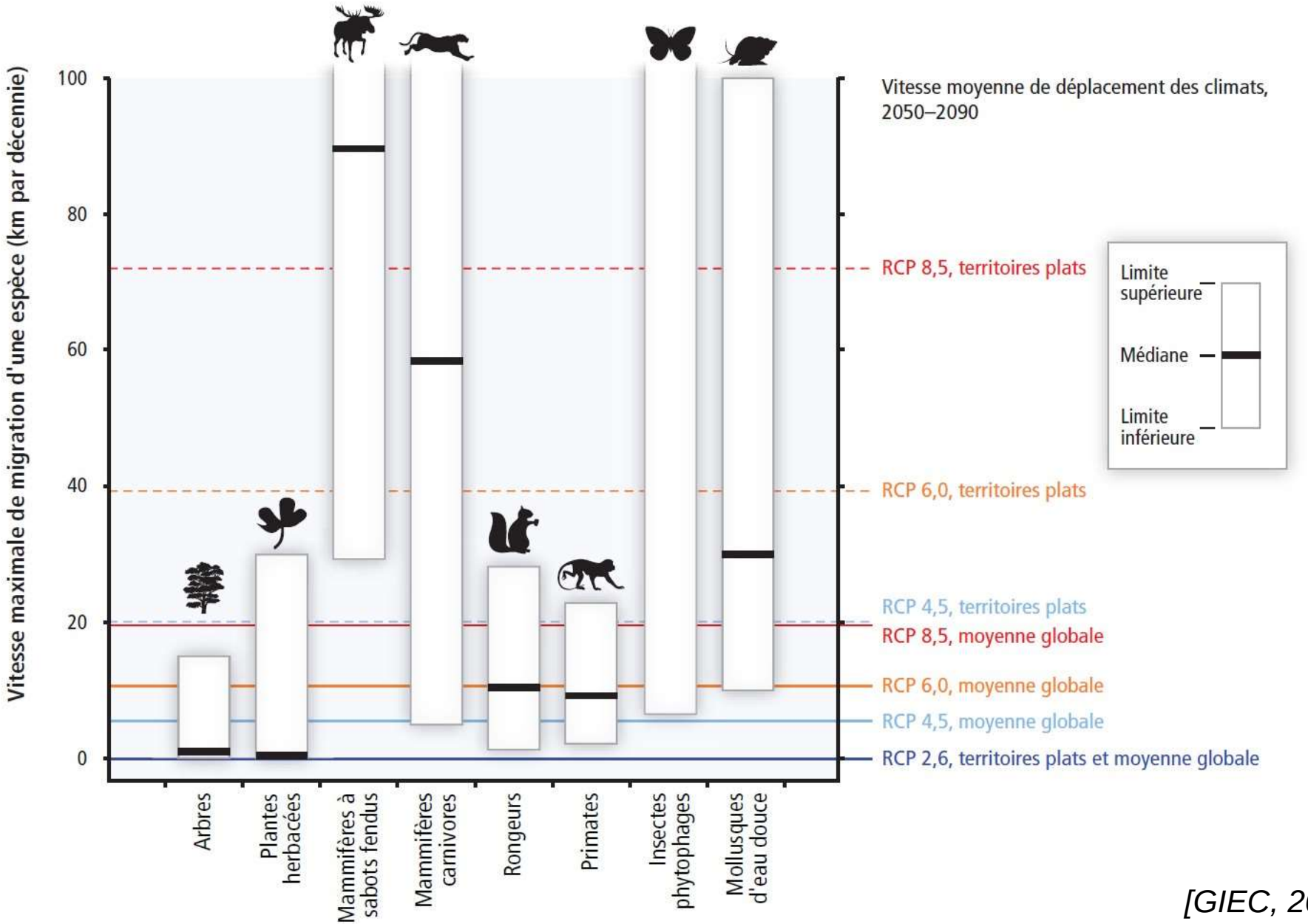
Approche anciens scénarios (SRES)



Approche nouveaux scénarios (RCP)

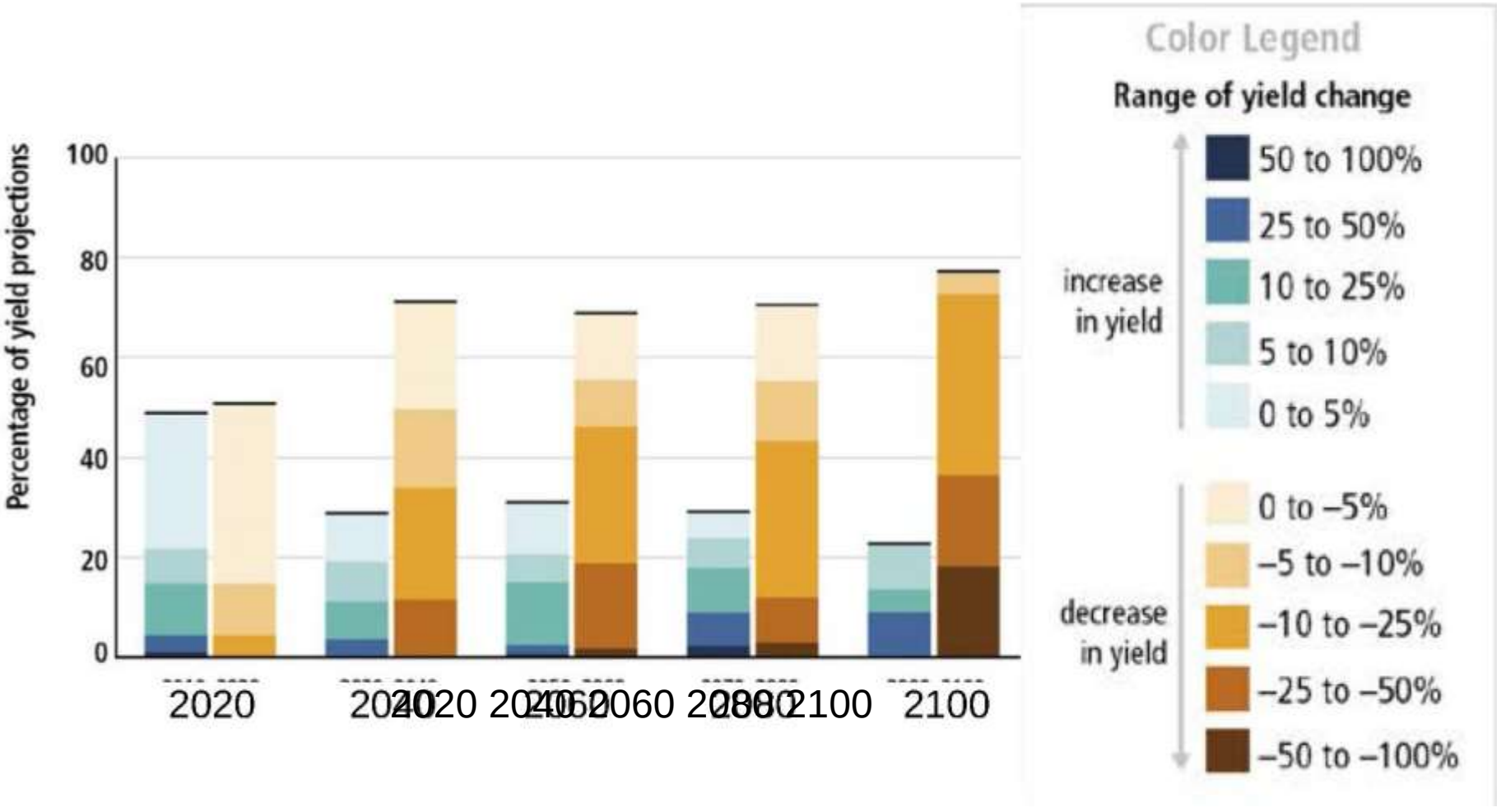
[Moss et al., IPCC, 2008]

Vitesse de migration et de « déplacement » des cmimats



[GIEC, 201

Variation du rendement de l'agriculture

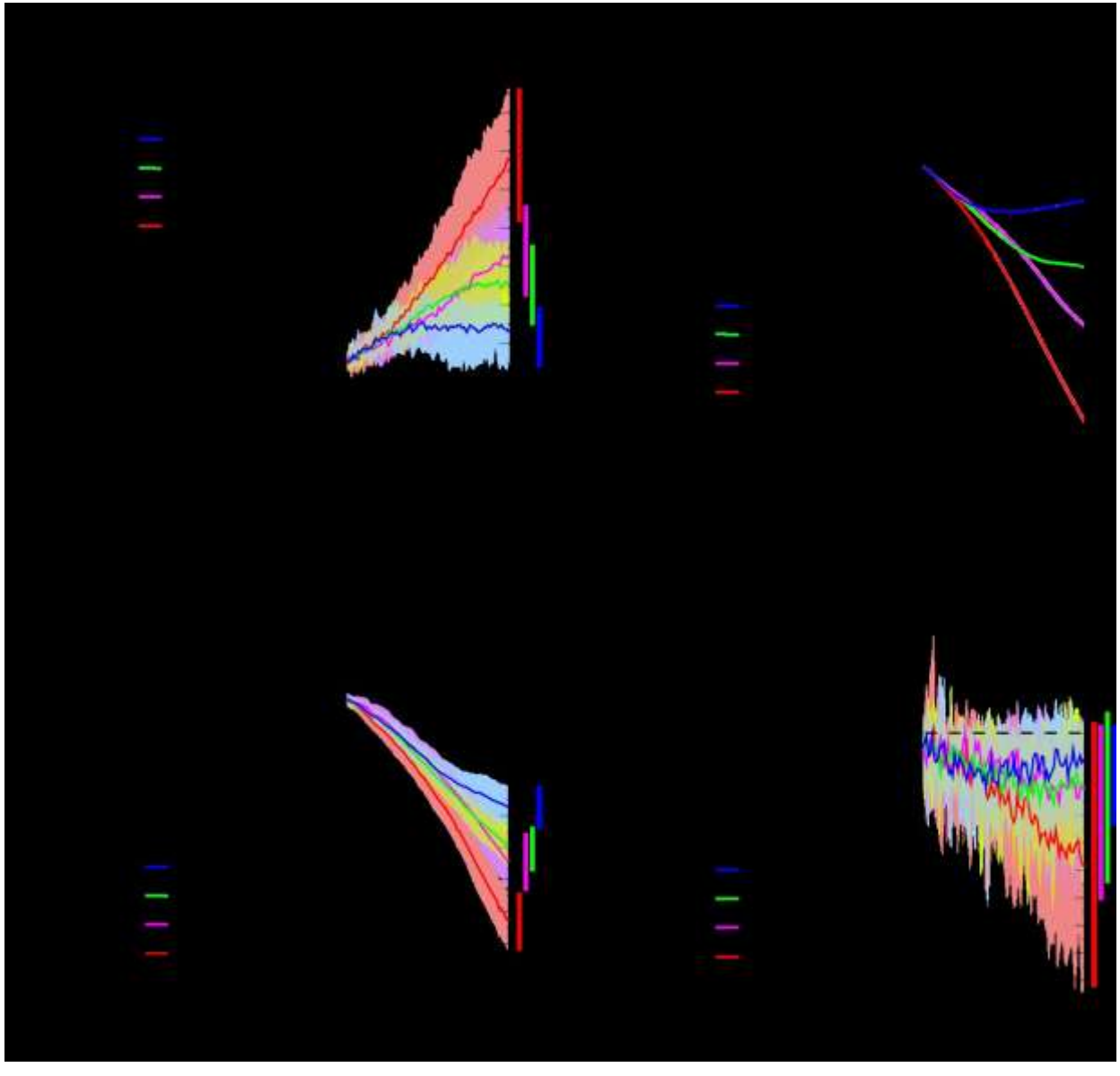


[GIEC, 201

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

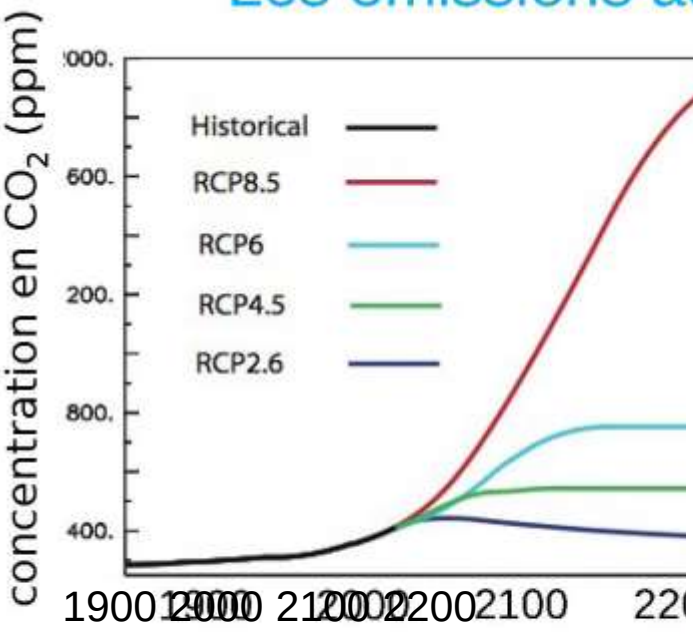
Des eaux de surface plus chaudes… et plus acides

Moins d'oxygène et moins de production primaire



Bopp et al. 2014

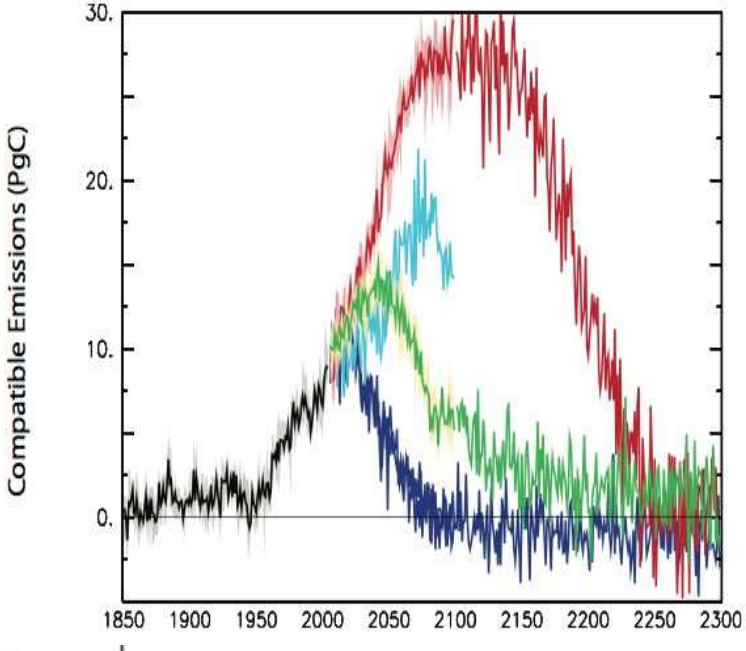
Les émissions autorisées de ec IPSL-CM5

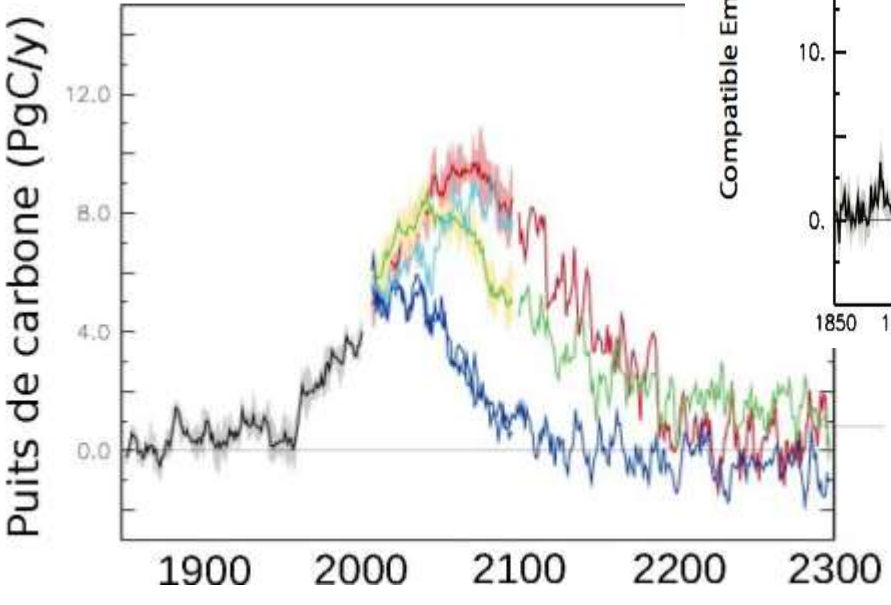


Historique

RCP4.5

RCP2.6





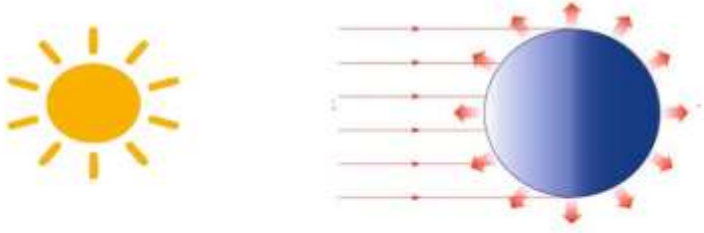
RCP8.5 RCP6.0

Le système climatique

Objet d'études: climat actuel, variabilité interne, variations passées et futures

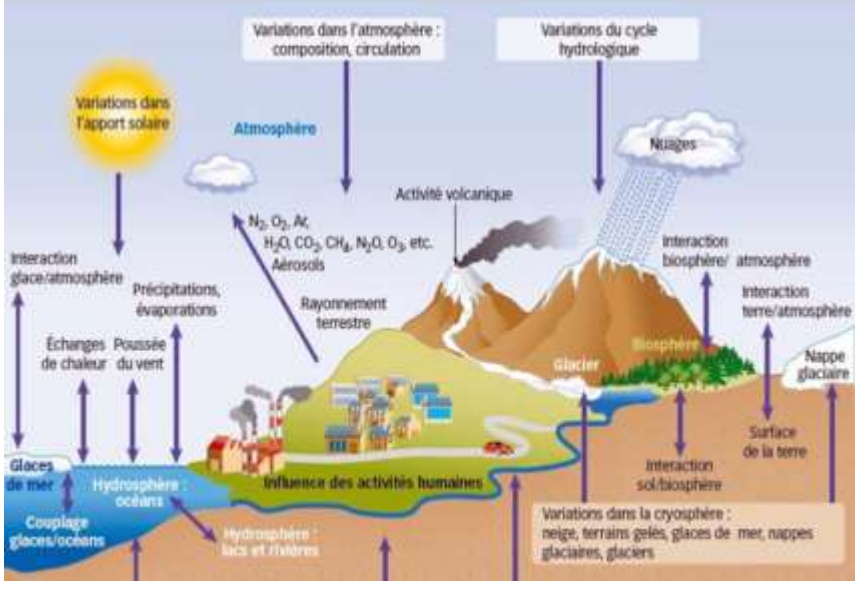
Système thermodynamique ouvert en pseudo équilibre, en général sans aucun rappel

=> conservation de l'énergie

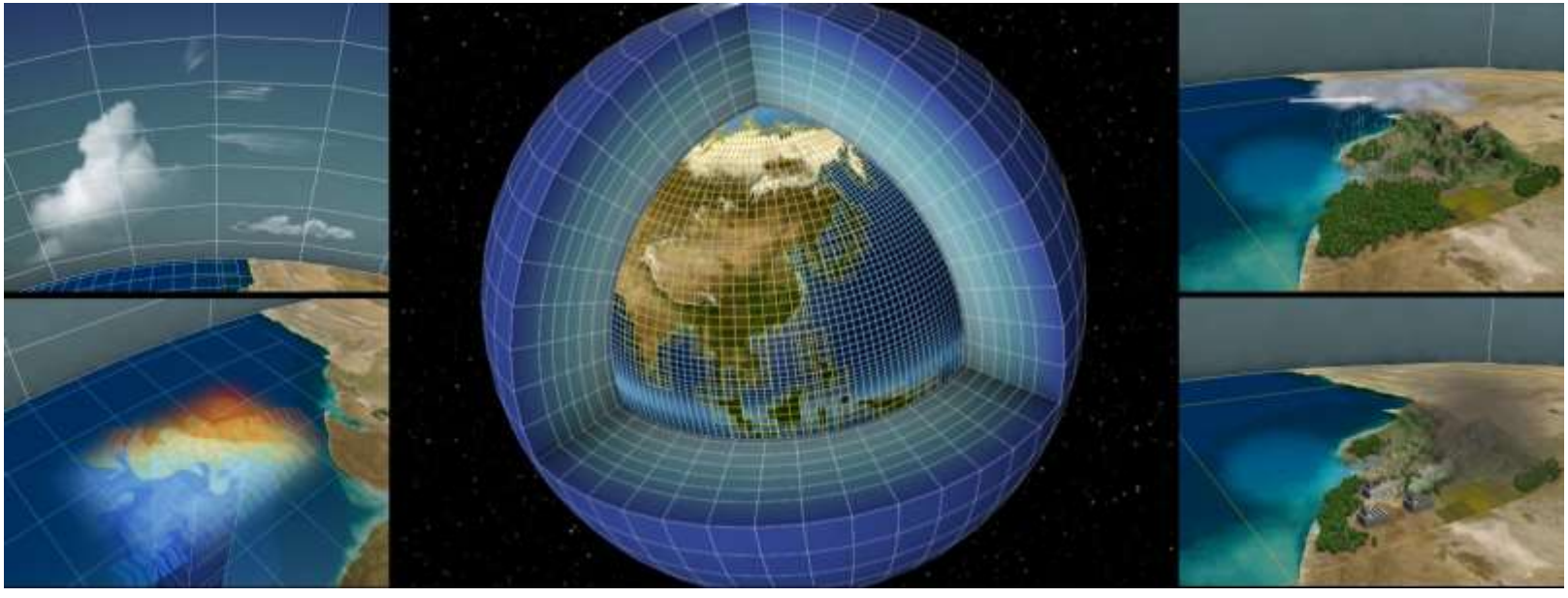


Système

- Multi-compartiments
- Multi-processus (physique, biogéochilique...)
- Multi-échelle de temps (qqs minutes à plusieurs millions d'années)



Modèle de climat
(Modèle de circulation générale)

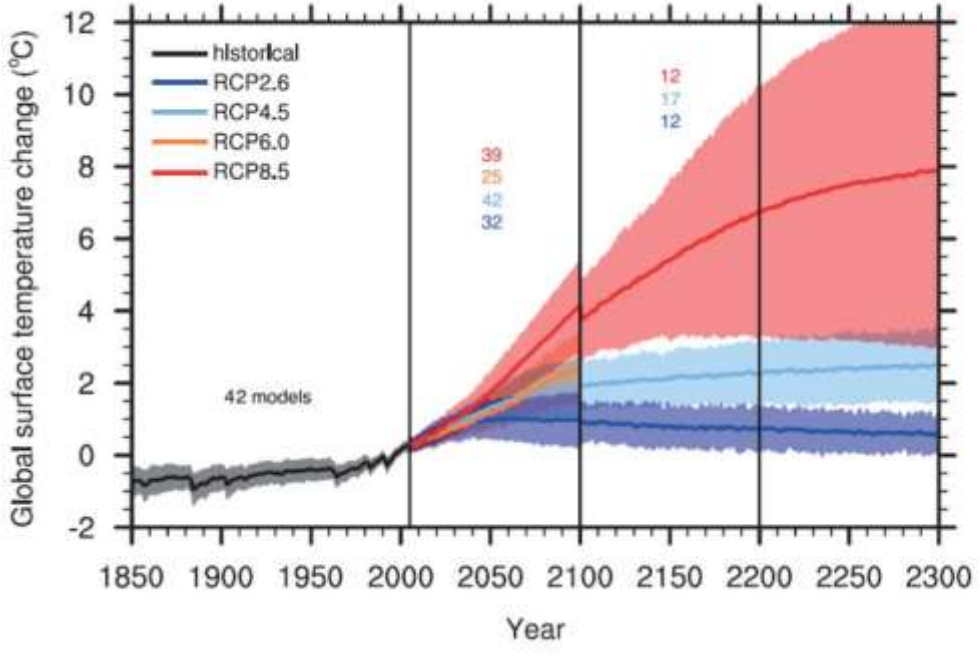


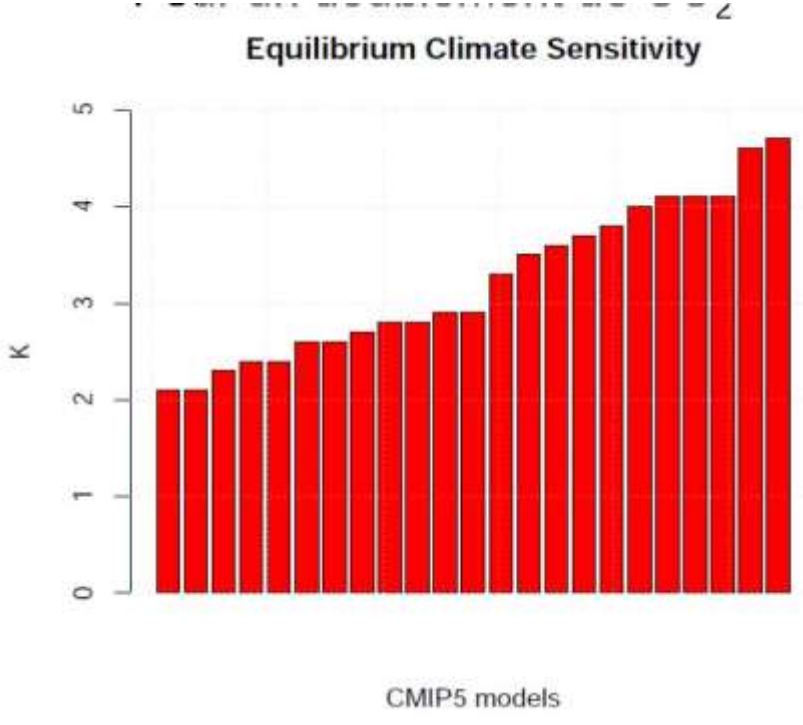
Images issues d'un film présentant la modélisation du climat. Copyright CEA

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

Amplitude du réchauffement Sensibilité climatique

Accroissement de la moyenne des températures de surface Pour des

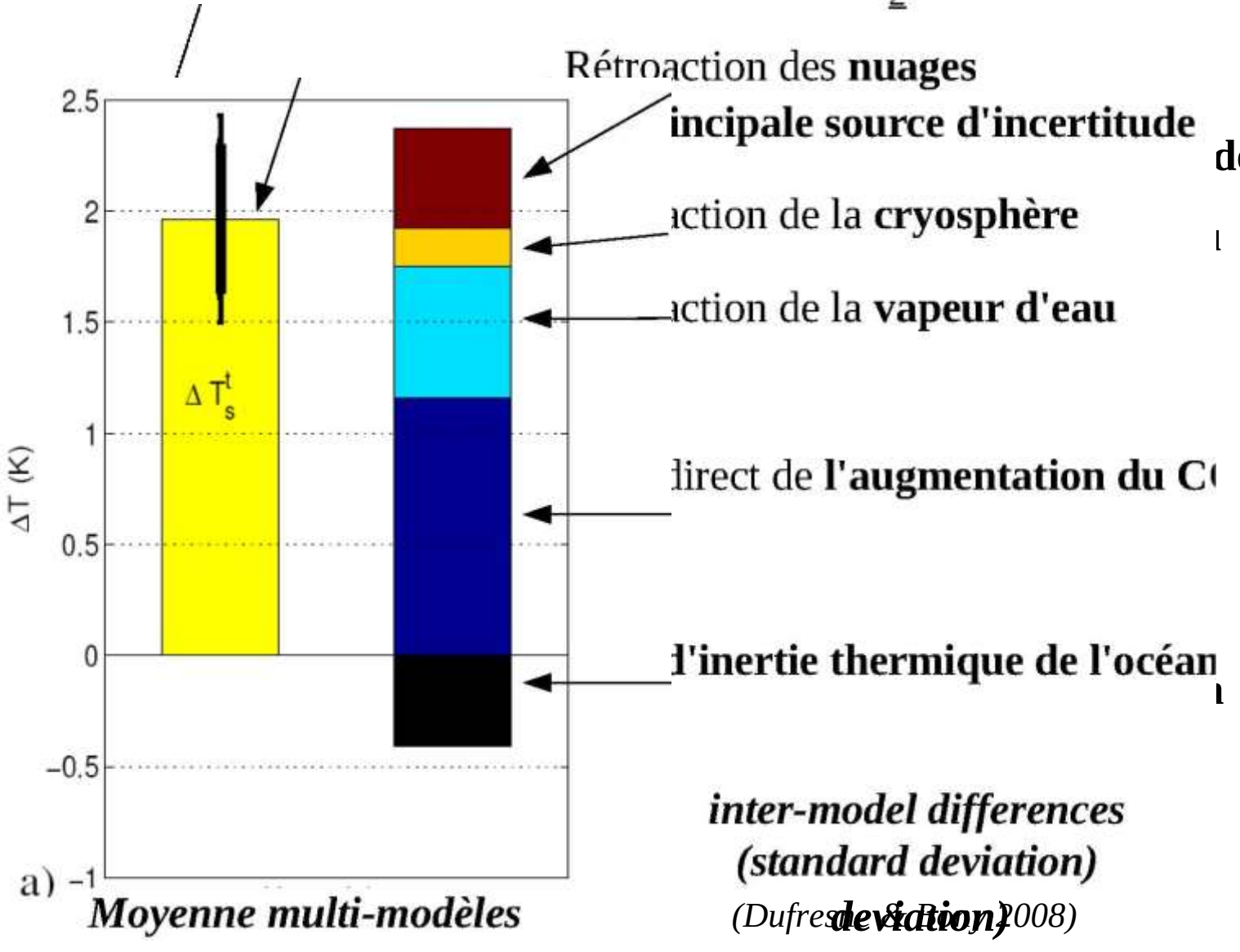




[GIEC, 201

Accroissement de CO_2 et température

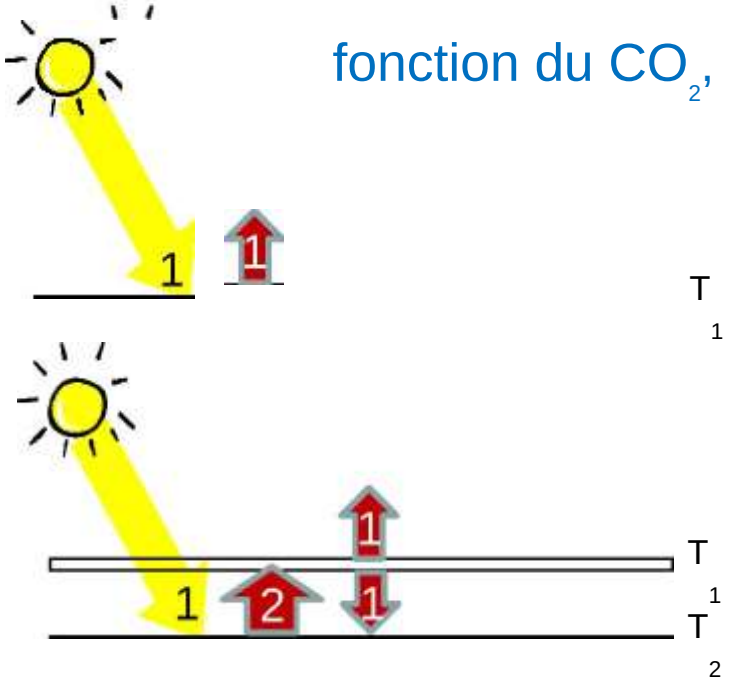
Réchauffement global pour un doublement de CO_2 en 70 ans



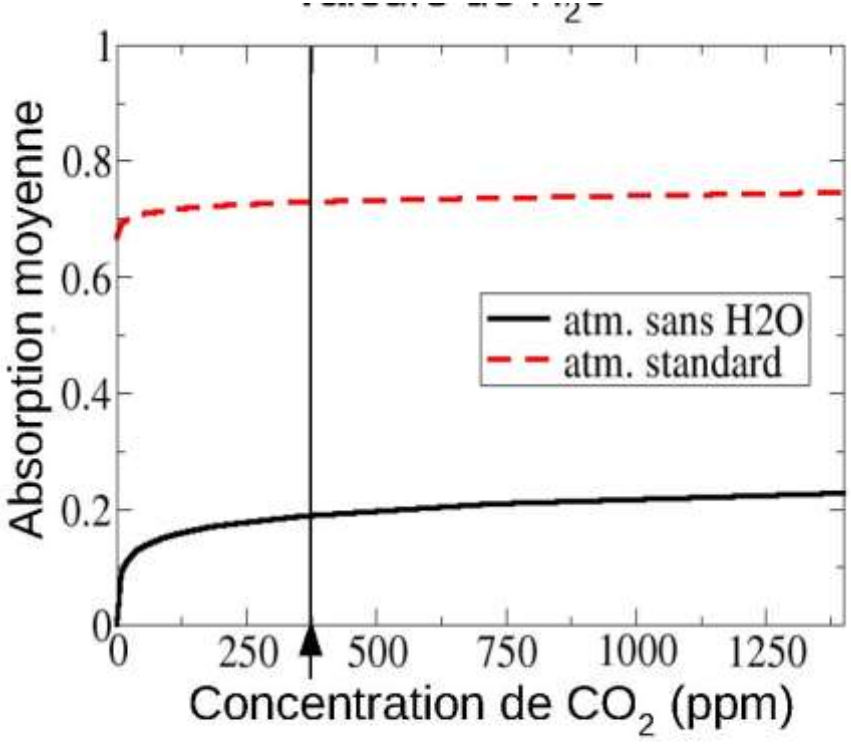
(Dufresne & Bony, 2008)

Accroissement de CO_2 et effet de serre

L'analogie de l'effet de serre



Absorption de l'atmosphère en fonction du CO_2, pour différentes valeurs de H_20

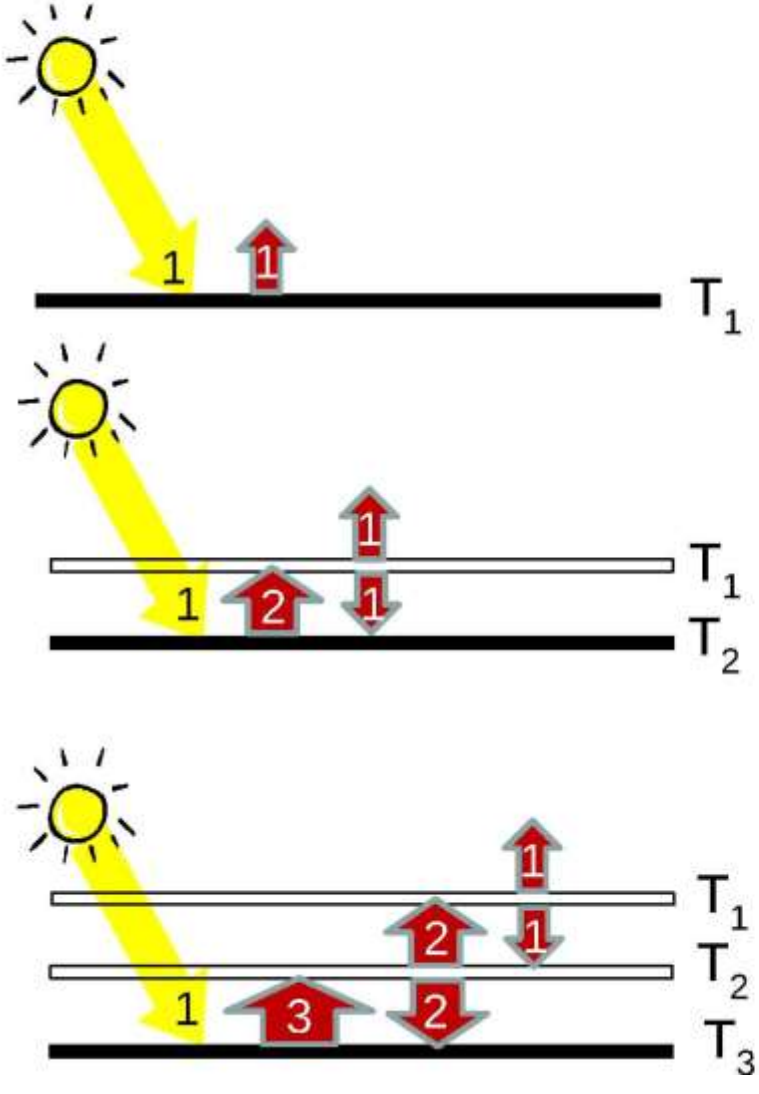


A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO_2?

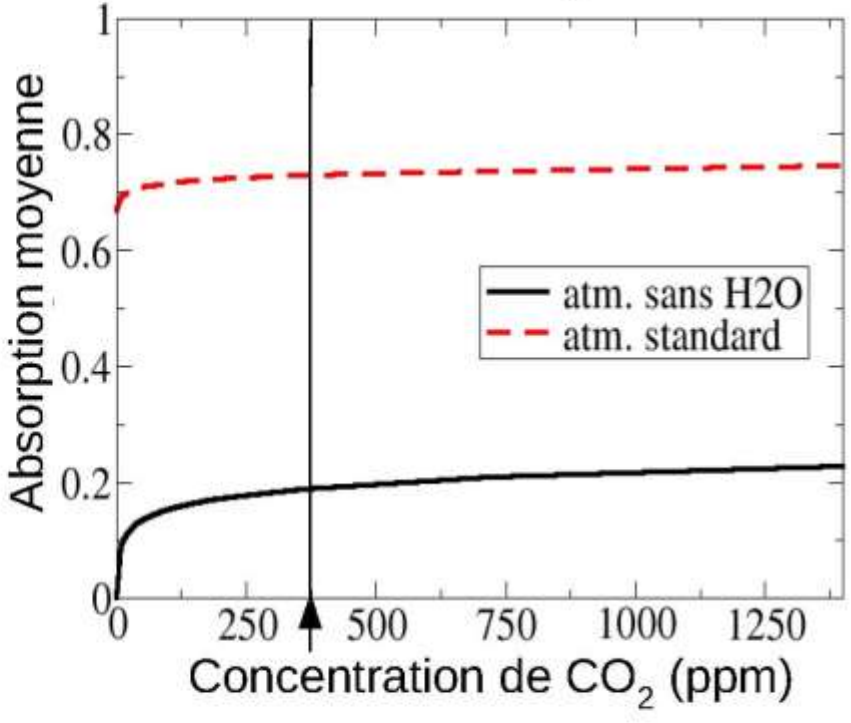
(Dufresne Treiner 20

Accroissement de CO_2 et effet de serre

L'analogie de l'effet de serre



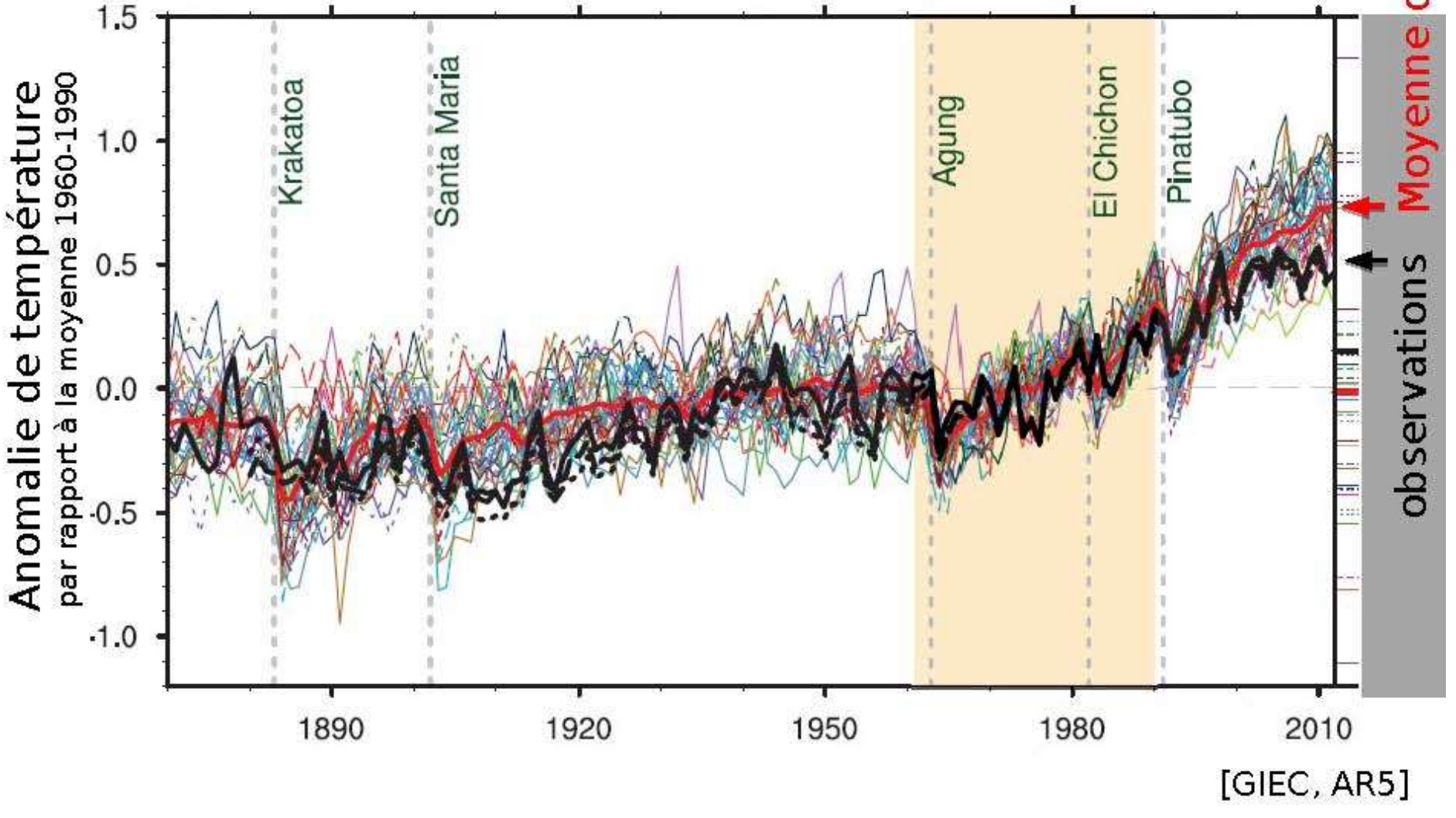
Absorption de l'atmosphère en fonction du CO_2, pour différentes valeurs de H_20



A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO_2?

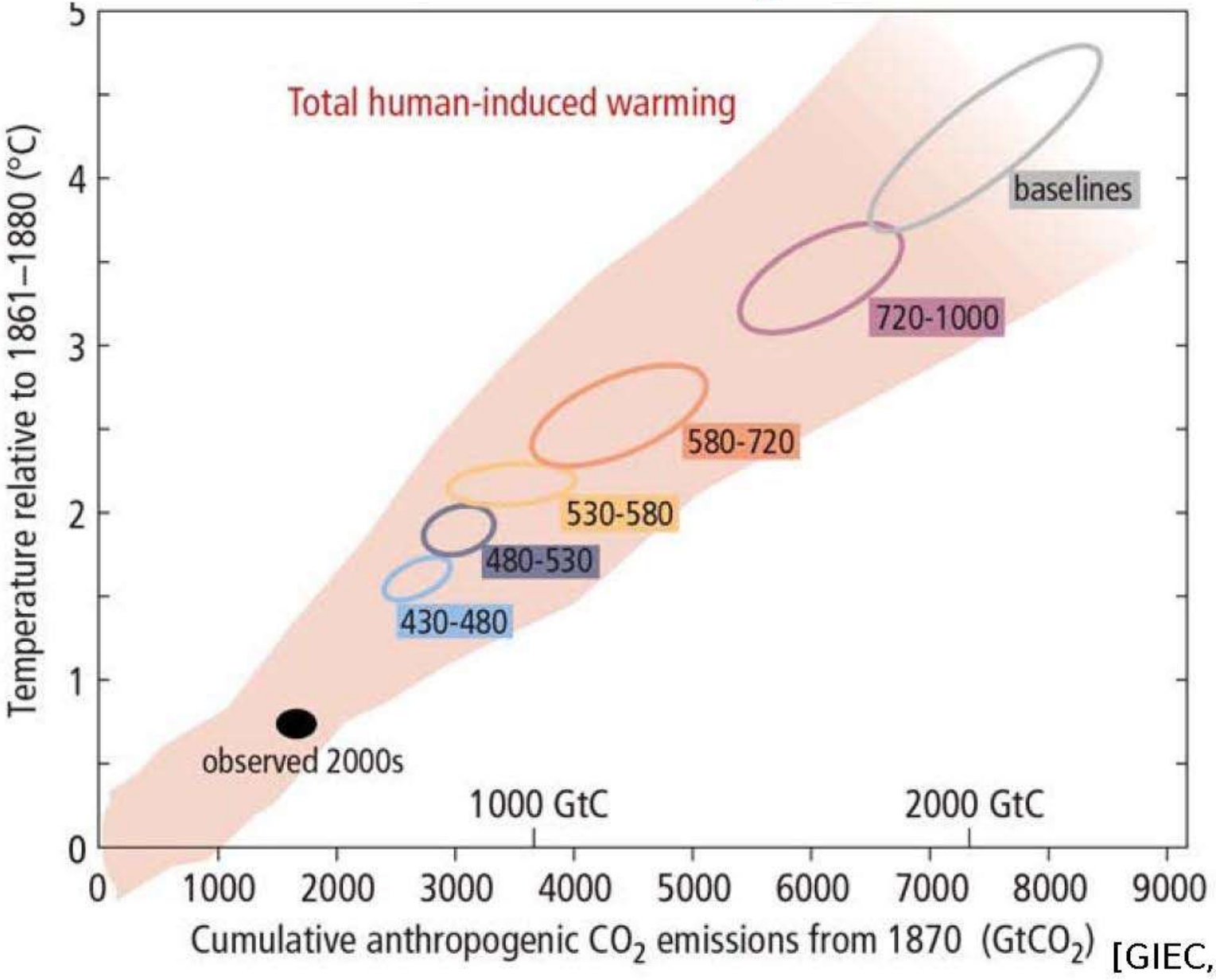
NON! (Dufresne Treiner 20

Simulation de l'évolution récente du climat



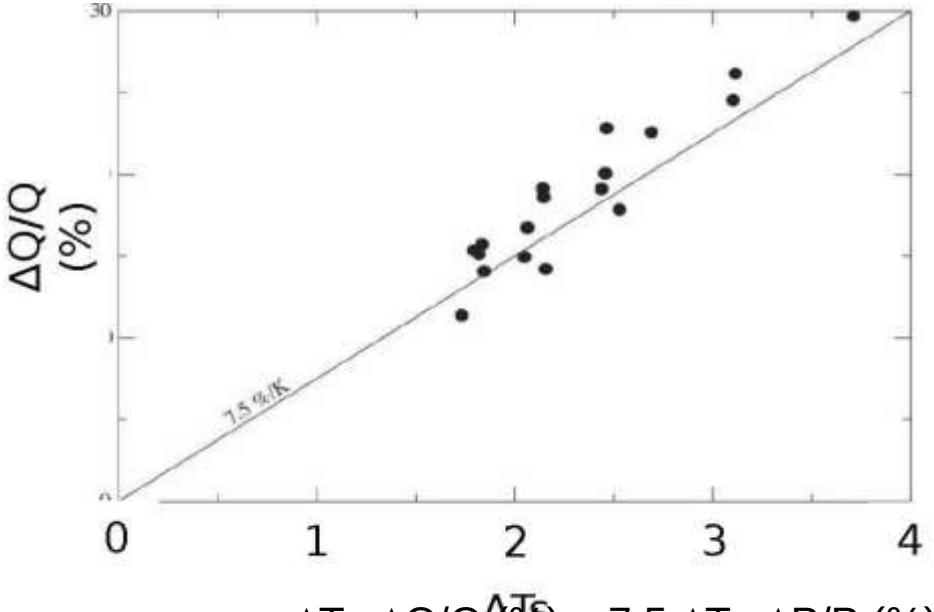
[GIEC, AR5]

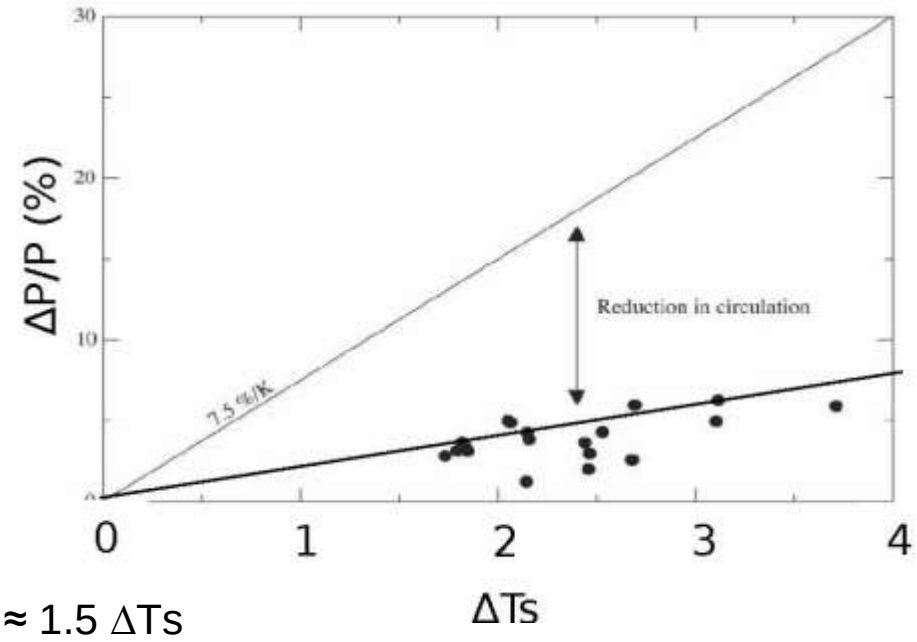
Accroissement de température versus les émissions cumulées de CO_2.



[GIEC, AR5]

Les changements de précipitations dus à l'accroissement de température



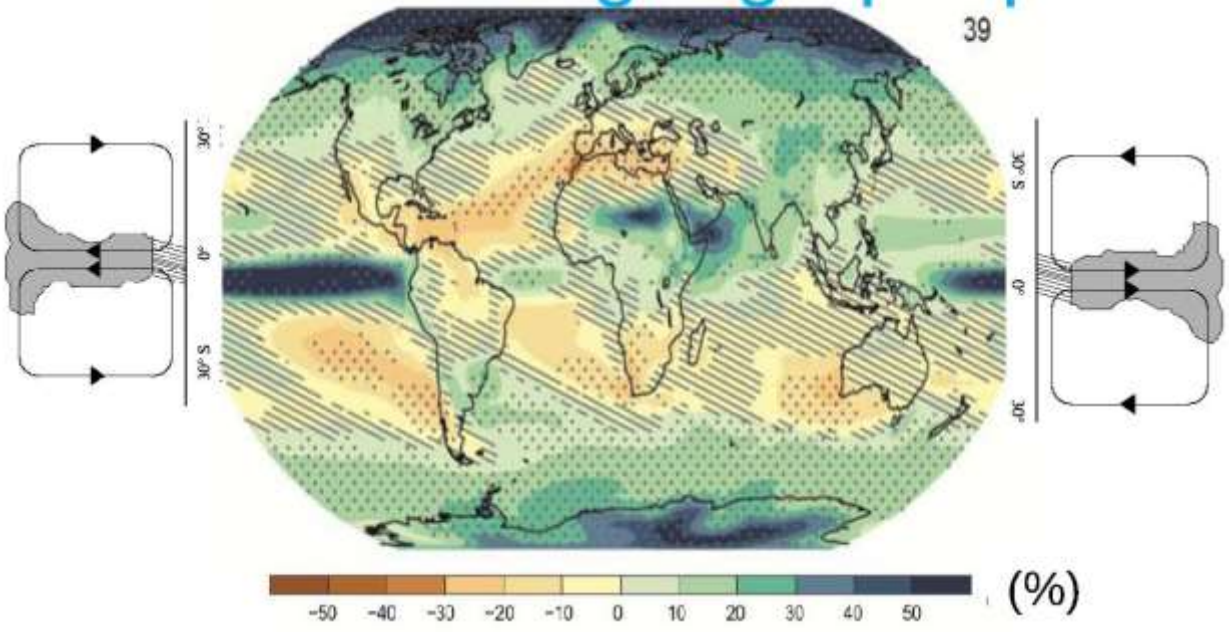


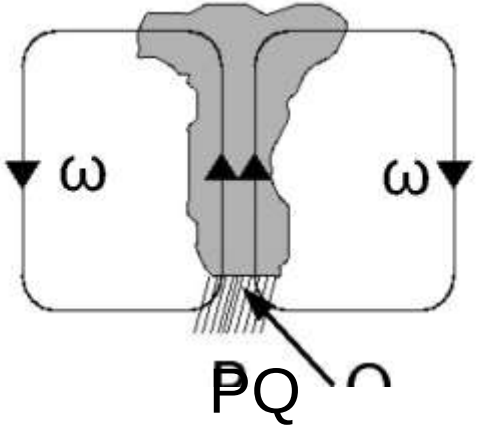
$\Delta Ts\ \Delta Q/Q\ (\%) \approx 7.5\ \Delta Ts\ \Delta P/P\ (\%) \approx 1.5\ \Delta Ts$

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

(Vecchi & Soden, 2007)

Changements des précipitations: distribution géographique





Variation des

précipitations $\Delta P \approx \omega\Delta$

Q+

thermodynamique dynamique

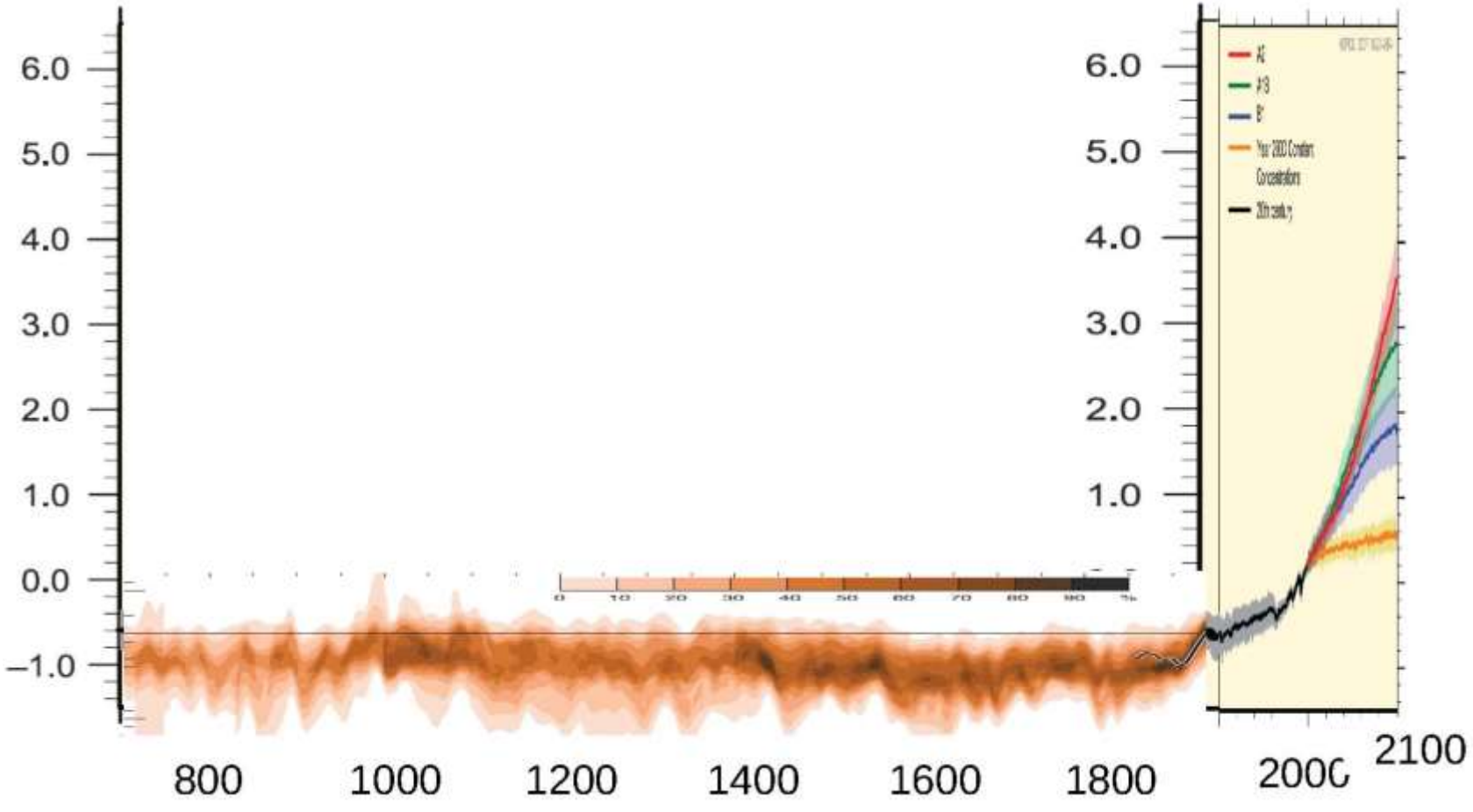
Q

Δω

Variation

Variation

Amplitude des variations de la température globale



GIEC, 2007

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 paraitre 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_blanc_escrime.pdf

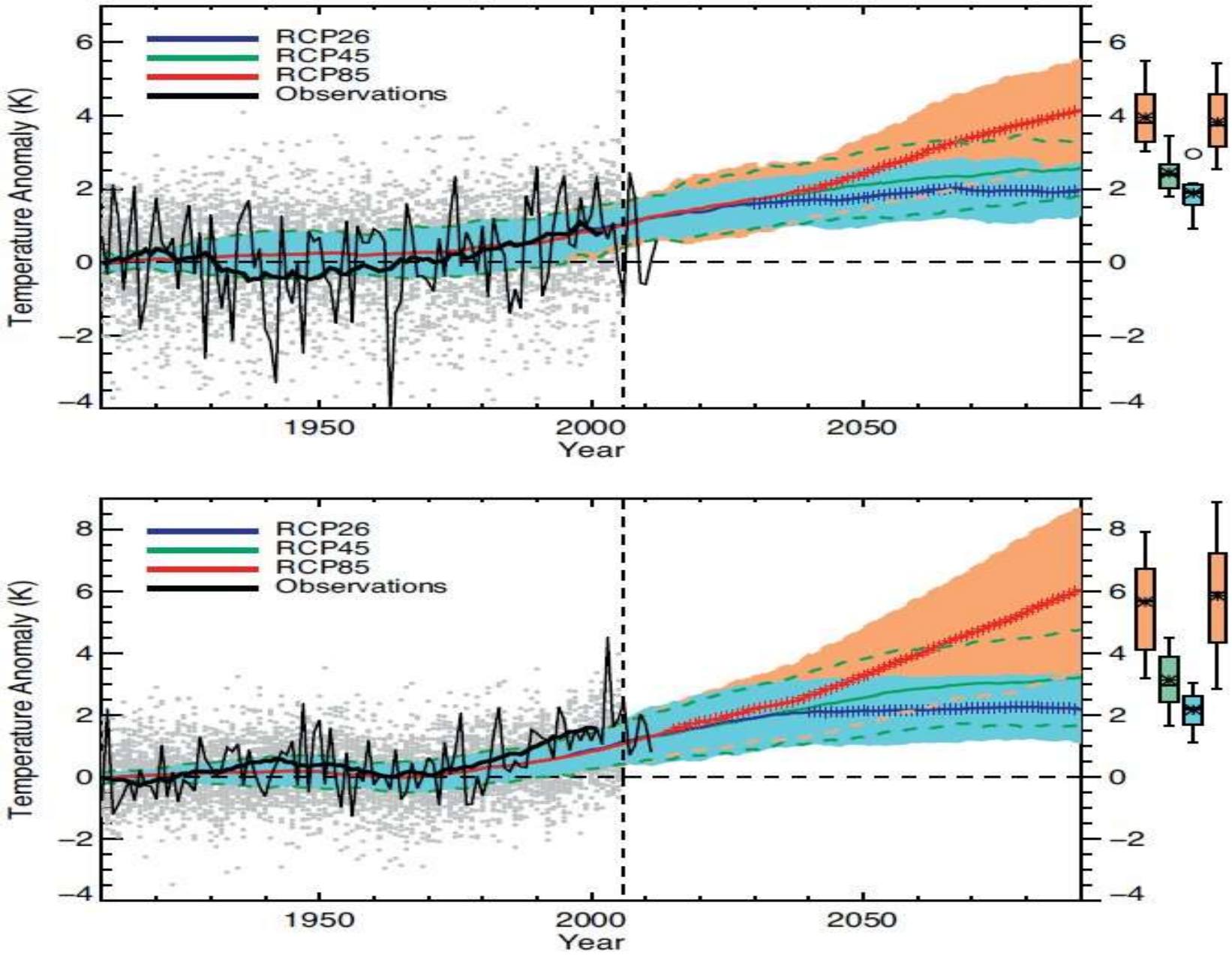
Web:

- GIEC: www.ipcc.ch
- Le climat en questions: http://www.climat-en-questions.fr/
- ONERC http://www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation-et-missions.html

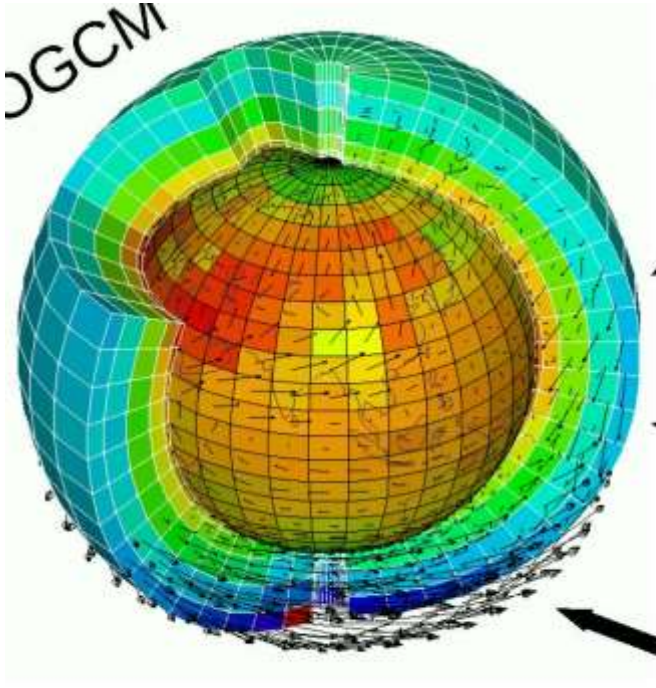
DVD:

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

Evolution de la température en France

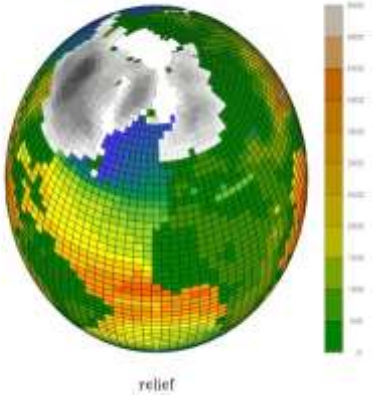


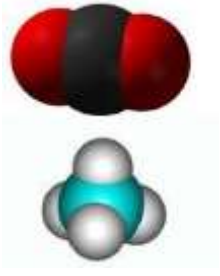
Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire



Calo glac

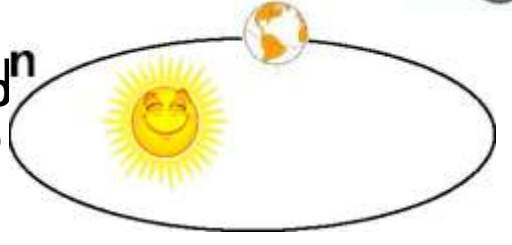
Calottes glaciaires





atmosphérique CO2: 185 ppm CH4: 350 ppb...

Insolatio 21ky BP

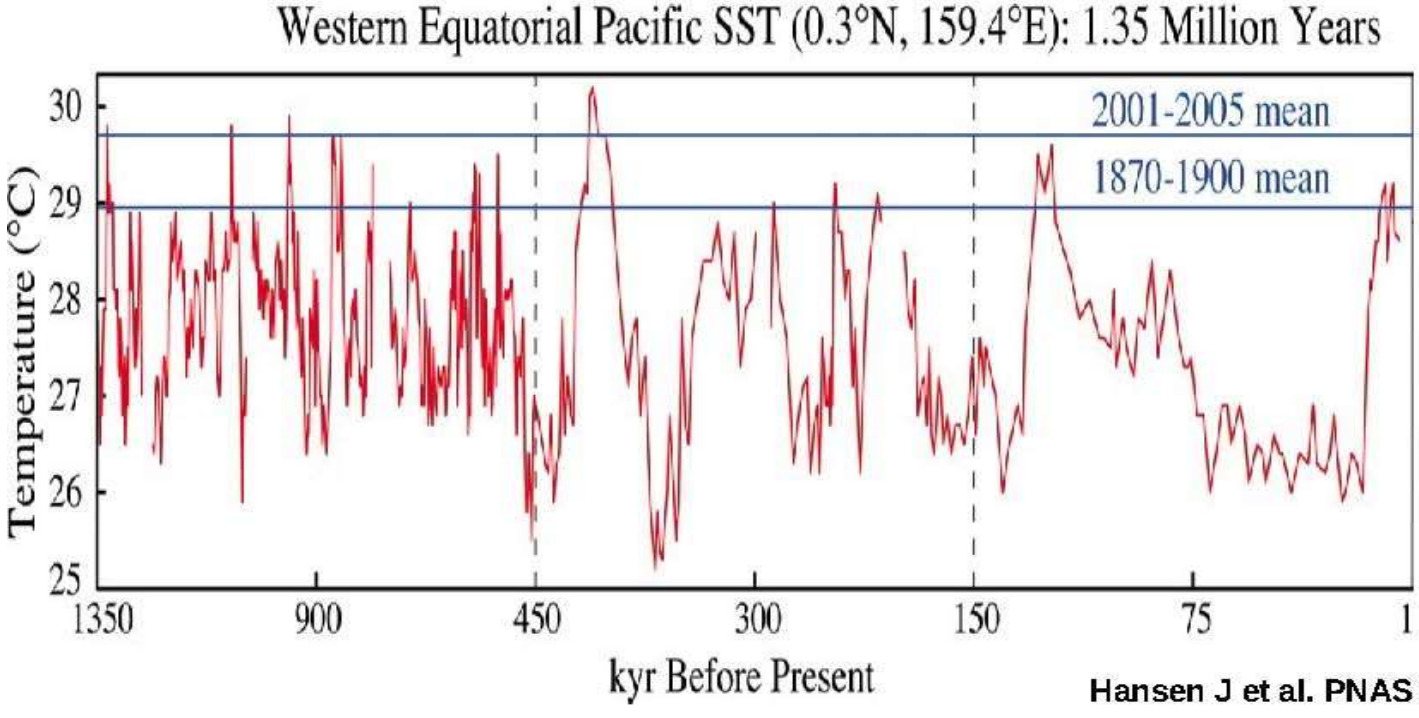


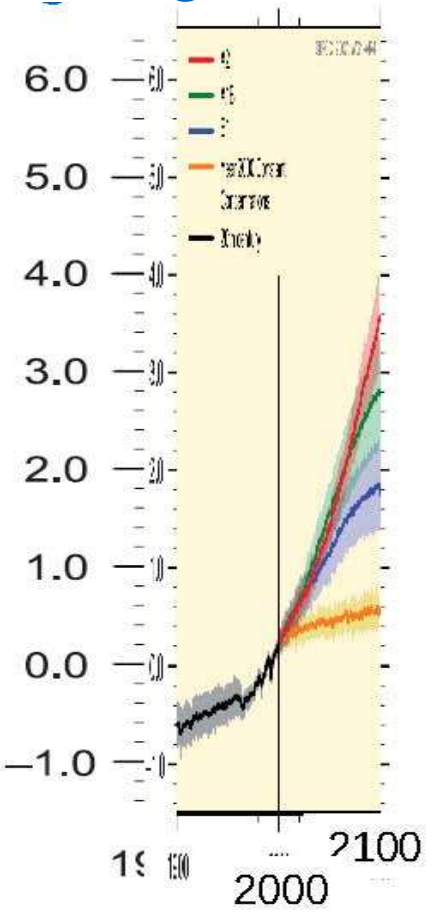
Forçage en gaz à effet de serre ~ climat futur
Autre forçage majeur: calottes glaciaire

cf. http://pmip3.lsce.ipsl

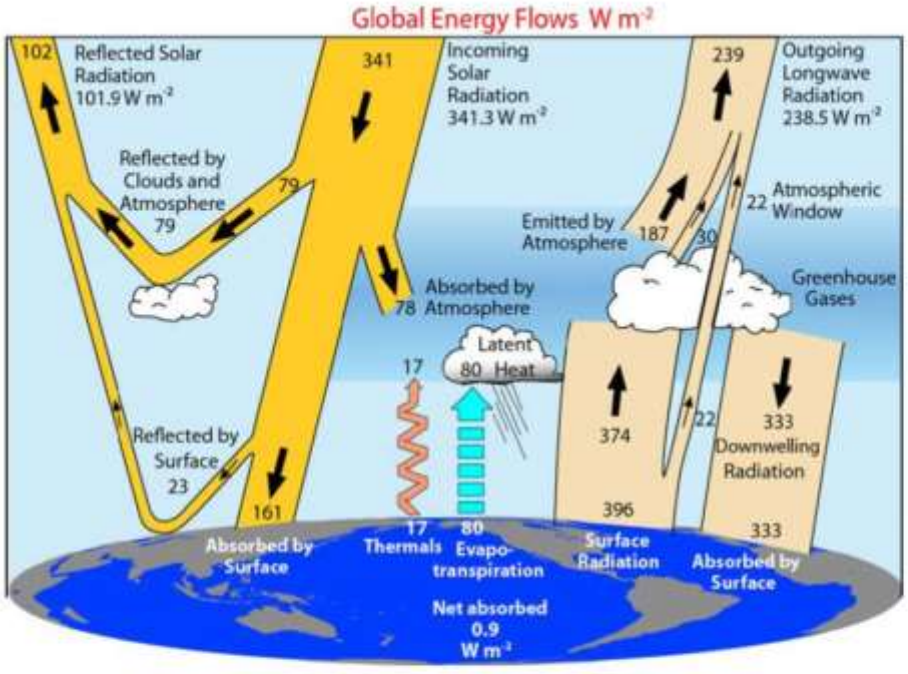
Amplitude des variations de la température globale

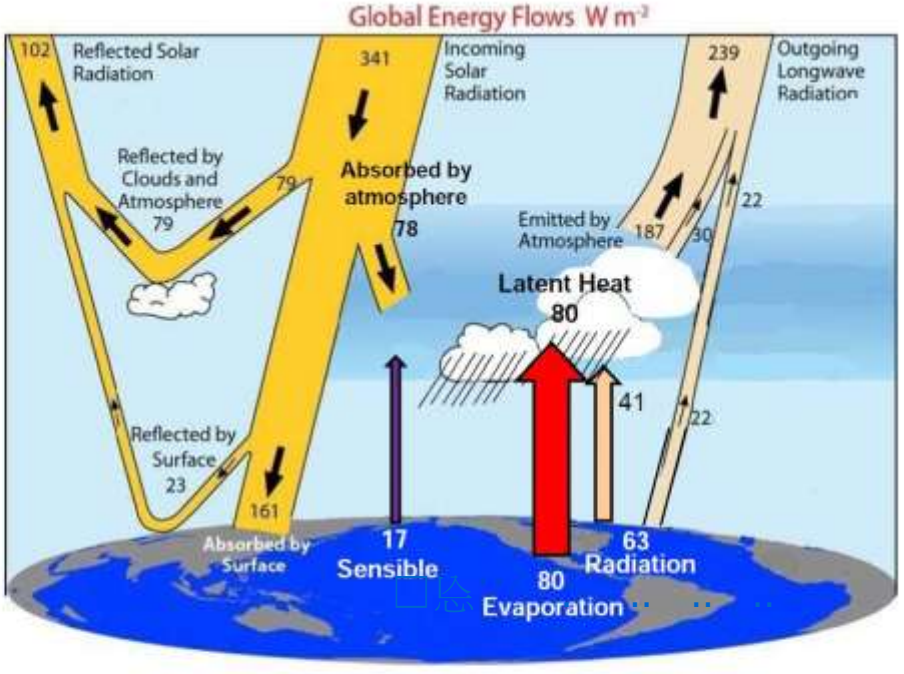
!! Variations de la température équatoriale vs variation de la température globale !!





Hansen J et al. PNAS 2006;103:14288-14293


Global Energy Flows W m-2
102
Reflected Solar Radiation 101.9 W m-2
341
Incoming Solar Radiation 341.3 W m-2
239
Outgoing Longwave Radiation 238.5 W m-2
Reflected by Clouds and Atmosphere 79
79
Emitted by Atmosphere
187
30
22 Atmospheric Window
Greenhouse Gases
Absorbed by 78 Atmosphere
Latent 80 Heat
17
374
22
333 Downwelling Radiation
Reflected by Surface 23
161
396
333
Absorbed by Surface
17 Thermals
80 Evapo-transpiration
Surface Radiation
Absorbed by Surface
Net absorbed 0.9 W m-2


Global Energy Flows W m-2
102
Reflected Solar Radiation
341
Incoming Solar Radiation
239
Outgoing Longwave Radiation
Reflected by Clouds and Atmosphere 79
79
Absorbed by atmosphere 78
Emitted by Atmosphere
187
30
22
Latent Heat 80
41
22
Reflected by Surface 23
161
Absorbed by Surface
17 Sensible
80 Evaporation
63 Radiation

Colloque AFPSVT Association pour la formation des professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre 7 juillet 2015

CLIMAT, ATMOSPHERE ET HYDROSPHERE

Enjeux contemporains, enjeux éducatifs

Comment enseigner le bilan radiatif de la Terre?

Philippe COLIN

université PARIS DIDEROT PARIS 7

Ldar Laboratoire de Didactique André Revuz

UNIVERSITÉ D'ARTOIS

espe École supérieure du professorat et de l'éducation Académie de Lille

Lille Nord de France

Plan de la présentation

- Une approche centrée sur le contenu de la physique mis en jeu
- Quelques points clé pour une reconstruction
- Une illustration des difficultés à partir de schémas
- Un large éventail de difficultés pour les élèves
- Des points de vue d'enseignants : les modèles pour enseigner l'effet de serre en question
- Conclusion

Deux approches non exclusives de l'enseignement de l'effet de serre

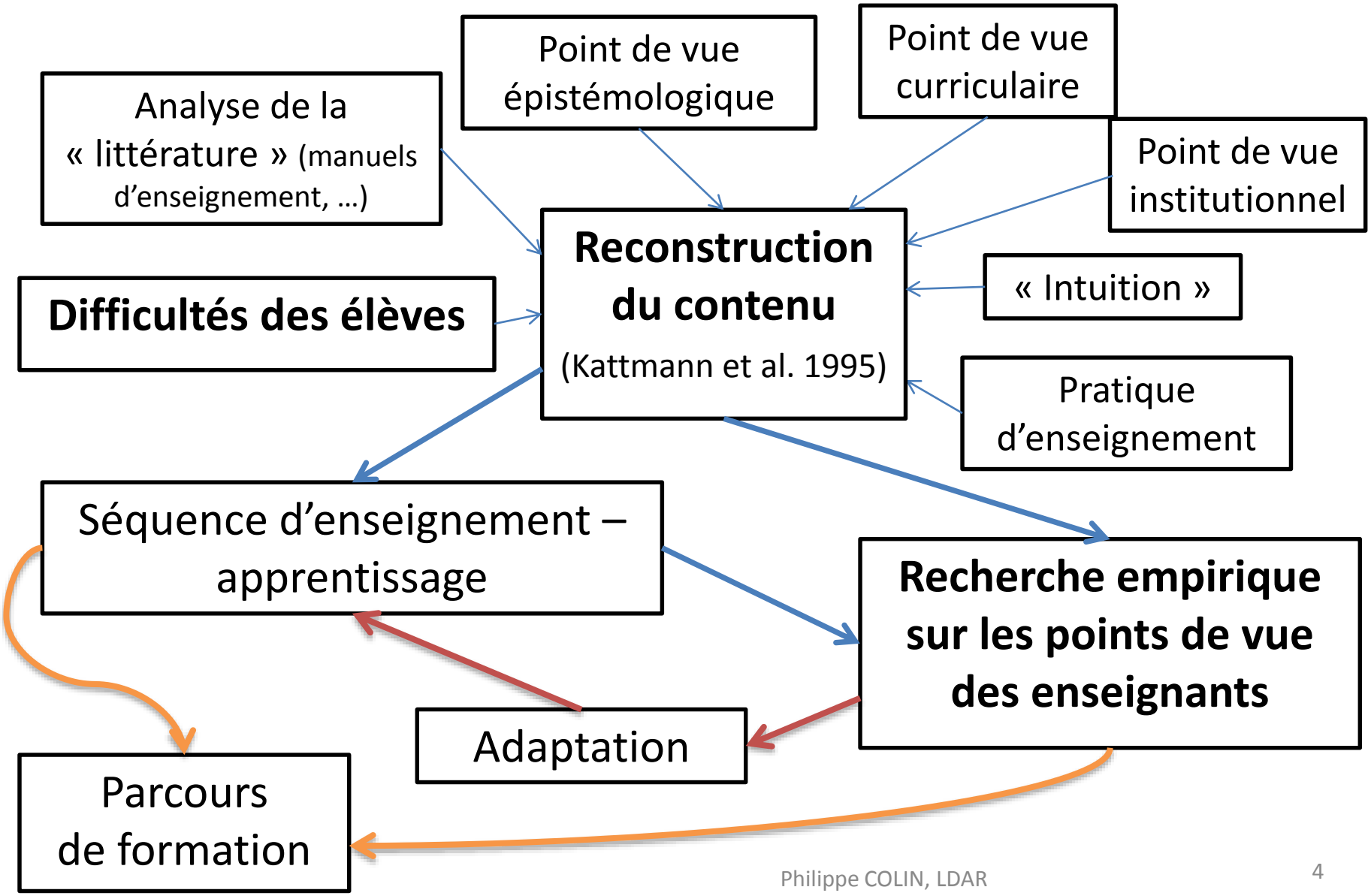
- Approche centrée sur le contenu de la physique

- Approche "Questions Socialement Vives" (QSV) (Levinson, 2006) avec médiatisation très forte du réchauffement climatique

Un grand nombre d'études sur les difficultés liées à l'enseignement-apprentissage du réchauffement climatique (Ekborg & Areskoug, 2006)

mais peu d'études sur celui de l'effet de serre naturel (Besson 2010 ; Colin et Tran Tat 2012, Colin 2013)

La construction d'une séquence d'enseignement-apprentissage : un processus complexe



Un point sur la reconstruction du contenu : quel « éclairage » du contenu ?

La métaphore du photographe

The label "spotlighting" was chosen to suggest that no new content, stricto sensu, is invented. As with a photographer with a given landscape, the reflexive decision on what to stress in the taught content leads the planners to emphasize, unify, differentiate, contrast, various elements according to particular goals. The invention is there, only there. (Viennot, 2014)

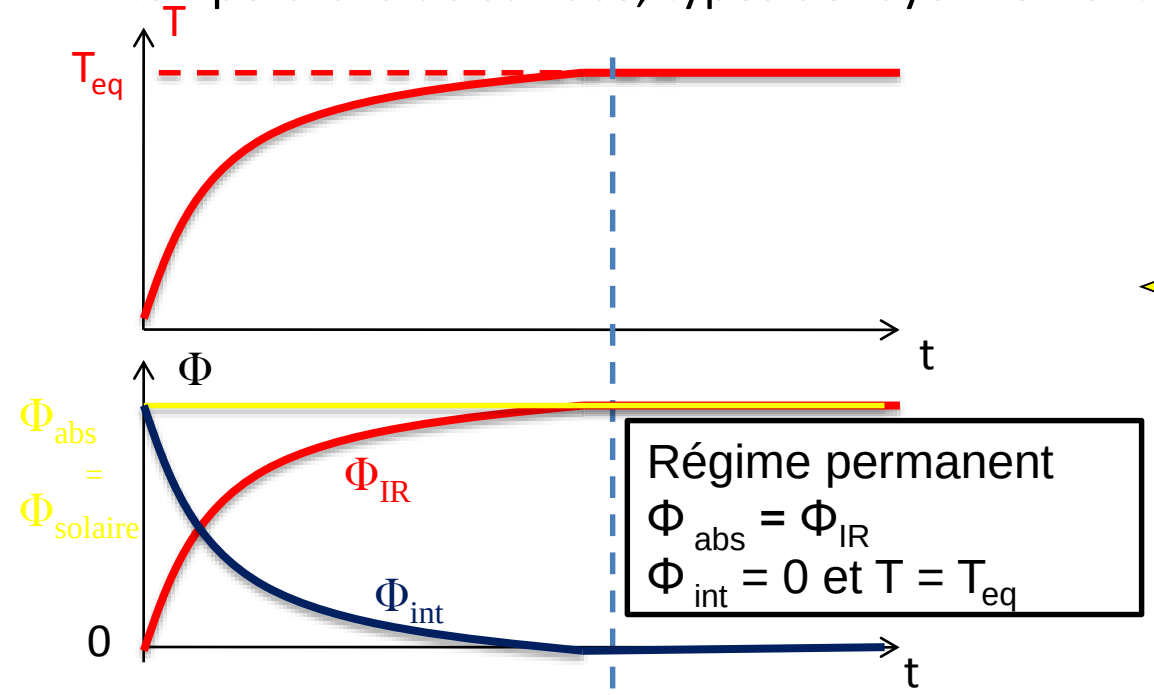
Une relation forte
entre contenu et stratégie d'enseignement

The "what" and the "how" overlap. (Viennot, 2010)

Points clé 1

Un net découplage entre régimes transitoire et permanent avec respect du principe de la conservation de l'énergie

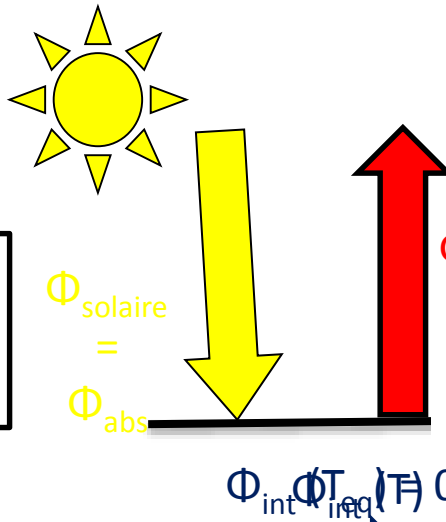
Un cas "simple": une planète sans atmosphère pour mettre en relation température de surface, types de rayonnement et échanges énergétiques



Régime permanent
$\Phi_{abs} = \Phi_{IR}$
$\Phi_{int} = 0$ et $T = T_{eq}$

Régime transitoire
$\Phi_{abs} = \Phi_{int}(t) + \Phi_{IR}(t) = Cste$
T ↗ quand Φ_{IR} ↗ alors que Φ_{int} ↘

planète = corps noir



Mise en avant de la nécessité d'un bilan radiatif nul pour le sol et pour l'espace lorsque l'équilibre thermique est atteint

Une première explication de l'effet de serre en termes d'épisodes d'une histoire…

Le système Terre-atmosphère reçoit du soleil un rayonnement incident(…) La plus grande partie de ce flux d'énergie (…) est absorbée soit par l'atmosphère (20%), soit par la surface de la Terre (50%), et transformée en chaleur. La surface terrestre réémet un rayonnement infrarouge vers l'atmosphère. Or, plusieurs composants chimiques de celle-ci absorbent les infrarouges, **puis** les réémettent dans toutes les directions. Une partie retourne vers la surface terrestre, laquelle s'échauffe **encore un peu plus** : c'est l'effet de serre. (Bard, 2004)

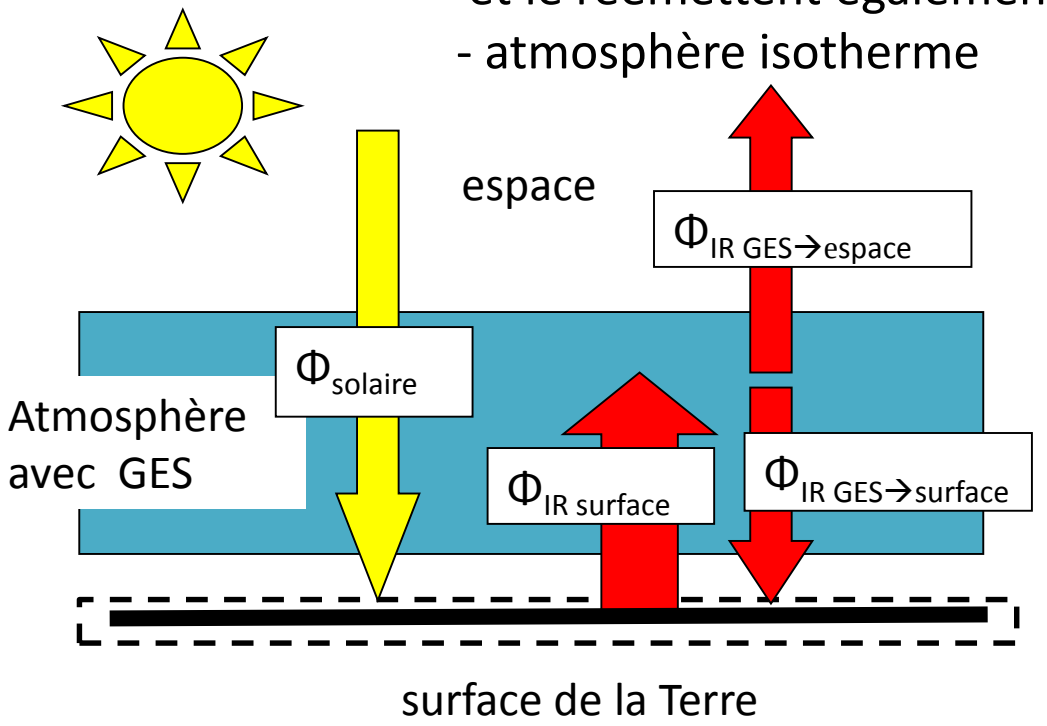
… et une première question :
l'histoire a-t-elle une fin ?

➡ Une nécessaire prise en compte des bilans énergétiques

Points clé 2

Une approche systémique des bilans énergétiques en régime permanent : un modèle très simplifié

Hypothèses : - surface de la Terre = corps noir
- GES totalement transparents aux radiations solaires
- GES absorbent totalement le rayonnement infrarouge et le réémettent également vers le haut et vers le bas
- atmosphère isotherme



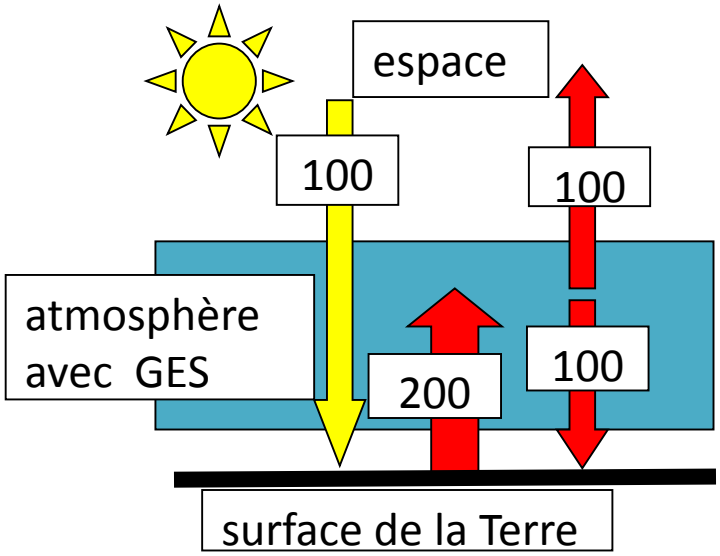
Surface de laTerre et atmosphère à l'équilibre thermique

Bilan pour la surface : $\Phi_{IR\ surface}(t) = \Phi_{solaire}(t) + \Phi_{IR\ GES \rightarrow surface}(t)$ avec $\Phi_{int} = 0$

➡ Nécessité de bien repérer les différents systèmes

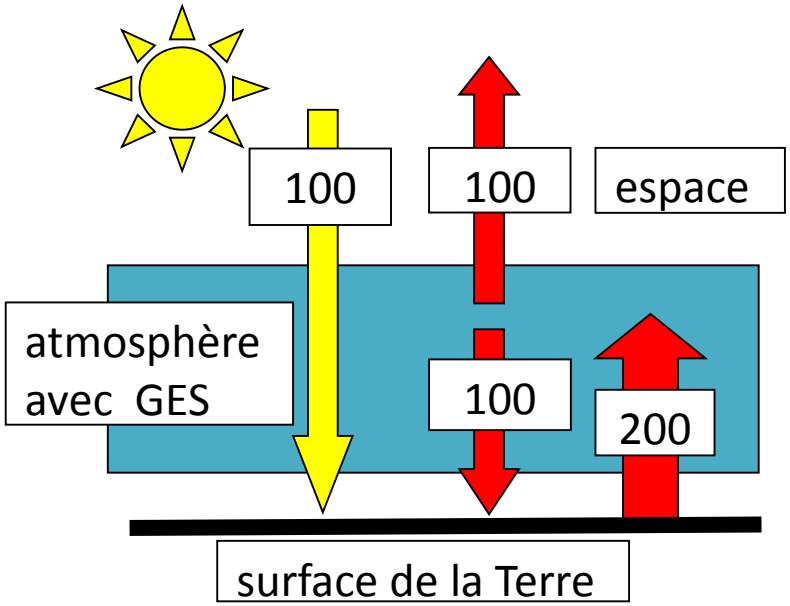
Comment construire logiquement les bilans énergétiques ? (1)

Une aide : le chiffrage des bilans énergétiques



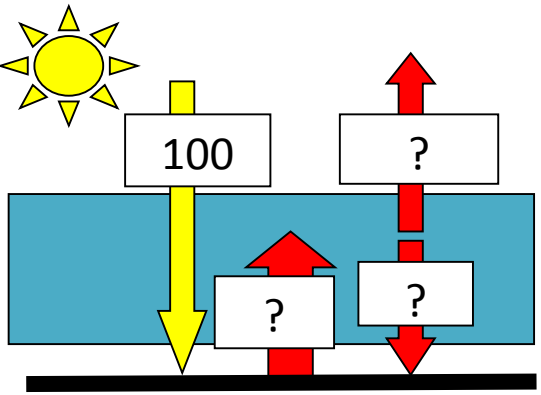
Si la surface de la Terre reçoit 100 du Soleil, elle émet 200 !

Un résultat déstabilisant si raisonnement mis en jeu de type linéaire causal



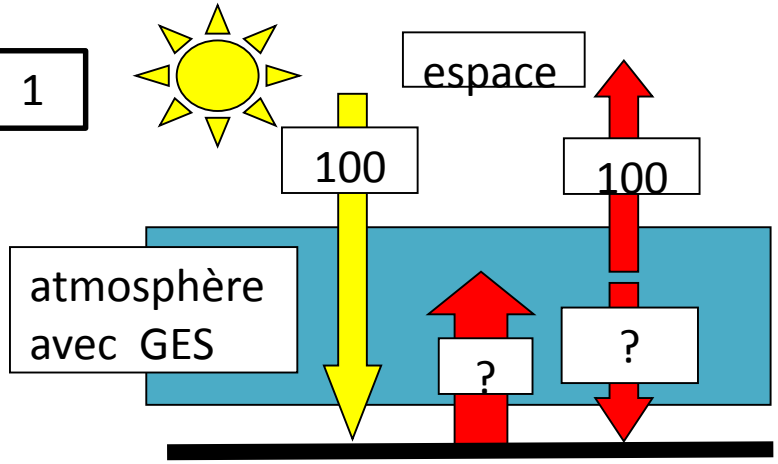
Une aide grâce à une reconfiguration du schéma ? Report de la difficulté sur l'atmosphère ?

Comment construire logiquement les bilans énergétiques ? (2)



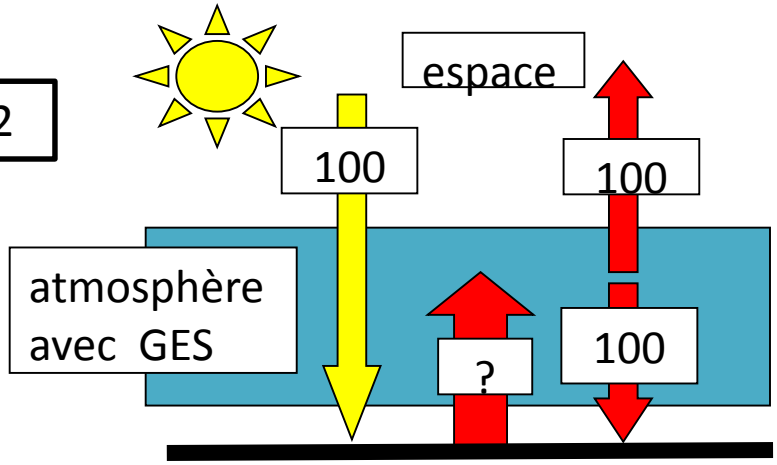
Un point de « départ » : rien ne change pour l'espace

1



surface de la Terre

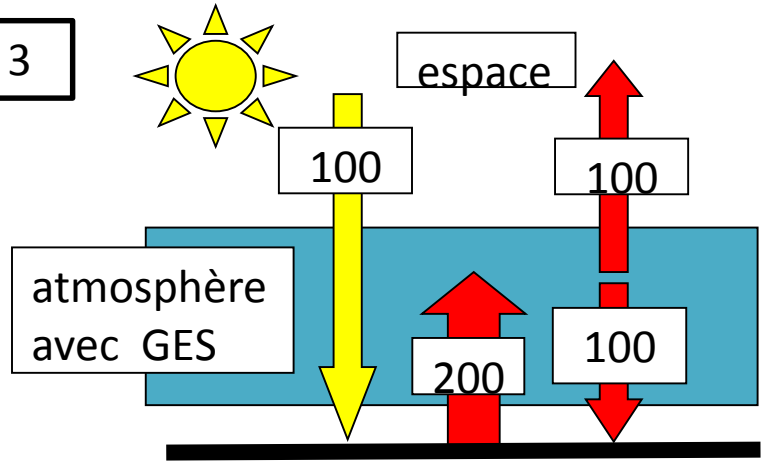
2



surface de la Terre

Emission « isotrope » par les GES

3



surface de la Terre

Enfin, bilan pour la surface

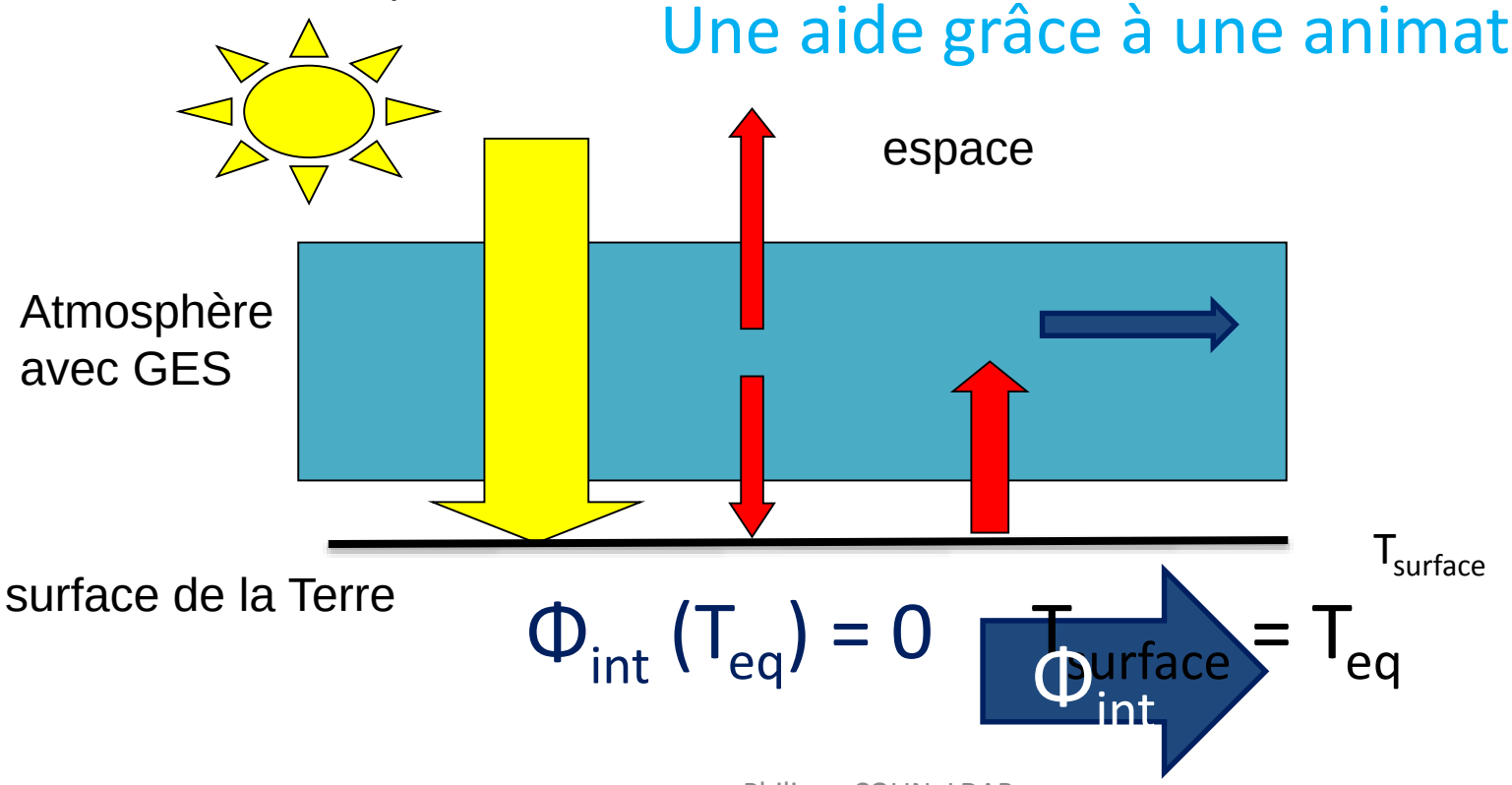
Nécessité de raisonner « par l'aval » de manière systémique

Points clé 3

Des points clés pour une approche systémique de l'effet de serre

- Prise en compte **simultanée** des différents phénomènes, en particulier de l'absorption et de l' émission infrarouge.
- Les bilans énergétiques de chacun des systèmes doivent respecter la conservation de l'énergie **à tout instant**.
- Ce sont les flux énergétiques qui régulent l'évolution des températures de chacun des systèmes.

Une aide grâce à une animation



Une première illustration des difficultés à partir de manuels scolaires et de ressources de l'internet

- Usage très fréquent de schémas pour présenter l'effet de serre

soit

« Explication »
de l'augmentation
de température
Suite d'épisodes
d'une histoire

ET ?
sur un
même
schéma

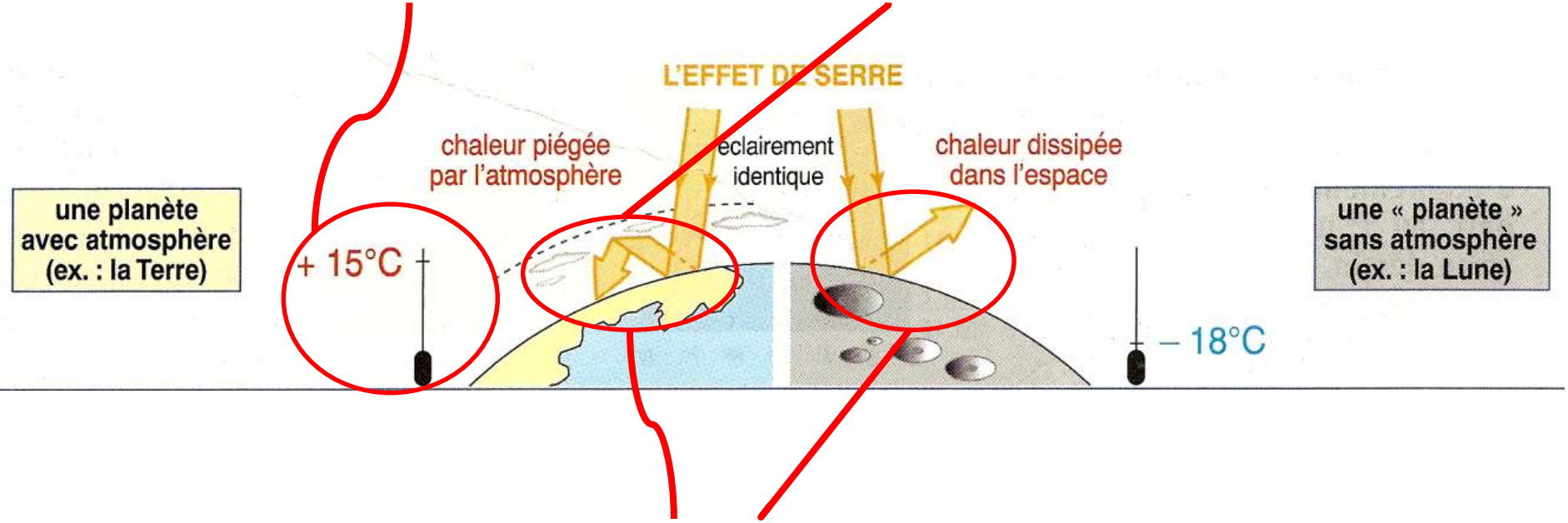
soit

Présentation
de bilans énergétiques
Approche systémique
simultanéité /
instantantanéité

- Images : Un point d'ancrage fort lors de la recherche ou même de la sélection d'informations (Boubée 2007 ; Wallace 2000)

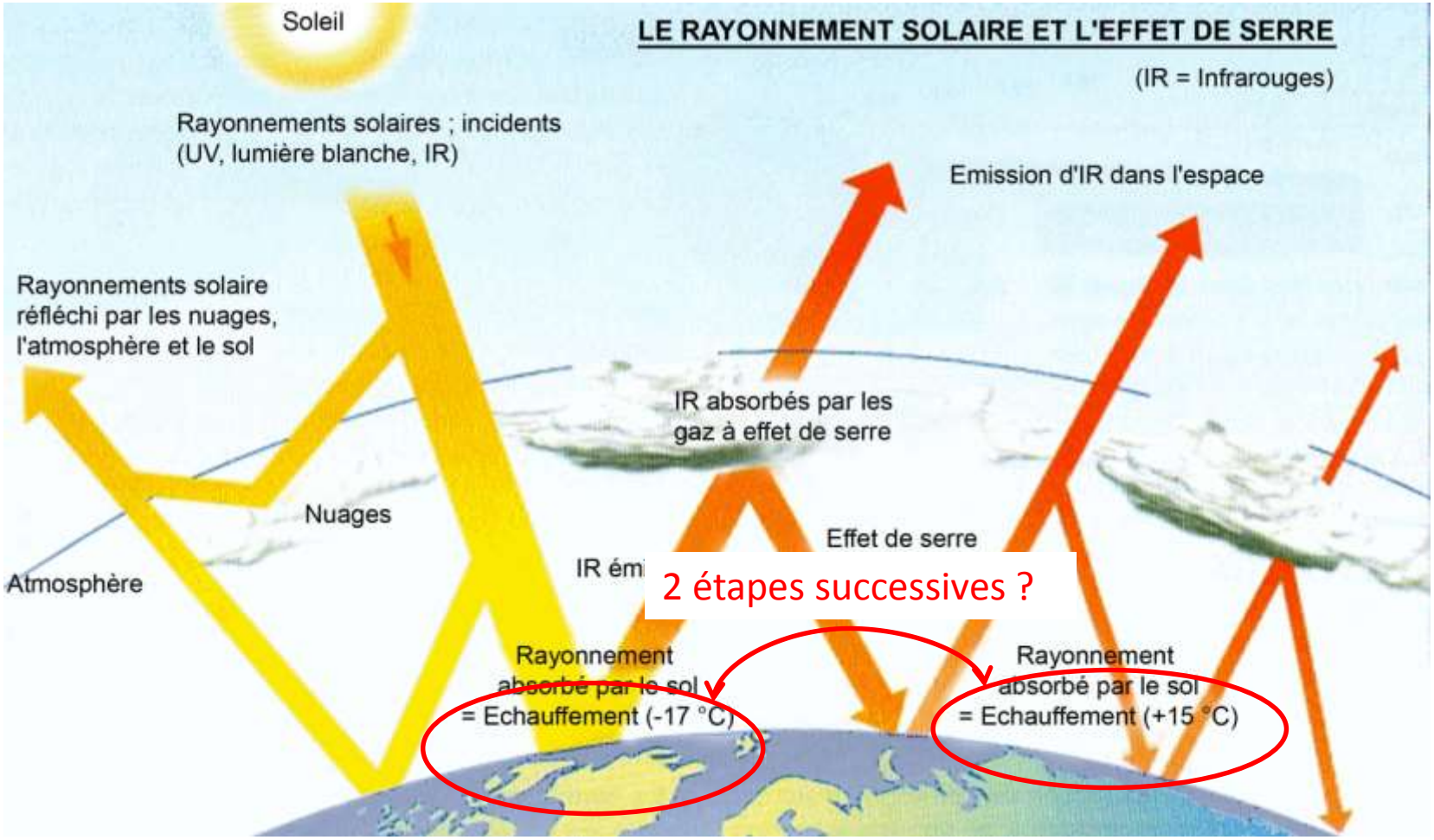
“Récit graphique” incohérent
Une illustration dans la synthèse d’un manuel

Comment concilier
équilibre thermique et bilan énergétique ?



Que penser des phénomènes d’absorption-émission infrarouges ?

Un “récit graphique” avec d’étranges étapes vers un régime permanent



Comment comprendre les “échauffements” à - 17°C et à +15°C?

Comment distinguer les régimes transitoire et permanent ?

Comment prendre en compte les bilans énergétiques?

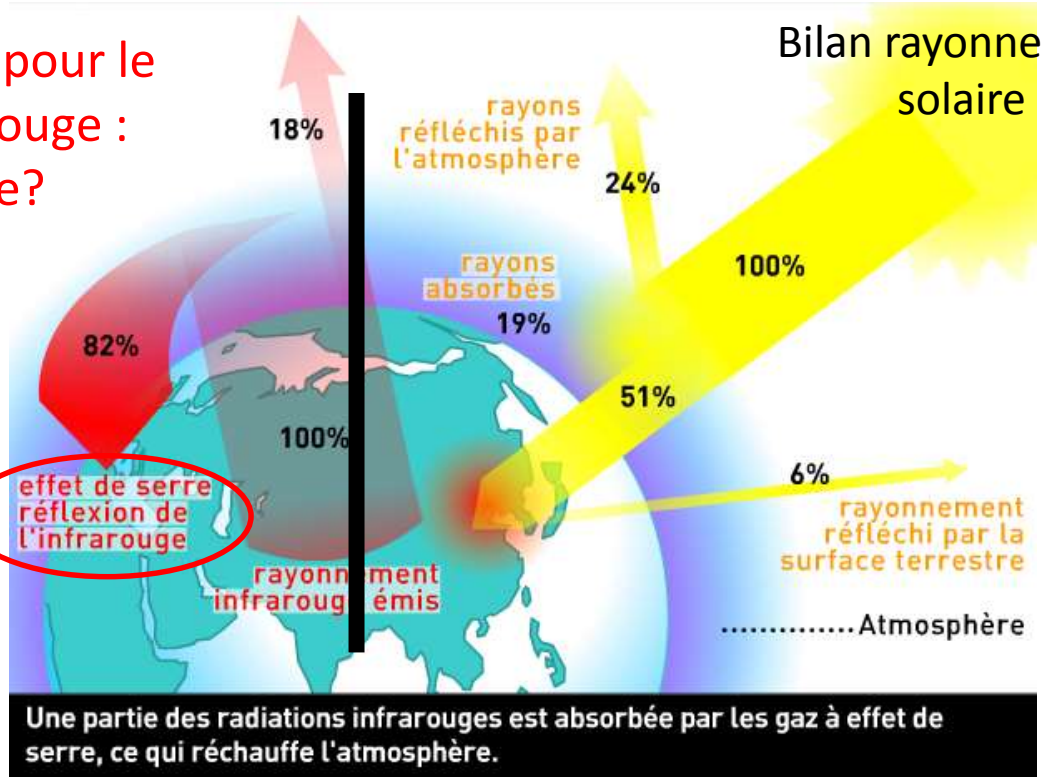
Quelle prise en compte de la variable spatiale ?

Des « bilans-écho » (Viennot 2012)

Un total découplage des « bilans » de rayonnements solaire et infrarouge

« Bilan » incomplet pour le rayonnement infrarouge : Qu'arrive-t-il ensuite?

???



Nécessité de construire des bilans systémiques?

Un autre « bilan-écho » : « IR 95 / 5 »

Equilibre thermique pour l'espace ?

Une forte diffusion du schéma « IR 95 / 5 » : un exemple dans un manuel scolaire

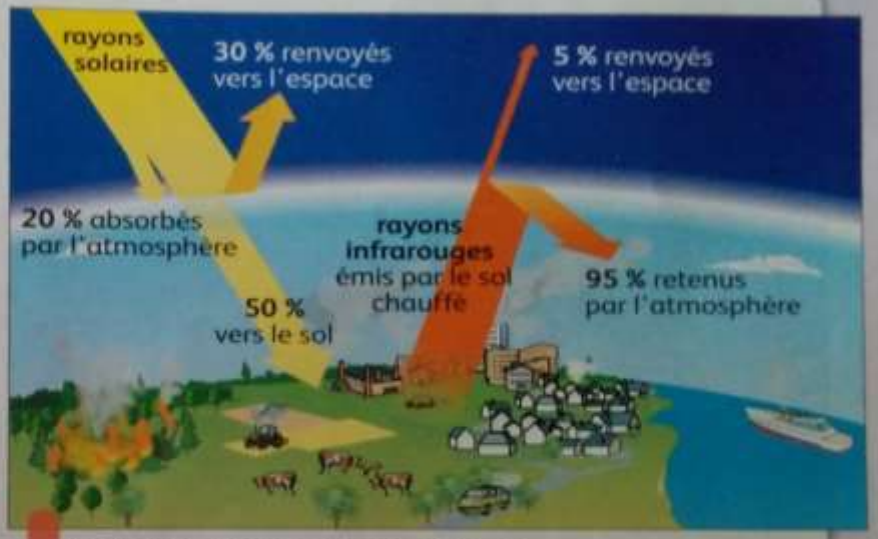
Physique & Société

Comprendre l'effet de serre

La lumière du Soleil est partiellement absorbée par le sol, ce qui le réchauffe. Le sol réémet à son tour un rayonnement d'origine thermique situé dans l'infrarouge, ce qui produit l'effet inverse.

• Dans une serre, les plantes sont protégées par un vitrage ou un voile de matière plastique qui laissent bien passer la lumière visible, mais réfléchissent en grande partie les infrarouges. La lumière est ainsi piégée, **ce qui entretient une température élevée.**

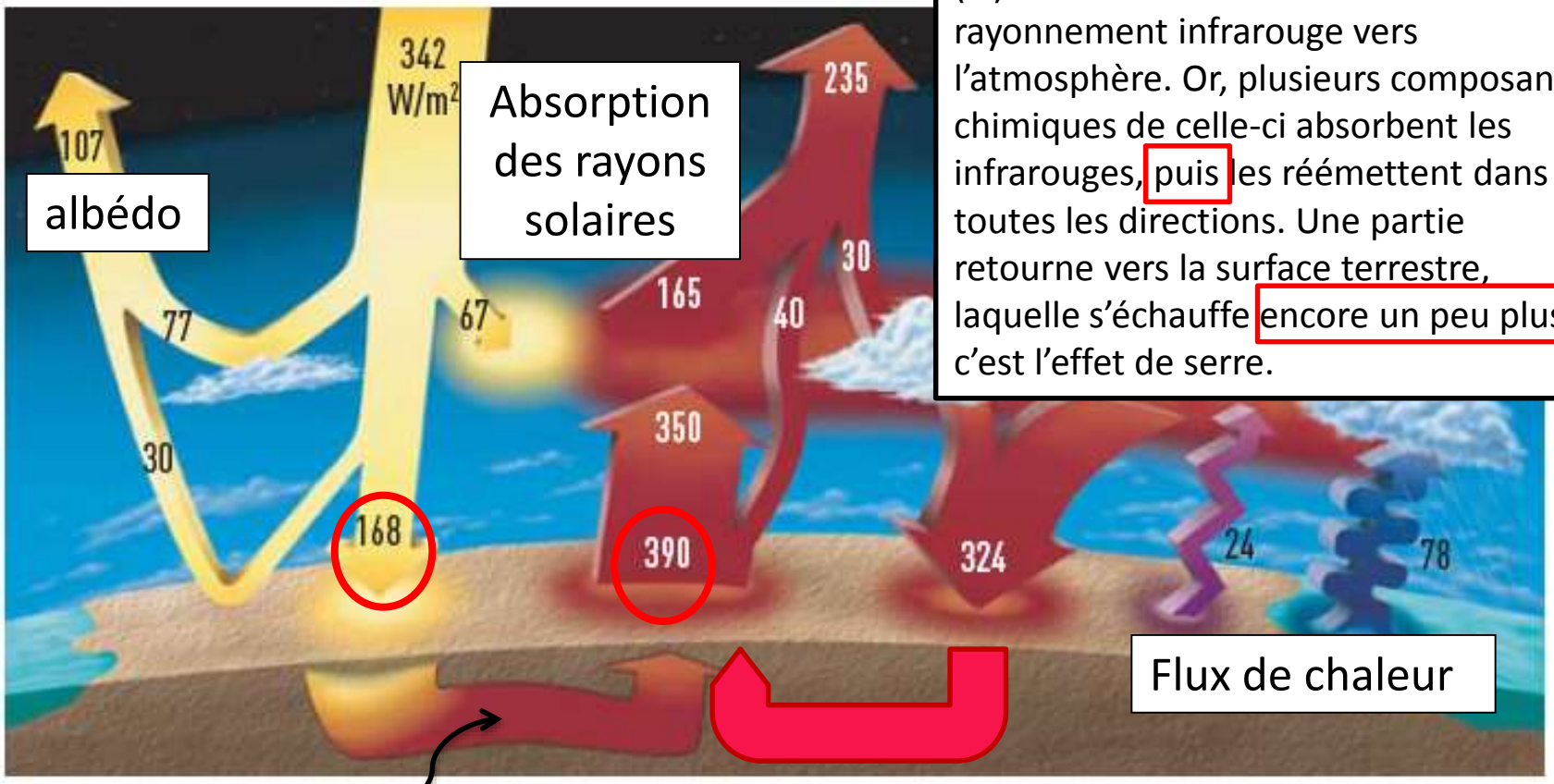
• Un phénomène analogue se produit dans l'atmosphère. Le rôle du vitrage est tenu par certains gaz, surtout le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau, le méthane et les oxydes d'azote. Ce phénomène naturel maintient sur Terre une température propice à la vie. Mais la grande majorité des scientifiques admet que les rejets dus à l'activité humaine l'intensifie dangereusement, contribuant à une augmentation de la température du globe aux conséquences pouvant s'avérer catastrophiques.



L'effet de serre est un phénomène naturel amplifié par l'homme.

Sur le Web http://www.notre-planete.info/geographie/climatologie_meteo/
http://www.edf.com/html/panorama/transversal/media_durable/dur_anim_02.html

Régime permanent avec bilan énergétique complet (Bard, 2004)



(…) La surface terrestre réémet un rayonnement infrarouge vers l'atmosphère. Or, plusieurs composants chimiques de celle-ci absorbent les infrarouges, puis les réémettent dans toutes les directions. Une partie retourne vers la surface terrestre, laquelle s'échauffe encore un peu plus : c'est l'effet de serre.

Comment comprendre 168 ➡ 390 ?

Comment concilier "explication-écho" et schéma d'un bilan énergétique?

➡ Nécessité d'une approche systémique préalable

Un large éventail de difficultés (Ekborg & Areskoug, 2006)

Au niveau des concepts physiques en jeu

- Confusion, voire assimilation, entre température et chaleur
- Pas de distinction entre les différents types de rayonnement et leurs caractérisiques
- Pas de connaissance des différents gaz à effet de serre

  → GES en lien uniquement avec problèmes environnementaux (pollution, trou dans la couche d'ozone, pluies acides...)
- Confusion entre effet de serre naturel et effet de serre anthropique (réchauffement climatique)

Au niveau des causes de l'effet de serre

- "la chaleur est renvoyée par une barrière "(GES, pollution)

  → la chaleur est "piégée"
- Le trou dans la couche d'ozone laisse entrer plus de rayons

Des difficultés liées au raisonnement commun

Le raisonnement linéaire causal (Rozier & Viennot, 1991), un fort obstacle

- à la construction de bilans énergétiques
- à la compréhension du régime permanent d'équilibre thermique

○ Pas de rétroaction rendant l'analyse systémique difficile

○ Difficulté à comprendre l'évolution temporelle des systèmes (avec la température comme indicateur) tout en respectant le principe de conservation de l'énergie

○ "Ecrantage" du régime permanent (équilibre thermique donc "rien ne se passe") par le régime transitoire où la température augmente

➡ Une grande difficulté à prendre en compte correctement la variable temporelle

Quelques illustrations (Colin et Tran Tat, 2012)

Contexte

Etude sur 3 élèves à l'entrée en première S (programme 2000)
à partir d'entretien semi-directif d'environ 30 minutes

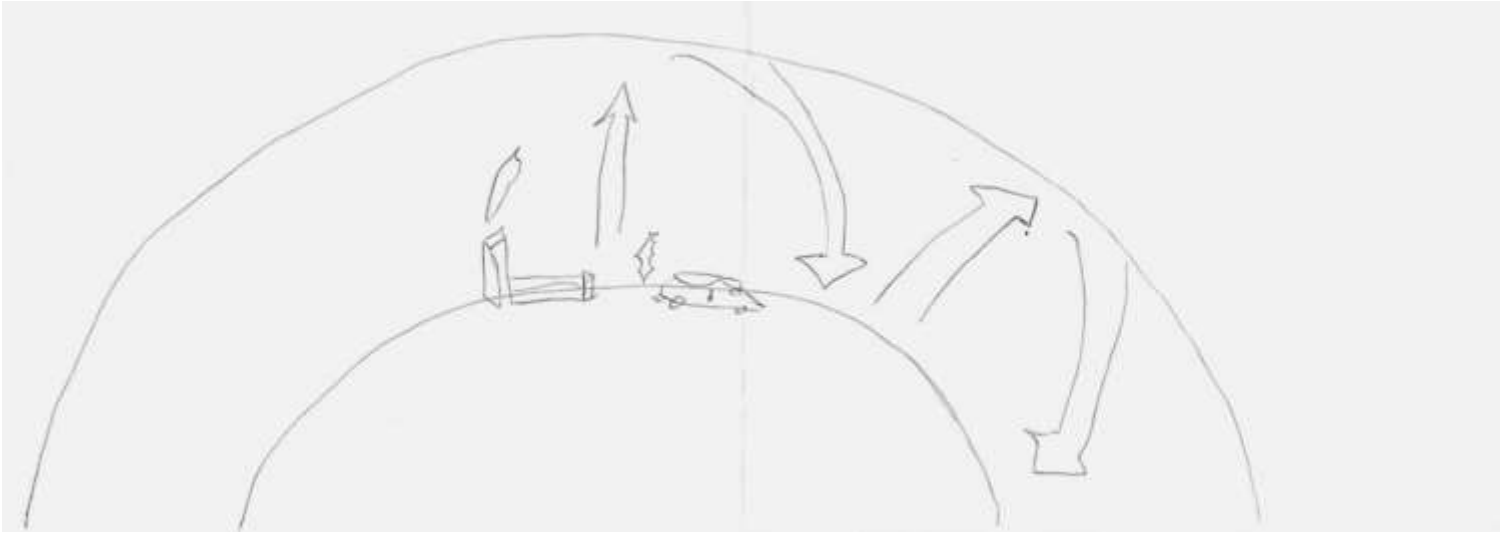
Protocole

phase	supports	objectifs
1	Questionnement ouvert avec production d'un schéma explicatif	Accéder à une première représentation de l'effet de serre
2	"learning experiment" avec modèle matériel et courbe d'évolution de température	Analyser l'apport du dispositif
3	Deuxième production de schéma et comparaison avec le premier	Evaluer une possible évolution de la compréhension de l'effet de serre
4	Discussion autour de deux schémas de vulgarisation relatifs aux bilans énergétiques	Evaluer la capacité d'analyse des schémas en termes de bilans énergétiques

Des difficultés déjà bien identifiées

- Confusion entre effet de serre naturel et réchauffement climatique

La chaleur, elle vient de la production, de l'activité humaine mais elle reste coincée à cause de cette serre. (A)

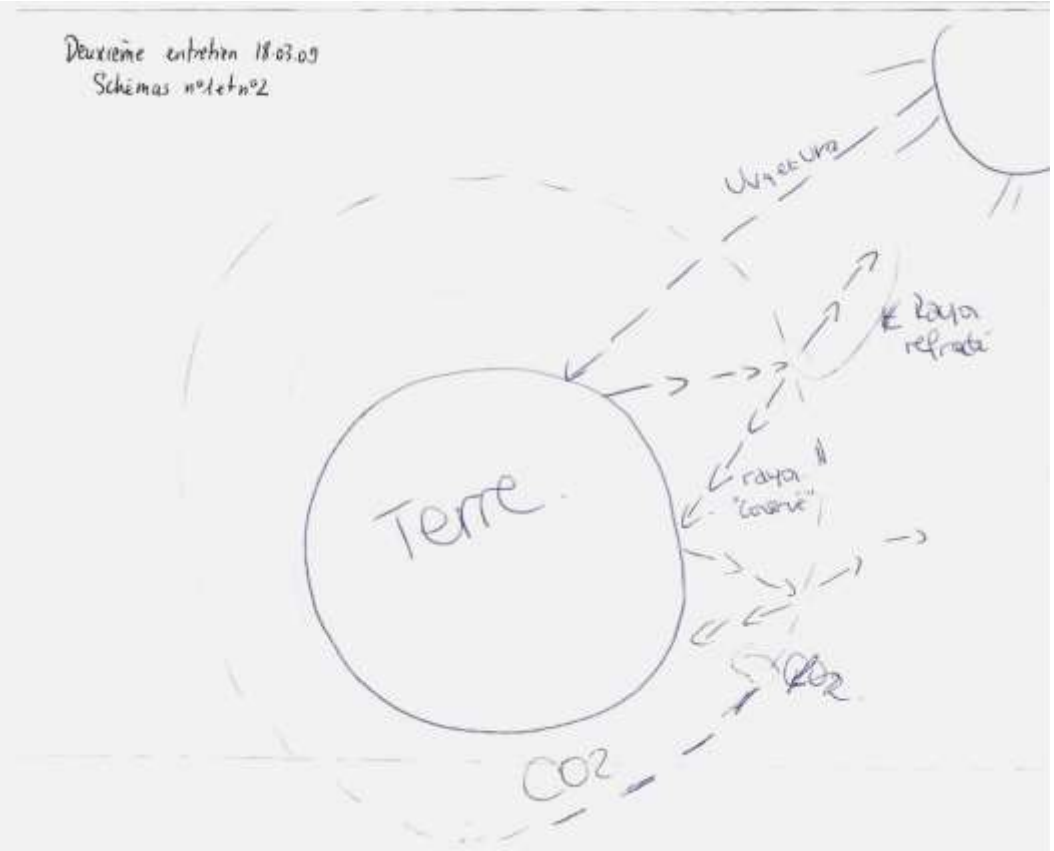


- Lien entre réchauffement climatique et trou dans la couche d'ozone

S'il n'y avait pas de trou dans la couche d'ozone, ça maintiendrait une sorte d'équilibre entre les rayons qui entrent et ceux qui sortent. (C)

A noter la présence des notions de bilan et d'équilibre au niveau des échanges entre espace et Terre-atmosphère

Une absence remarquable : aucune d'évocation du rayonnement infrarouge, ni des phénomènes d'absorption et d'émission



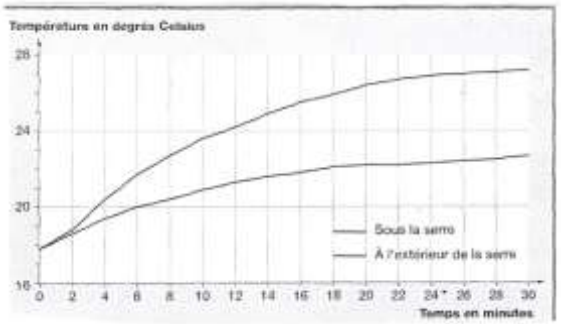
On a le Soleil qui envoie des UVA et des UVB ; ensuite, ils sont **réfractés** sur la Terre et il se trouve qu'il y en a certains qui arrivent à s'échapper de cette couche et d'autres qui sont **emprisonnés** par cette couche, donc du coup ils sont **renvoyés** vers la Terre et ils sont **conservés** dans cette couche. (B)

Résonance entre lecture des schémas et raisonnement séquentiel

A propos des régimes transitoire et permanent

• Le régime permanent n'est pas évoqué spontanément

• Un élément déclencheur : les courbes d'évolution des températures



• L'atteinte d'un équilibre thermique facilement acceptée mais sans en donner une interprétation correcte

(E) *La température dans la serre va évoluer mais à un moment ça va atteindre une température max. (...) La lumière est emprisonnée et comme ça produit de la chaleur, plus on met la lumière, plus la chaleur est conservée.*
(P) *Quand ça s'arrête*?
(E) *Je ne sais pas.*

Des idées s'opposant à la construction de bilans

- Une idée d'"emprisonnement"

○ *La chaleur reste stockée enfin reste emprisonnée dans notre serre.* (A)

○ *Certains rayons sont emprisonnés et se réfléchissent sur Terre, enfin ils restent dans l'atmosphère au lieu de partir.* (C)

○ *Certains gaz comme le CO_2 emprisonnent les rayons du Soleil. Quand ils arrivent sur Terre, ils sont réfléchis et ces gaz les empêchent de repartir en dehors de l'atmosphère.* (B)

- Une centration sur le volume d'air contenu dans le récipient

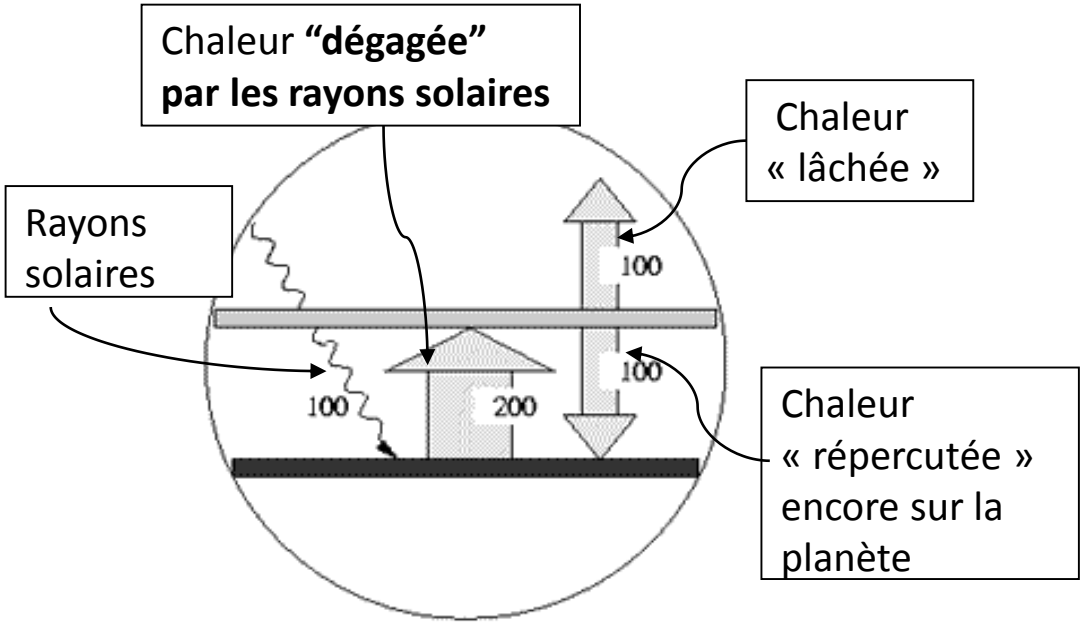
Chaque volume a sa température maximum *(...) Des particules polluantes restent dans l'atmosphère et captent des rayons lumineux, jusqu'à ce qu'elles soient toutes occupées par un rayon lumineux.* (C)

Une conception du même type chez un enseignant (25 ans d'ens.)

c'est pas vraiment l'effet de serre (…) c'est un ***état maximal de réchauffement d'un milieu*** */* ***il peut pas se réchauffer à l'infini*** */* ***en fonction du volume*** */ ça doit être encore une loi de je ne sais pas quoi ça*

→ Modèle analogique de la serre agricole : plus un obstacle qu'une aide?

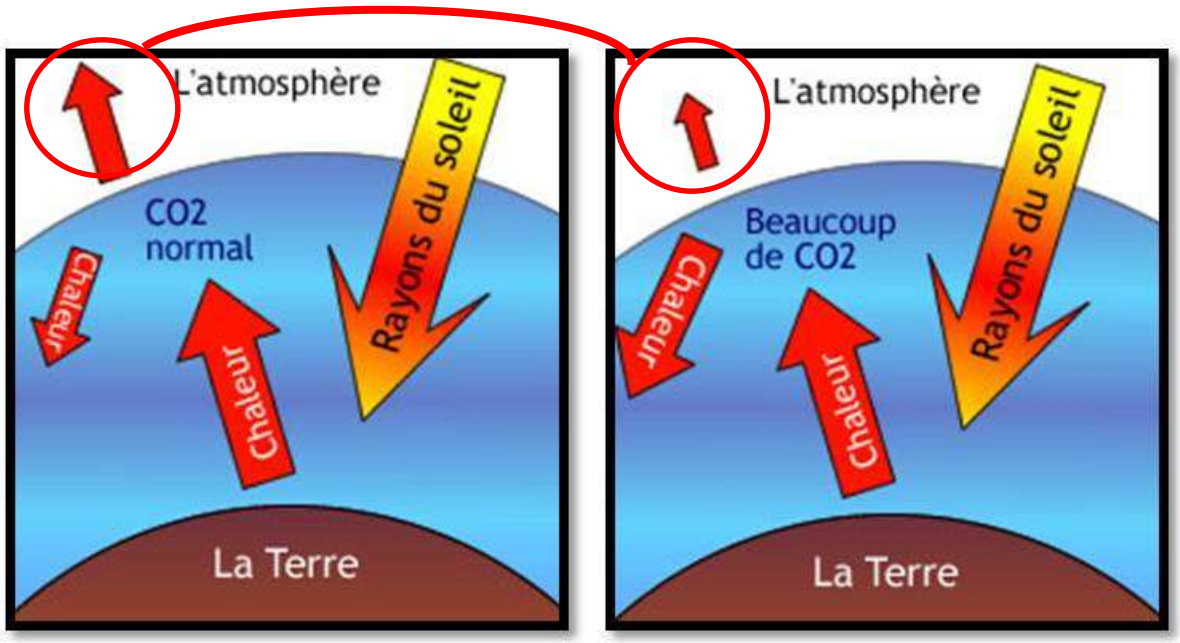
Une nouvelle illustration du raisonnement séquentiel à partir de la lecture par un élève d'une schématisation des bilans énergétiques



*Là, il y a les rayons du soleil qui **arrivent**, **donc la chaleur dégagée par ces rayons, c'est la grosse flèche** et les deux petites flèches [...] soit les rayons, euh la chaleur est lâchée en dehors de cette couche, soit elle est répercutée encore sur la planète.* (B)

➡ Une histoire obstacle à une "lecture" systémique

Une schématisation en résonance avec le raisonnement des élèves

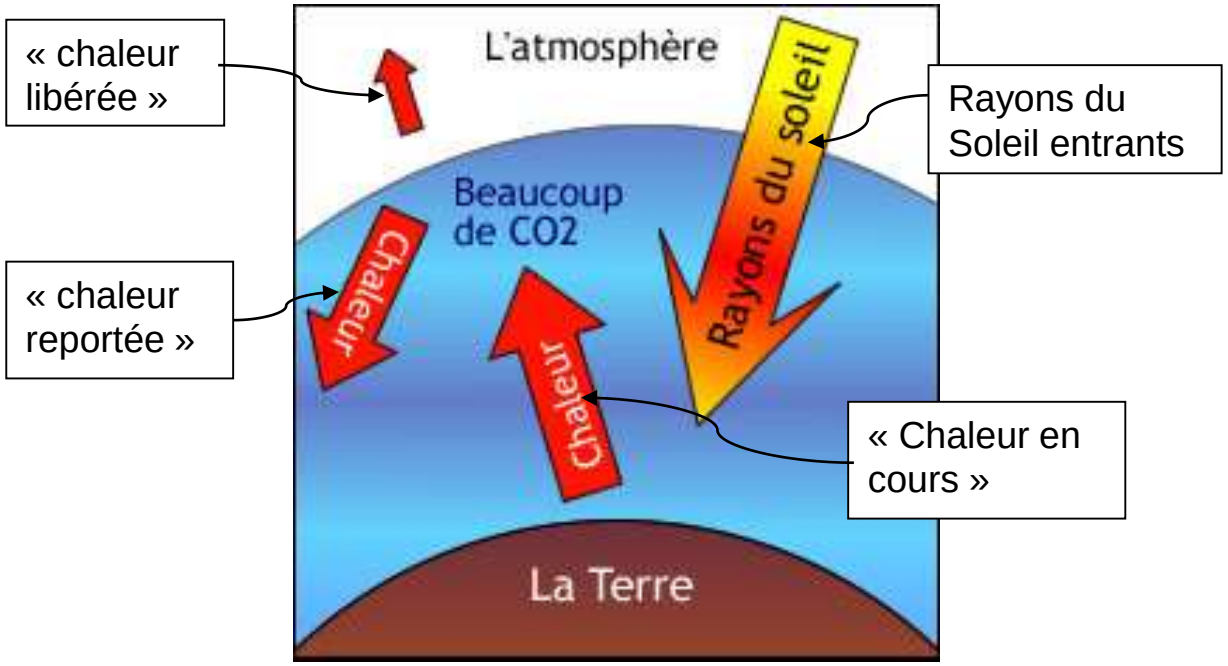


Il y a plus de chaleur qui reste dans les environs de la Terre que celle qui ressort (...) C'est un bon schéma si la température augmente (...) mais si la température est constante, il faudrait des flèches de même taille car égalité entre la chaleur qui reste et celle qui ressort. (C)

Un raisonnement local (temporellement et spatialement) : "bilan" IR uniquement, à la limite de l'atmosphère

➡ Nécessité de bien repérer les systèmes

Un exemple d'analyse plus globale des échanges pour le système Terre -atmosphere



Quand il y a les rayons du Soleil qui arrivent, il y a la chaleur qui est ***en cours*** *pour se reporter dans l'atmosphere ou pour se libérer de cette couche. Donc,* ***ça conserve deux fois plus que ça en rejette****.* (B)

Nécessité de bien repérer les systèmes et de chiffrer les échanges

Points de vue d'enseignants sur l'enseignement de l'effet de serre
Quelques résultats d'une étude exploratoire (Colin et Triki 2013)

- Echantillon : 7 enseignants de SVT
  - PSVT1 (stagiaire ayant enseigné l'effet de serre en Seconde)
  - PSVT7 (stagiaire agrégée ayant enseigné l'effet de serre)
  - PSVT6 (6 ans d'enseignement)
  - PSVT2 (17 ans d'enseignement)
  - PSVT5 (25 ans d'enseignement)
- Entretien semi-directif (1h 20 environ)

Stratégie	Objectifs
Questionnement ouvert	Explorer contenu scientifique et stratégie d'enseignement
Discussion à propos de 12 images issues de manuels scolaires et de sites internet	Collecter des informations sur les points de vue des enseignants à propos de nos choix didactiques pour analyse
Discussion à propos de deux expérimentations contrastées	Evaluer la sensibilité des enseignants au regard des régimes transitoire et permanent
Expression du ressenti	Identifier leur prise de conscience d'une possible transformation de leur approche

Points de vue d'enseignants sur l'enseignement de l'effet de serre

➢ Un point commun : nécessité de construire un modèle explicatif de l'effet de serre avec les élèves

➢ Des points de vue très contrastés entre les deux enseignantes stagiaires interviewées et leurs collègues ayant plus d'ancienneté

- Usage du modèle analogique de la serre agricole
- Idée d'équilibre thermique et prise en compte des bilans énergétiques
- Nécessité de construire des bilans énergétiques chiffrés

Une analyse le plus souvent très chronologique (SVT6, 6 ans d'ens.)

Exemple d'explication

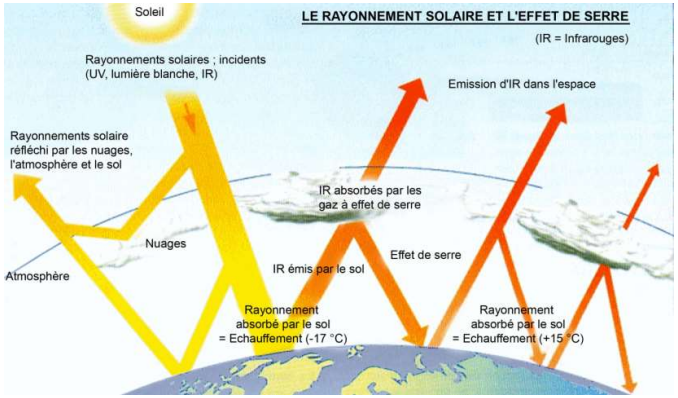
(5'05) *LaTerre émet des infrarouges (…) ces gaz emmagasinent de la chaleur et la renvoient à la surface de la Terre, ce qui fait qu'elle est chauffée* ***une deuxième fois***

Stratégie : comparaison Terre / Lune à partir d'un dossier documentaire

(5'59) *les élèves devaient* ***replacer dans l'ordre les documents pour comprendre le cheminement***

(20'01) *j'ai besoin de* ***mettre un ordre, des numéros pour que les élèves voient dans quel ordre tout ça se passe*** (…) ***chronologie*** *pour montrer que c'est un ensemble*

en cours on a toutes les étapes petit à petit *puis on a un tout petit peu simplifié* (seulement un seul « renvoi » vers la surface) */donc moi* ***j'aime bien effectivement la notion de cascade***



Idée de bilan énergétique et d'équilibre thermique non questionnée

Modèle idéalisé de la serre agricole
Des points de vue très contrastés

Rejet de la serre agricole motivé par la confusion entre effet de serre et trou dans la couche d'ozone

(SVT6 6 ans d'ens.)

pour moi c'est le plus compliqué // qu'ils ne confondent pas / gaz à effet de serre et couche d'ozone // ça c'est systématique

justement les pointillés me gênent *enfin / en partie me gênent parce que justement* ***ça conforte dans l'idée de la couche d'ozone***

(…) *j'essayais* ***d'éviter à tout prix // de faire tout de suite ce parallèle avec la vitre / parce que sinon la couche d'ozone vient tout de suite*** (…) *pour moi c'est presque pire que les pointillés parce que ça donne l'image d'une vitre*

Une difficulté didactique bien connue,
obstacle à l'usage du modèle analogique de la serre

Un autre argumentaire pour le rejet du modèle de la serre agricole (PSVT5 25 ans d'ens.)

Appui sur les ressources institutionnelles disponibles

(2'53) ***Je me suis rendue compte que c'était un modèle*** (serre agricole) ***qui était faux / J'ai lu un peu les rapports de l'ENS de Lyon*** */ sur l'erreur en fait / sur les erreurs qu'on faisait quand on disait ça / donc j'ai dit je ne vais plus faire comme ça* (…)
(23'08) *y'a pas de convection dans une serre*

Une prise en compte des difficultés potentielles des élèves…

(22'51) *Ils* (auteurs) *adorent ça les vitres d'une serre / moi j'aime pas / pour moi si j'étais un élève je comprendrais pas / pour moi les vitres c'est dur et toute l'atmosphère c'est pas dure*

… mais une possible méconnaissance des phénomènes régissant l'interaction rayonnement - vitre

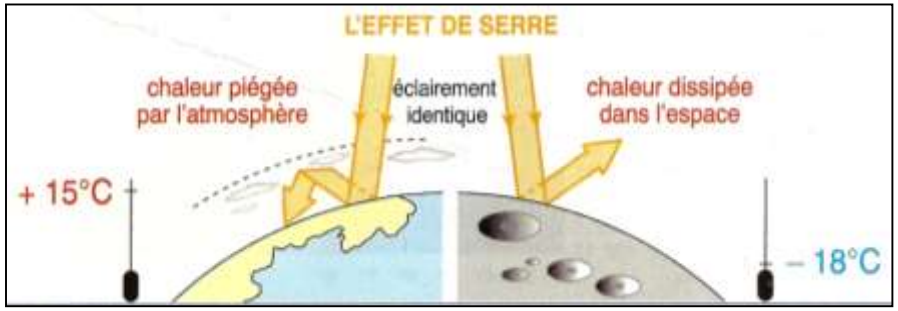
(42'48) ***la vitre retient l'air chaud*** */ ça va rester confiné (…) ça va se réchauffer de plus en plus (…) il n'y a* ***pas de possibilité d'échappement***
(45'42) *c'est pas le même mécanisme du tout /c'est* ***une vitre qui bloque*** *alors que dans l'atmosphère c'est* ***des gaz qui absorbent*** *des rayons / qui renvoient réémettent*

La serre agricole comme entrée en matière (PSVT1 stagiaire)

déjà je fais le rapprochement (xxx) pourquoi ça s'appelle l'effet de serre ? ***là je fais le rapprochement avec le monde agricole*** */ ça c'est sûr / pour que / ce soit plus pertinent chez eux (…) je l'ai fait (d'une façon) magistrale là / (xxx) / donc avec / à l'aide d'animations euh que je projetais au tableau / que / ces animations je les ai trouvées sur le site de / de la Cité de la Science*

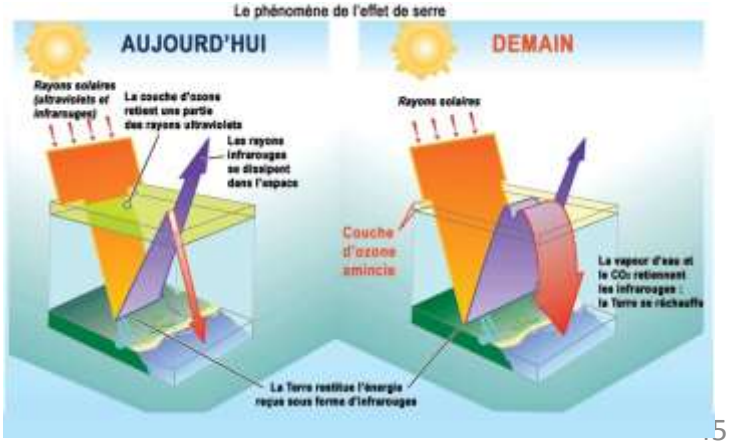
Une prise en compte des « simplifications »

en simplifiant on oublie d'indiquer qu'il y a un certain nombre de rayonnements qui ressortent / qui traversent l'atmosphère /



Une prise en compte des difficultés des élèves

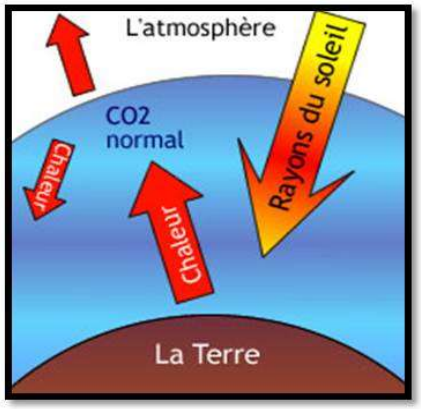
ce document il amène à la confusion // entre couche d'ozone et effet de serre

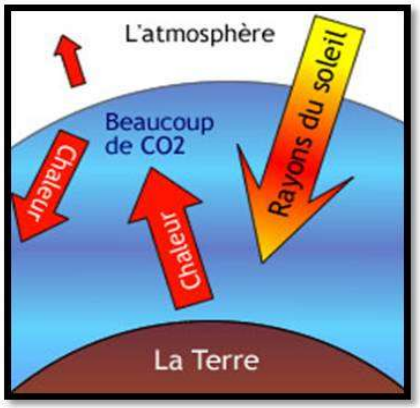


Bilan énergétique et équilibre thermique
Des points de vue très contrastés
sur leurs prises en compte

Un bilan non questionné, laissant l'enseignant perplexe (PSVT5 25 ans d'ens.)

(17'35) *ils ont montré qu'il y a* ***des pertes*** *// alors là je sais pas si c'est vrai / par contre ils ont mis* ***beaucoup de pertes*** *là /****peu de pertes*** *ici //* ***je sais pas*** (…)
(24'59) ***le reste est renvoyé vers l'espace / ça j'en parlais pas***

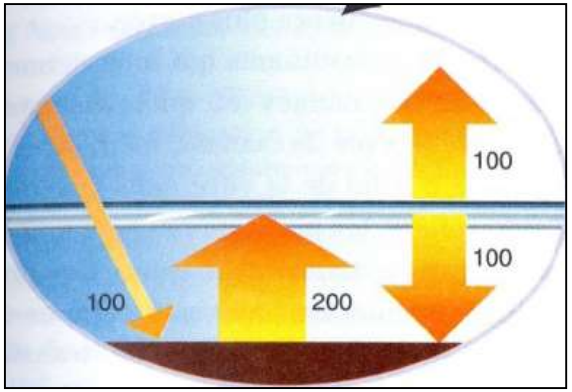




(47') ***Le bilan j'en sais rien s'il est faux comme je les connais pas les chiffres*** *(…)* ***200 c'est vrai c'est étonnant*** *(…)* ***c'est pas assez rigoureux pour faire un vrai bilan énergétique***
(48'07) *là ça vient réchauffer / la Terre se réchauffe elle renvoie 200 /* ***beaucoup plus d'énergie que ce qu'elle a reçue*** *et ensuite ça se répartit y'en a perdus et y'en a qui sont renvoyés (…)* ***pourquoi pas***

Après réponse de l'interviewer (100 + 100 = 200)

(53'34) ***c'est juste ça ? Ah bon***



Des obstacles multiples à la construction de bilans :
Bilan espace non pris en compte, rejet du modèle jugé trop « simple », raisonnement séquentiel

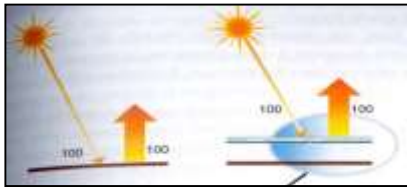
Un changement de point de vue au cours de l'entretien

(PSVT2 17 ans d'ens.)

Nécessité d'introduire l'équilibre thermique ?

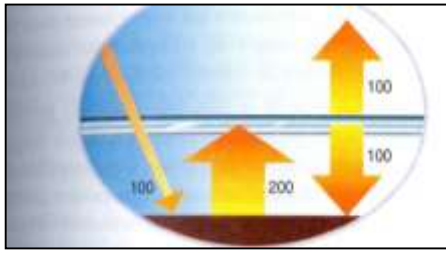
(16'29) *Non parce que* (…) *ce qui est important c'est qu'il* (l'équilibre) *soit déplacé pas qu'il existe // (…)* ***je ne me suis jamais posée la question de l'atteinte d'un équilibre***

(25'50) *j'en ai donné 100 / j'en renvoie 100 / c'est faux ça m'énerve /* ***on a vraiment l'impression qu'on réfléchit tout ce qu'on a reçu***



Bilan énergétique?

(27'05) ***aucune idée / pour moi il n'y a pas d'équilibre*** */* ***ici*** *je suis à 200 -100 -100 donc à 0 et j'ai 100 de perdu / donc il y a un problème /* ***je perds plus que ce que je gagne***



(42'05) ***le fondamental c'est que les élèves associe augmentation de CO_2 et augmentation de température***

(42'17) ***c'est important d'en*** **(équilibre thermique)** ***prendre conscience*** *(…)* ***il s'agirait pas dans le schéma de faire croire au déséquilibre*** */ je vais regarder mon schéma à la maison mais je suis à peu près persuadée qu'ils sont équilibrés*

(42'48) ***on n'a pas le temps non plus le programme dit*** *(…)*

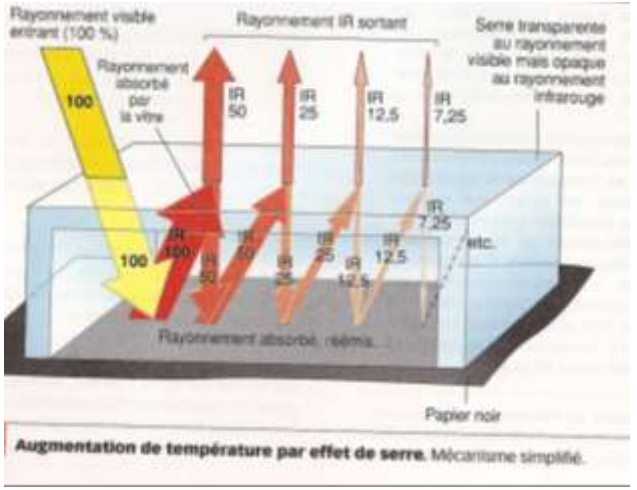
Des positions contrastées pour le chiffrage des bilans

- Sans apport pour la compréhension (6 ans d'ens.)

(39'20) ***La notion est suffisamment complexe pour ne pas s'embrouiller de chiffres***

(42'23) *chiffres inutiles pour des élèves de seconde*

(43'01) ***les chiffres ne correspondent pas à la réalité*** *sachant qu'il y a une partie absorbée par les nuages*



Augmentation de température par effet de serre. Mécanisme simplifié.

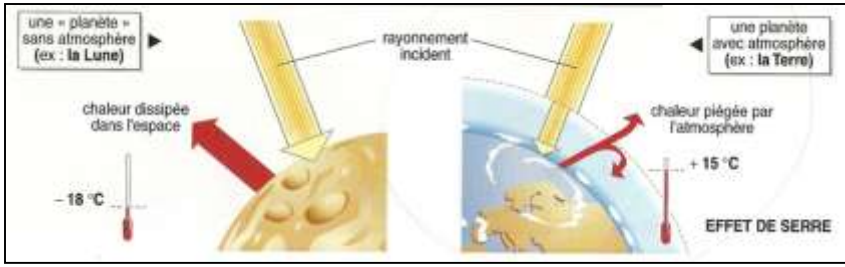
- Indispensable à la compréhension (stagiaire)

(9'48) *apport plus élevé en énergie si on fait la somme des deux en fait (…)* ***le fait de chiffrer c'est important sinon c'est peu compréhensible en fait***

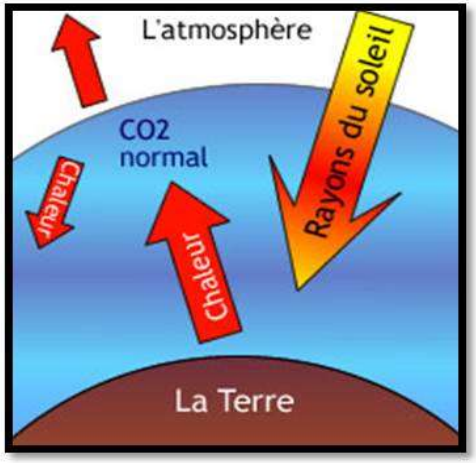
Une prise en compte des bilans énergétiques dès la présentation du premier schéma (PSVT7 stagiaire agrégée)

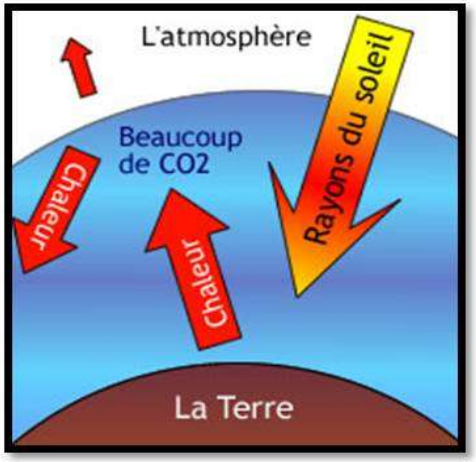
(4'30) ***totalement faux scientifiquement*** *(…) si c'est l'énergie qui est reçue il y a autant d'énergie qui repart donc ça me paraît très faux*

(5'05) *on a l'impression qu'il y a moins d'énergie qui repart par rapport à l'énergie qui arrive donc* ***la Terre devrait constamment s'échauffer donc ne pas être à l'équilibre*** *(…) scientifiquement ça me paraît très faux*



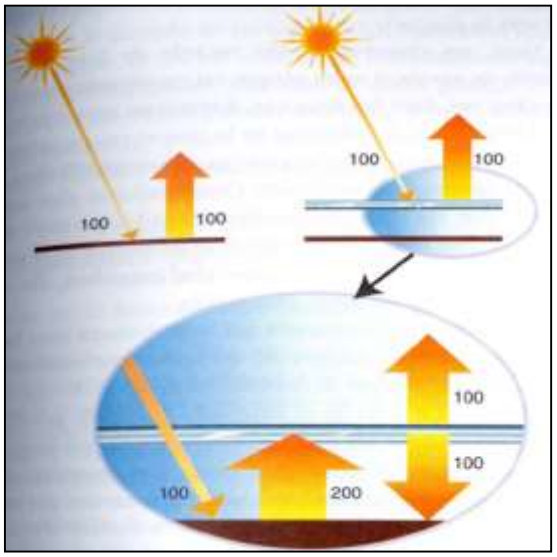
(7'30) ***on fait croire que moins d'énergie repart avec plus de CO_2***





Aucun problème avec le bilan espace (SVT1 stagiaire, ES enseigné en 2nde)

on constate que euh / d'après les chiffres / le rayonnement reçu par le toit de l'atmosphère est égal au rayonnement émis par l'atmosphère *(…)*
on s'aperçoit qu'il y a un ***équilibre*** */ en fait une compensation / il y a* ***autant de flux sortant que de flux entrant*** */ du coup ce / cela pourrait correspondre /* ***pourrait expliquer le fait que la température se stabilise*** */ à + 15 degrés (…)*



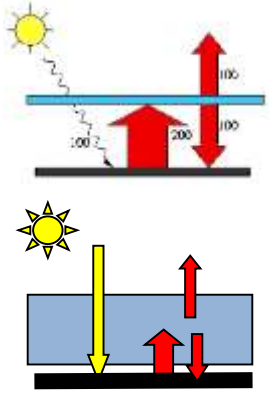
Problème du « 200 » résolu avec très peu de guidage

P : *deux cents / alors pourquoi euh le rayonnement infrarouge est / est égal au double du rayonnement (reçu)* ***ça je sais pas****(…)*

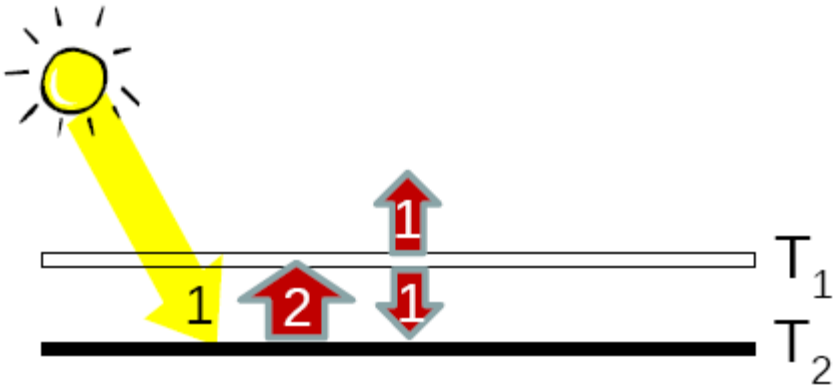
I *: si vous deviez faire un bilan / au niveau de la Terre / comment le faire ?*
P : ***en faisant la somme des flux euh / qui arrivent à la Terre / et la somme des flux qui sortent***
I : *qu'est-ce qui arrive sur la Terre ?*
P : ***deux types de flux / le rayonnement solaire / (qui) traverse la vitre / et le rayonnement qui est émis par la vitre***
I : *voilà donc / 100 plus 100 égal à 200*
P : *d'accord OK d'accord*

Quel(s) modèle(s) pour enseigner ? (1)

- modèle analogique de la serre agricole



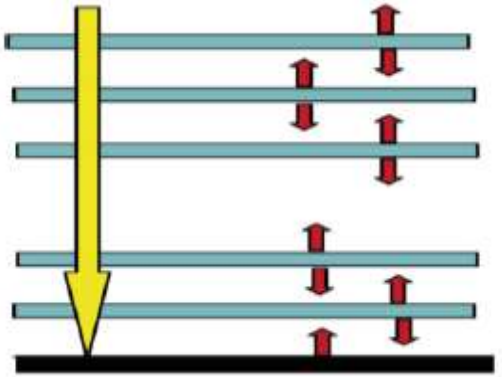
- modèle atmosphérique parfait



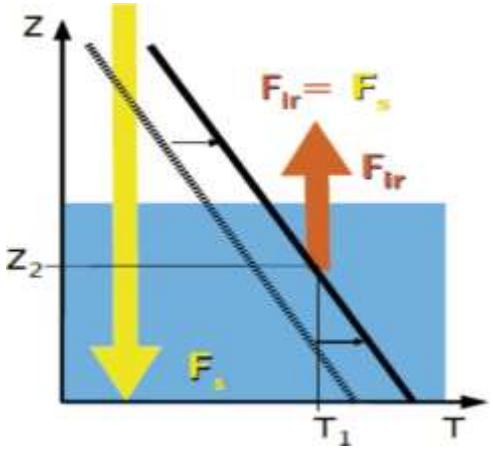
Comment augmenter l'effet de serre ?

Quel(s) modèle(s) pour enseigner ? (2)

- Modèle multicouche radiatif



- Modèle avec gradient thermique convectif

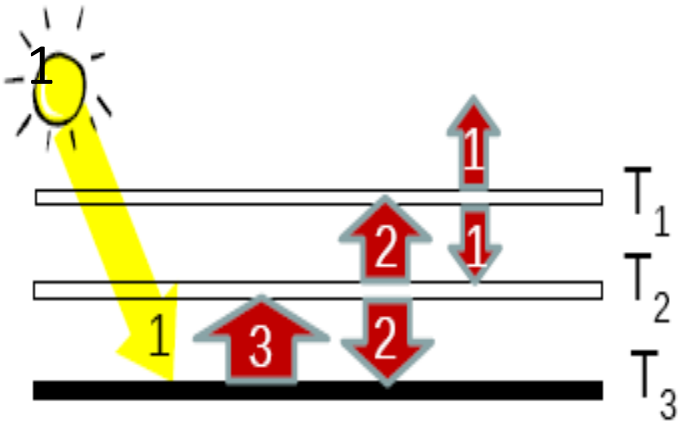


(Dufresne et Treiner 2011)

Modèle multicouche radiatif

Même si chaque vitre absorbe totalement le rayonnement infrarouge, possibilité d'une augmentation de la température de surface

- Mise en relation de la concentration en CO_2 (nombre de vitres) avec l'absorption
- Première approche d'un gradient de température vertical de l'atmosphère
- Mêmes difficultés d'enseignement-apprentissage que pour le modèle unicouche



(Extrait présentation J-L Dufresne)

Mais…

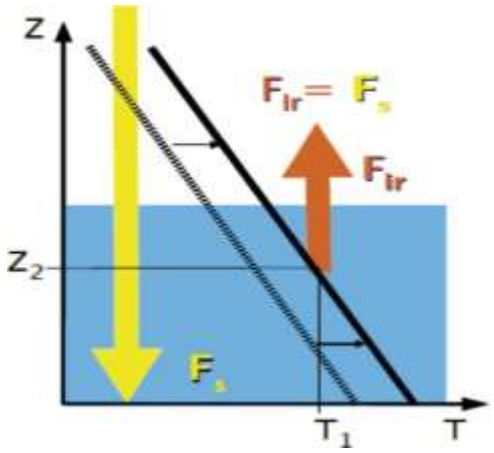
- Quelle limite pour la température de surface ?
- Désaccord avec les données (phénomènes convectifs ?)

➡ Possibilité de discussion du modèle

Modèle avec gradient thermique convectif

Un changement de configuration…

Modèle stratifié discret → Modèle continu avec gradient thermique vertical



(Dufresne et Treiner 2011)

Des contraintes imposées : **le gradient de température est indépendant des échanges radiatifs et de la concentration en CO_2**

Raisonnement basé sur l'émission vers l'espace à partir de « l'altitude d'émission Z_e » (Z_e ↗ quand CO_2 ↗ → F_{ir} ↘ car T_e ↘ d'où déséquilibre puis réchauffement global de l'atmosphère de façon à rétablir $F_{Ir} = F_S$ en conservant le même gradient thermique)

…un changement de difficultés

- Problème de la rétroaction (émission vers le sol) évacué
- Compréhension de la notion d'altitude d'émission
- Résolution graphique avec utilisation de la constance de la pente
- Des questions sur les contraintes à propos du gradient ?

CLIMAT, ATMOSPHERE ET HYDROSPHERE

Enjeux contemporains, enjeux éducatifs

A chaque modèle pour enseigner l'effet de serre, ses difficultés…

… des choix en connaissance de cause

Des pistes pour la formation ?

- Schématisation et modélisation, des objets de discussion et des outils de compréhension pour les élèves ?
- …
- …

A l'écoute de vos commentaires, questions, propositions…

Quelques références

- Bard E. (2004). Neuf clés pour comprendre l'effet de serre. *Les Dossiers de La Recherche* 17, 8-13.
- Besson U. et al. (2010) Studying the physical basis of global warming: thermal effects of the interaction between radiation and matter and greenhouse effect, *European Journal of Physics* , 01/2010; 31(2)
- Colin P. (2011). Enseignement et vulgarisation scientifique : une frontière en cours d'effacement ? Une étude de cas autour de l'effet de serre, *Spirale - Revue de Recherches en Education*, 48, 63-84.
- Colin P. (2013). Anticipating teachers'points of views before implementing. A case study about greenhouse effect, *10th ESERA conference*, September 2th-7th 2013, Nicosia, Cyprus.
- Colin P. & Tran Tat N. (2012). Difficile compréhension de l'effet de serre : comment concevoir un parcours d'enseignement apprentissage au lycée ? *Recherche en didactique des sciences et des technologies*, 4.
- Dufresne J-L & Treiner J (2011) L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit ? *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, Vol. 105, Juillet / Août / Septembre 2011.
- Ekborg M. & Areskoug M. (2006). How student teachers' understanding of the greenhouse effect develops during a teacher education program, *NorDiNa*, n°5, p. 17-28.
- Kattmann U., Duit R. Gropengießer H. and Komorek M. (1995) *Educational reconstruction – bringing together issues of scientific clarification and students' conceptions*. Paper presented at the annual meeting of the National Association of Research in ScienceTeaching, St Louis, MO, April.
- Rozier S. and Viennot L. (1991). Students' reasoning in elementary thermodynamics, *International Journal of Science Education,* 13 (2), pp 159-170.
- Levinson R. (2006) Towards a theoretical framework for teaching controversial socio-scientific issues, *International Journal of Science Education*, 28 (10), 1201-1224.
- Viennot L. (2011). L'explication-écho : forme privilégiée du rapprochement entre vulgarisation et enseignement, *Spirale – Revue de Recherches en Education*, 48 (85 – 101).
- Viennot L (2014). Thinking the Content for physics Education. Research and Practice, *Conference GIREP MPTL* , July 7 – 12, University of Palermo, Italy

Climat et modèles

Didier PAILLARD

LSCE - IPSL
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
Institut Pierre-Simon Laplace

QuickTime™ et un décompresseur sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

QuickTime™ et un décompresseur sont requis pour visionner cette image.

Modèle ?

Ou les deux faces de la Science (induction / déduction)

Modèle ?

Ou les deux faces de la Science (induction / déduction)

R. Feynman:

« Science is imagination in a straight jacket »

Modèle ?

Ou les deux faces de la Science (induction / déduction)

R. Feynman:

« Science is imagination in a straight jacket »

D. Mermin:

« Shut up and calculate ! »

Modèle ?

Ou les deux faces de la Science (induction / déduction)

R. Feynman:

« Science is imagination in a straight jacket »

D. Mermin:

« Shut up and calculate ! »

En climatologie

- théorie, compréhension des mécanismes
- simulations réalistes

Modèle ?

Ou les deux faces de la Science (induction / déduction)

R. Feynman:

« Science is imagination in a straight jacket »

D. Mermin:

« Shut up and calculate ! »

En climatologie

- théorie, compréhension des mécanismes
- simulations réalistes

Les modèles sont toujours FAUX

Le point essentiel: ils sont UTILES.

Climat ?

Climat : de la géographie ?

Etymologie : κλιμα ~ hauteur du Soleil
~ latitude

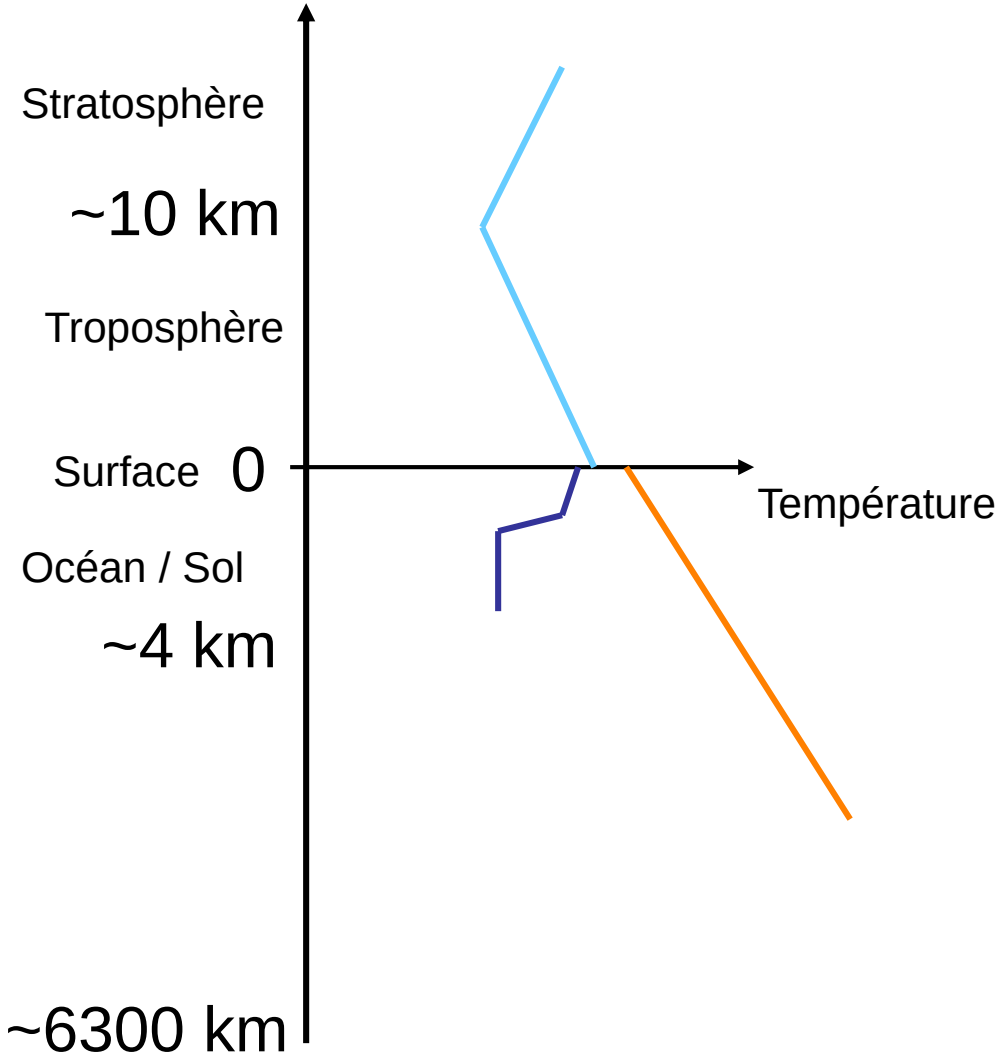
⇒ Variable dans l'espace, **FIXE** dans le temps

Définition du dictionnaire:

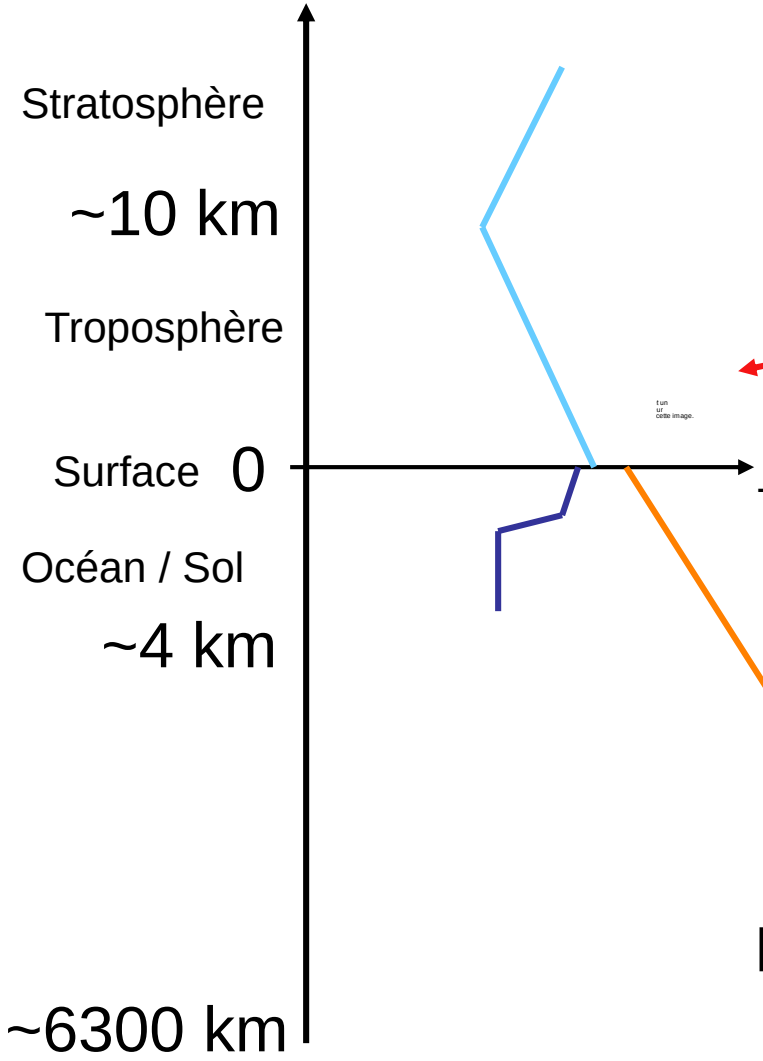
- moyenne (statistique) sur 30 ans

Quelle est la température de la Planète ?

Quelle est la température de la Planète ?



Quelle est la température de la Planète ?



1,50 m

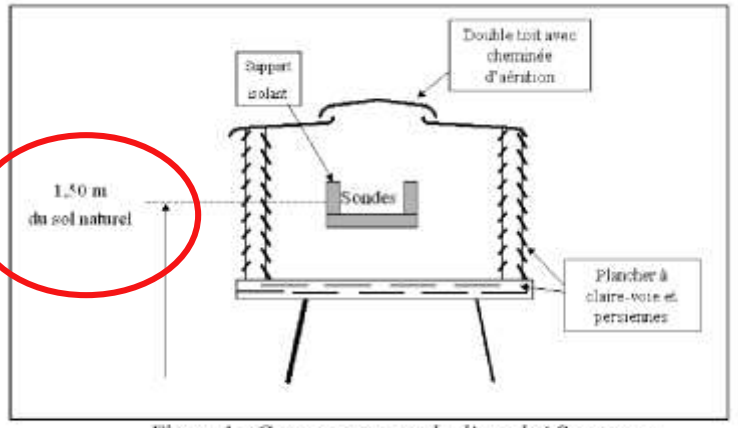


Figure 1 : *Coupe transversale d'un abri Stevenson,*
© Météo-France, extrait de cours de l'Ecole Nationale de la Météorologie

… là où l'on met le thermomètre !

Les météorologues parlent de
« température de surface »

Climat : de la géographie ?

Le « climat » n’est pas défini à partir d’un objet physique.

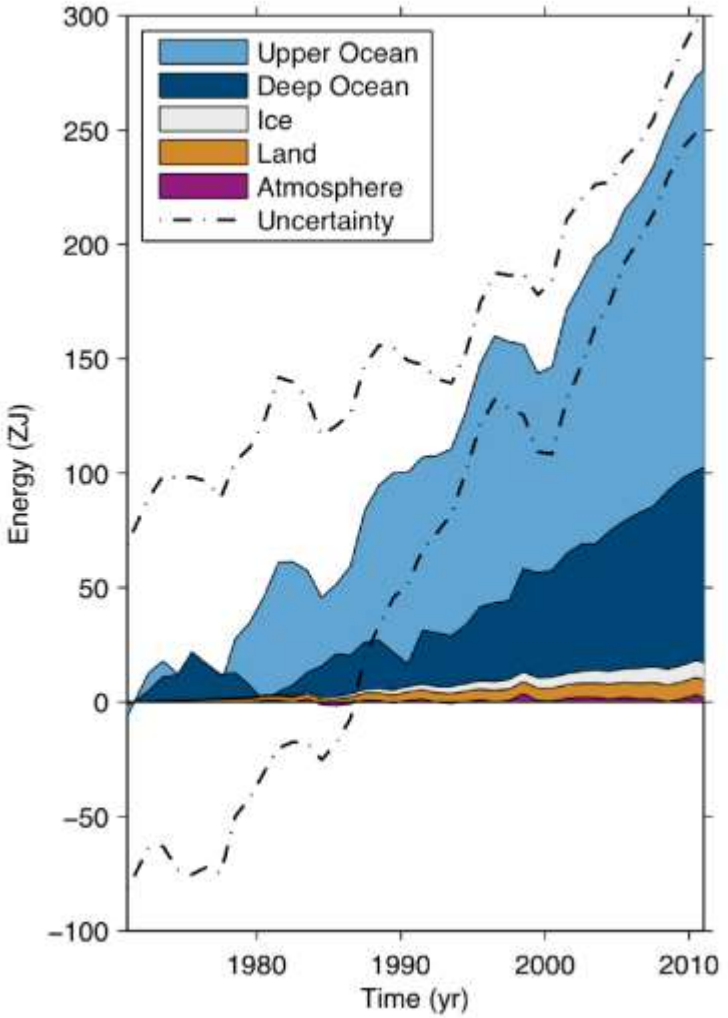
Il est défini à travers ses conséquences sur notre environnement.

Pertinence physique ?

$$\Delta E = M\, c_p\, \Delta T$$

$M_{océan} = 1.4\ 10^{21}$ kg
$M_{atm} = 5.1\ 10^{18}$ kg

$c_p = 4.18$ kJ/kg/K (eau)
$c_p = 1.0$ kJ/kg/K (air)



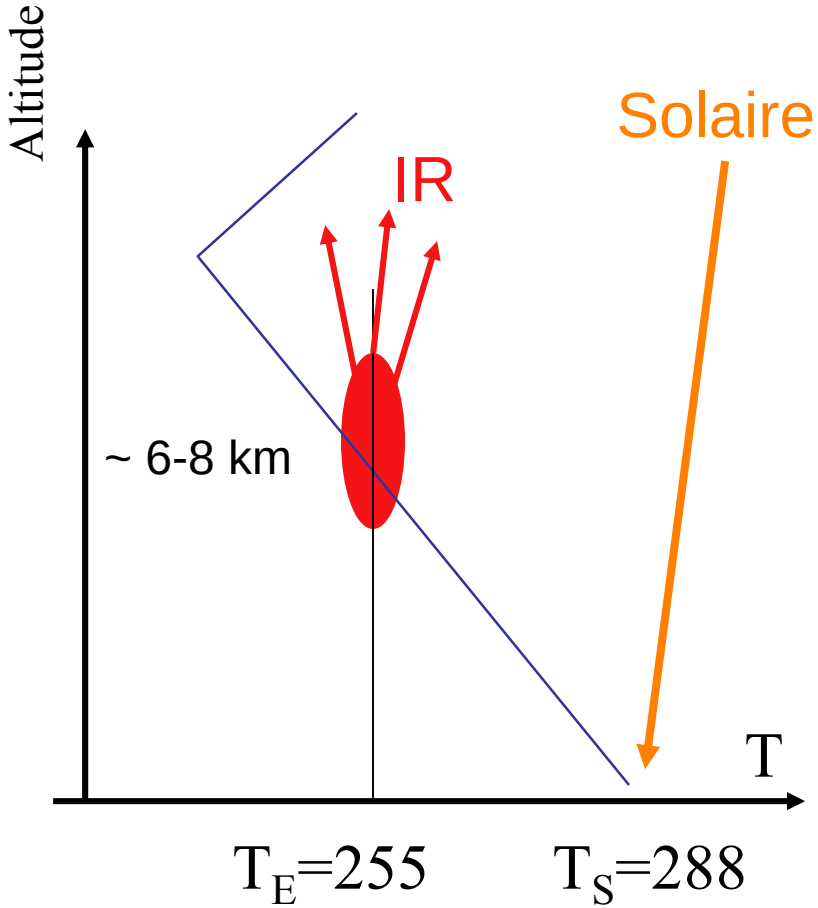
Box 3.1, Figure 1: Plot of energy change inventory in ZJ (1 ZJ = 10^{21} J) within distinct components of Earth's climate system relative to 1971 and from 1971–2010 unless otherwise indicated. See text for data sources. Ocean warming dominates, with the upper ocean (light blue, above 700 m) contributing more than the deep ocean (dark blue, below 700 m; with below 2000 m starting from 1992); ice melt (light grey; for glaciers and ice caps, Greenland starting from 1992, Antarctica starting from 1992, and Arctic sea ice from 1979–2008); continental (land) warming (orange); and atmospheric warming (purple; starting from 1979) make smaller contributions. The ocean uncertainty also dominates the total uncertainty (dot-dashed lines about the sum of all five components at 90% confidence intervals).

Pertinence physique ?

QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

Pertinence physique ?

La Terre, vue de l'espace,
en infrarouge



QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

À l'équilibre:

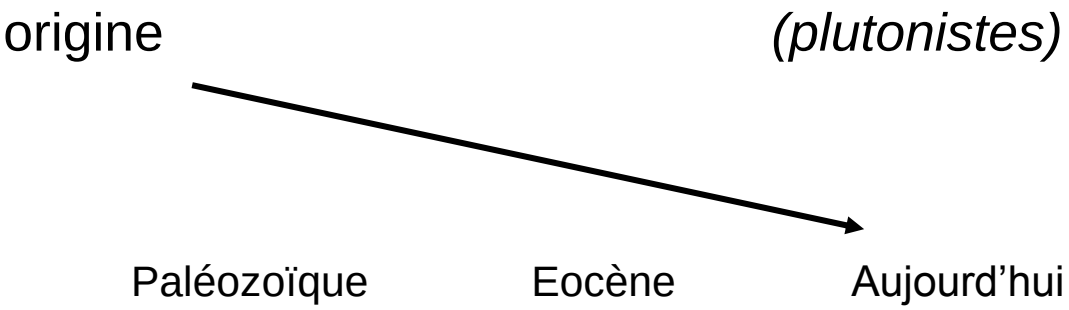
$$(1-\alpha)\, S_c/4 = \sigma\, T_E^4$$
$$= (1-\varepsilon)\, \sigma\, T_S^4$$

($S_c = 1365$ W/m^{-2}, $\alpha = 0.31$, $\varepsilon = 0.4$)

Climat : de la physique ?

Au début du XIX^{ème} siècle, la notion de changement climatique reste très spéculative.

Point de vue dominant (parmi les scientifiques) :
- lent refroidissement depuis les origines



Ages glaciaires : la première preuve de changement climatique

Striations

« Roches moutonnées »
(de Saussure, 18th century)

(from S. Couteran, PhD thesis)

Le dernier maximum glaciaire : ~ 5° C en moins

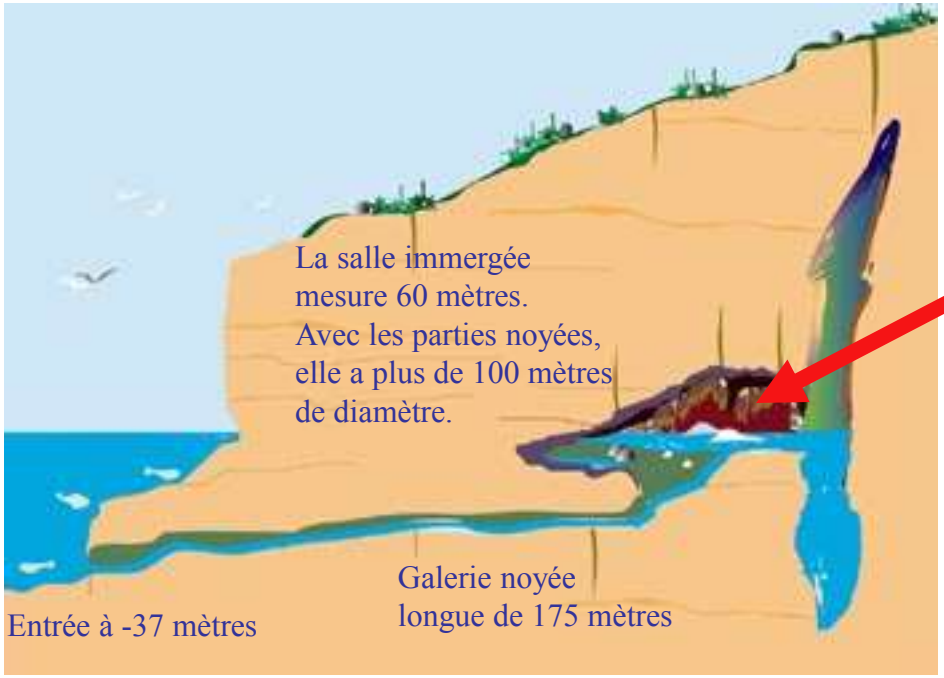
Niveau marin plus bas (~ -120 m)

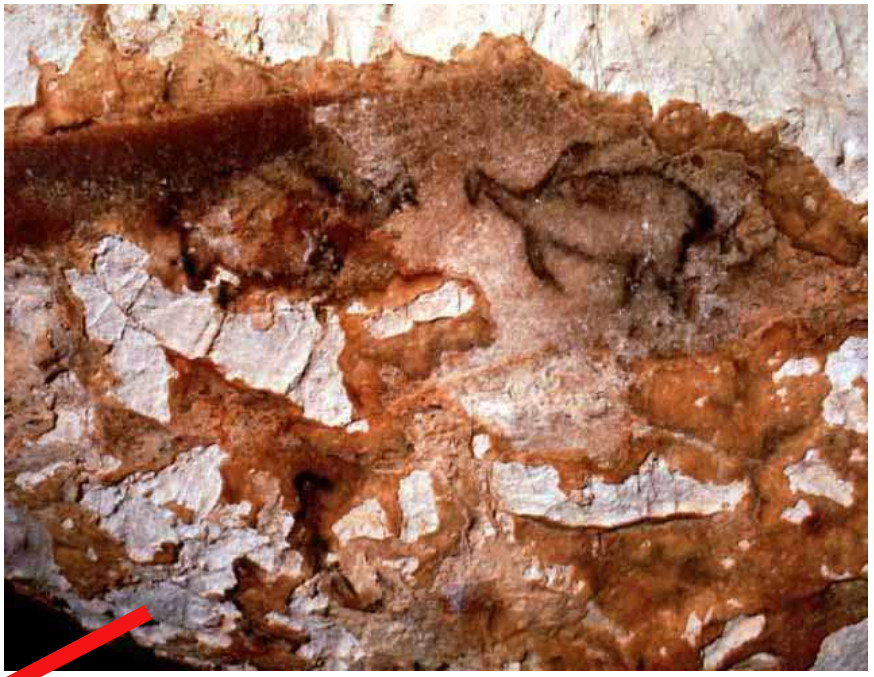
Calottes de glace de l'hémisphère nord

QuickTime™ and a
decompressor
are needed to see this picture.

QuickTime™ and a
decompressor
are needed to see this picture.

Le dernier maximum glaciaire : ~ 5° C en moins





© A. Chené, CCJ/CNRS

La grotte Cosquer

http://www.culture.gouv.fr/culture/archeosm/fr/fr-cosqu2.htm

Deux théories concurrentes

(cf. Fourier, 1824) CO_2

Astronomie

(3ème mouvement de la Terre, Hipparchus, 127 BC)

Ebelmen, 1845

QuickTime™ et un décompresseur requis pour visionner cette imag

Adhémar, 1842

QuickTime™ et un décompresseur sont requis pour visionner cette image.

Tyndall, 1861, 1863

Croll, 1864,1867

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) sont requis pour visionner cette image.

Arrhenius, 1896

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) requis pour visionner cette image.

Ekholm, 1901

Chamberlin, 1897,1899

Milankoviç, 1920, 1941

Arrhenius, 1896

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

APRIL 1896.

XXXI. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* *By* Prof. SVANTE ARRHENIUS *.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) sont requis pour visionner cette image.

I should certainly not have undertaken these tedious calculations if an extraordinary interest had not been connected with them. In the Physical Society of Stockholm there have been occasionally very lively discussions on the probable causes of the Ice Age; and these discussions have, in my opinion, led to the conclusion that there exists as yet no satisfactory hypothesis that could explain how the climatic conditions

$0.67 \times CO_2$ $2.0 \times CO_2$

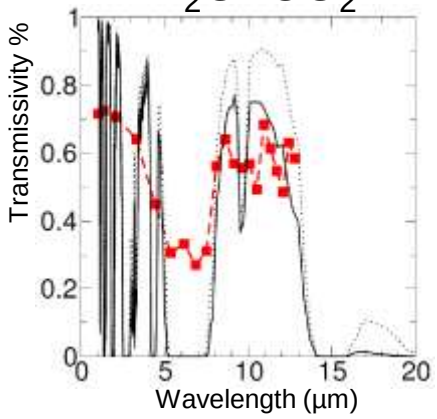
Latitude.	Carbonic Acid = 0·67.					Carbonic Acid = 1·5.					Carbonic Acid = 2·0.					Carbonic Acid = 2·5.					Carbonic Acid = 3·0.				
	Dec.–Feb.	March–May.	June–Aug.	Sept.–Nov.	Mean of the year.	Dec.–Feb.	March–May.	June–Aug.	Sept.–Nov.	Mean of the year.	Dec.–Feb.	March–May.	June–Aug.	Sept.–Nov.	Mean of the year.	Dec.–Feb.	March–May.	June–Aug.	Sept.–Nov.	Mean of the year.	Dec.–Feb.	March–May.	June–Aug.	Sept.–Nov.	Mean of the year.
70	−2·9	−3·0	−3·4	−3·1	−3·1	3·3	3·4	3·8	3·6	3·52	6·0	6·1	6·0	6·1	6·05	7·9	8·0	7·9	8·0	7·93	9·1	9·3	9·4	9·4	9·3
60	−3·0	−3·2	−3·4	−3·3	−3·22	3·4	3·7	3·6	3·8	3·62	6·1	6·1	5·8	6·1	6·02	8·0	8·0	7·6	7·9	7·87	9·3	9·5	8·9	9·5	9·3
50	−3·2	−3·3	−3·3	−3·4	−3·3	3·7	3·8	3·4	3·7	3·65	6·1	6·4	5·5	6·0	5·95	8·0	7·9	7·0	7·9	7·7	9·5	9·4	8·6	9·2	9·17
40	−3·4	−3·4	−3·2	−3·3	−3·32	3·7	3·6	3·3	3·5	3·52	6·0	5·8	5·4	5·6	5·7	7·9	7·6	6·9	7·3	7·42	9·3	9·0	8·2	8·8	8·82
30	−3·3	−3·2	−3·1	−3·1	−3·17	3·5	3·3	3·2	3·5	3·47	5·6	5·4	5·0	5·2	5·3	7·2	7·0	6·6	6·7	6·87	8·7	8·3	7·5	7·9	8·1
20	−3·1	−3·1	−3·0	−3·1	−3·07	3·5	3·2	3·1	3·2	3·23	5·2	5·0	4·9	5·0	5·02	6·7	6·6	6·3	6·6	6·52	7·9	7·5	7·2	7·5	7·52
10	−3·1	−3·0	−3·0	−3·0	−3·02	3·2	3·2	3·1	3·1	3·15	5·0	5·0	4·9	4·9	4·95	6·6	6·4	6·3	6·4	6·42	7·4	7·3	7·2	7·3	7·3
0	−3·0	−3·0	−3·1	−3·0	−3·02	3·1	3·1	3·2	3·2	3·15	4·9	4·9	5·0	5·0	4·95	6·4	6·4	6·6	6·6	6·5	7·3	7·3	7·4	7·4	7·35
−10	−3·1	−3·1	−3·2	−3·1	−3·12	3·2	3·2	3·2	3·2	3·2	5·0	5·0	5·2	5·1	5·07	6·6	6·6	6·7	6·7	6·65	7·4	7·5	8·0	7·6	7·62
−20	−3·1	−3·2	−3·3	−3·2	−3·2	3·2	3·2	3·4	3·3	3·27	5·2	5·3	5·5	5·4	5·33	6·7	6·8	7·0	7·0	6·87	7·9	8·1	8·6	8·3	8·22
−30	−3·3	−3·3	−3·4	−3·4	−3·35	3·4	3·5	3·7	3·5	3·52	5·5	5·6	5·8	5·6	5·62	7·0	7·2	7·7	7·4	7·32	8·6	8·7	9·1	8·8	8·8
−40	−3·4	−3·4	−3·3	−3·4	−3·37	3·6	3·7	3·8	3·7	3·7	5·8	6·0	6·0	6·0	5·95	7·7	7·9	7·9	7·9	7·85	9·1	9·2	9·4	9·3	9·25
−50	−3·2	−3·3	—	—	—	3·8	3·7	—	—	—	6·0	6·1	—	—	—	7·9	8·0	—	—	—	9·4	9·5	—	—	—
−60																									

-3° C +5° C

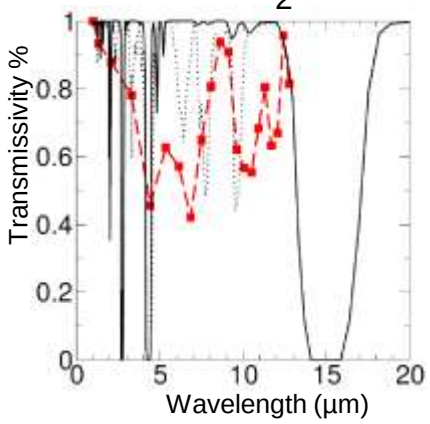
Arrhenius, 1896

Données spectroscopiques insuffisantes

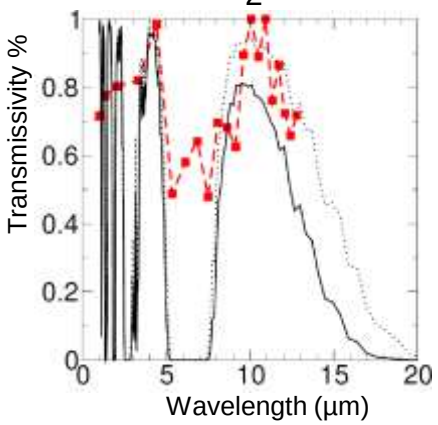
H_2O+CO_2

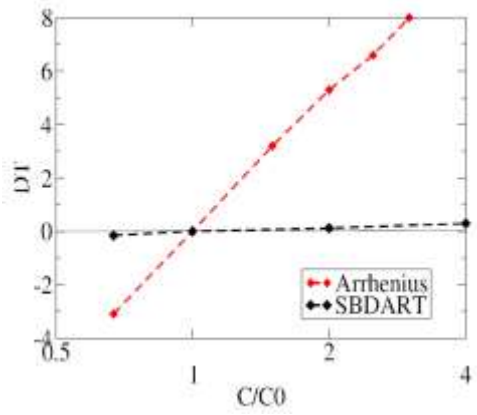


CO_2



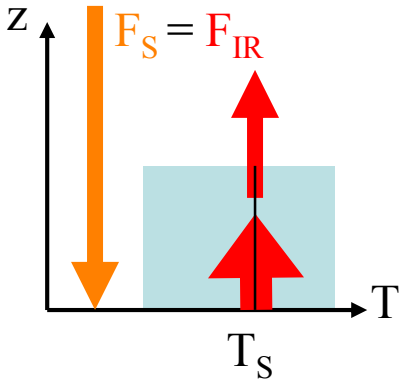
H_2O

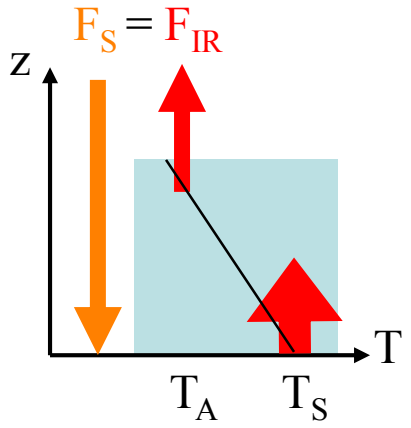




=> Sur-estimation du rôle du CO_2

Modèle radiatif trop simple





=> Sous-estimation du rôle du CO_2

(from J-L Dufresne,2009)

Deux théories concurrentes

(cf. Fourier, 1824) CO_2

Astronomie

(3ème mouvement de la Terre, Hipparchus, 127 BC)

Ebelmen, 1845

QuickTime™ et un décompresseur requis pour visionner cette imag

Adhémar, 1842

QuickTime™ et un décompresseur sont requis pour visionner cette image.

Tyndall, 1861, 1863

Croll, 1864,1867

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) sont requis pour visionner cette image.

Arrhenius, 1896

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (LZW) requis pour visionner cette image.

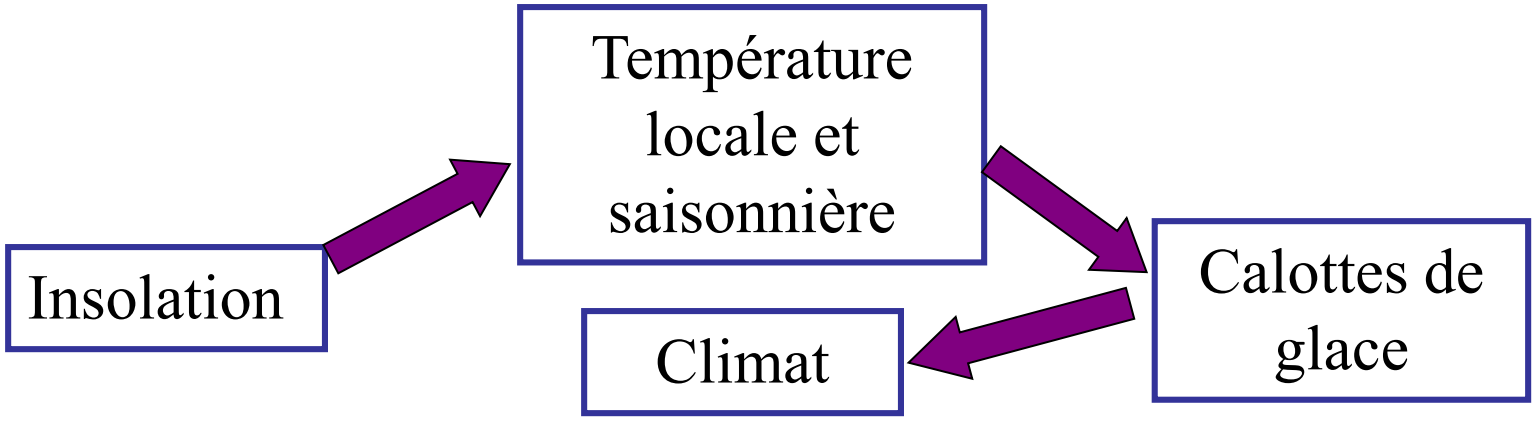
Ekholm, 1901

Chamberlin, 1897,1899

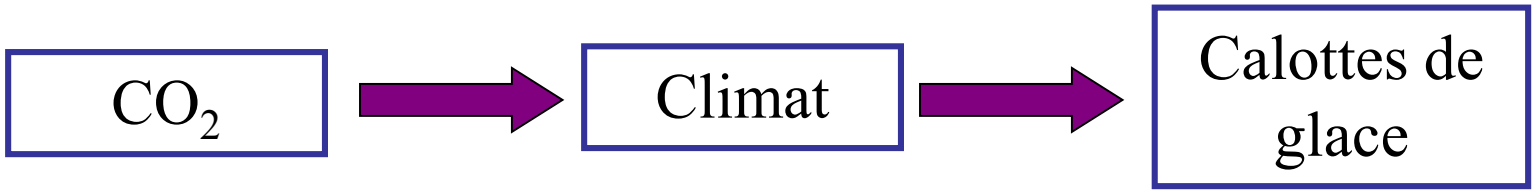
Milankoviç, 1920, 1941

!! Différence essentielle !!

Théorie astronomique

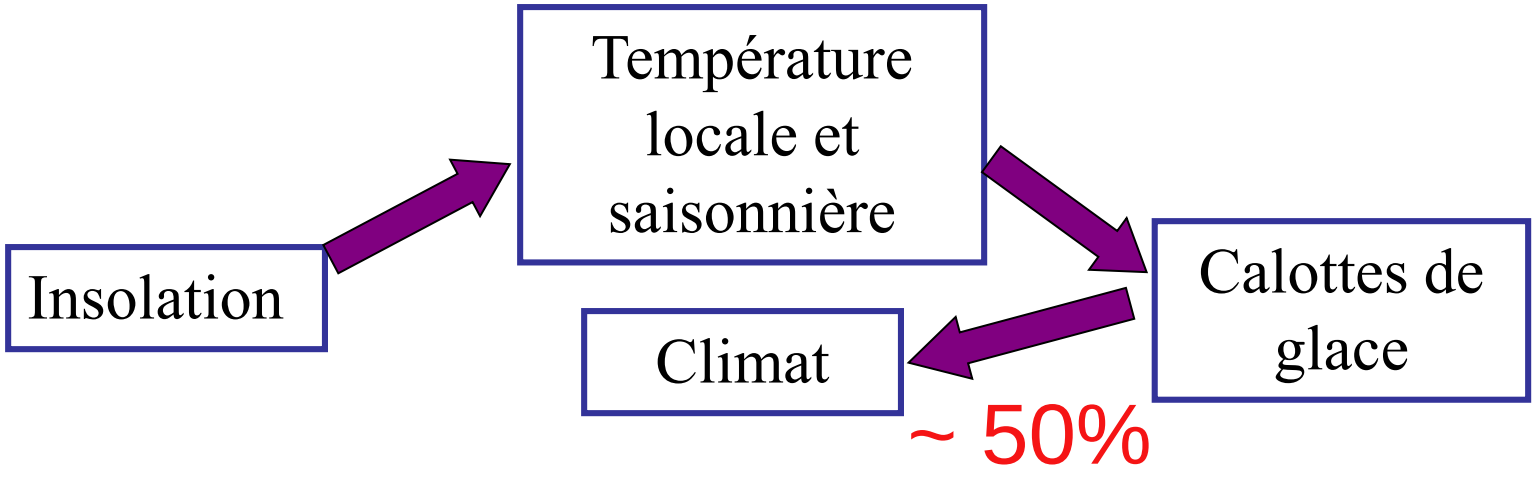


Théorie géochimique (CO_2)

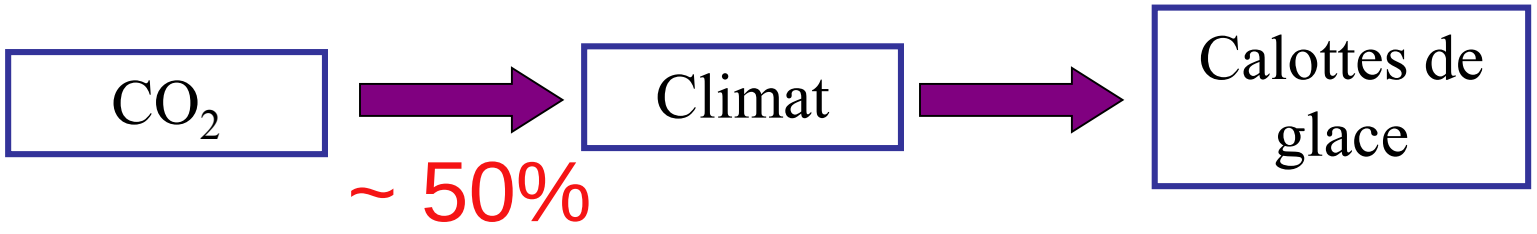


!! Différence essentielle !!

Théorie astronomique



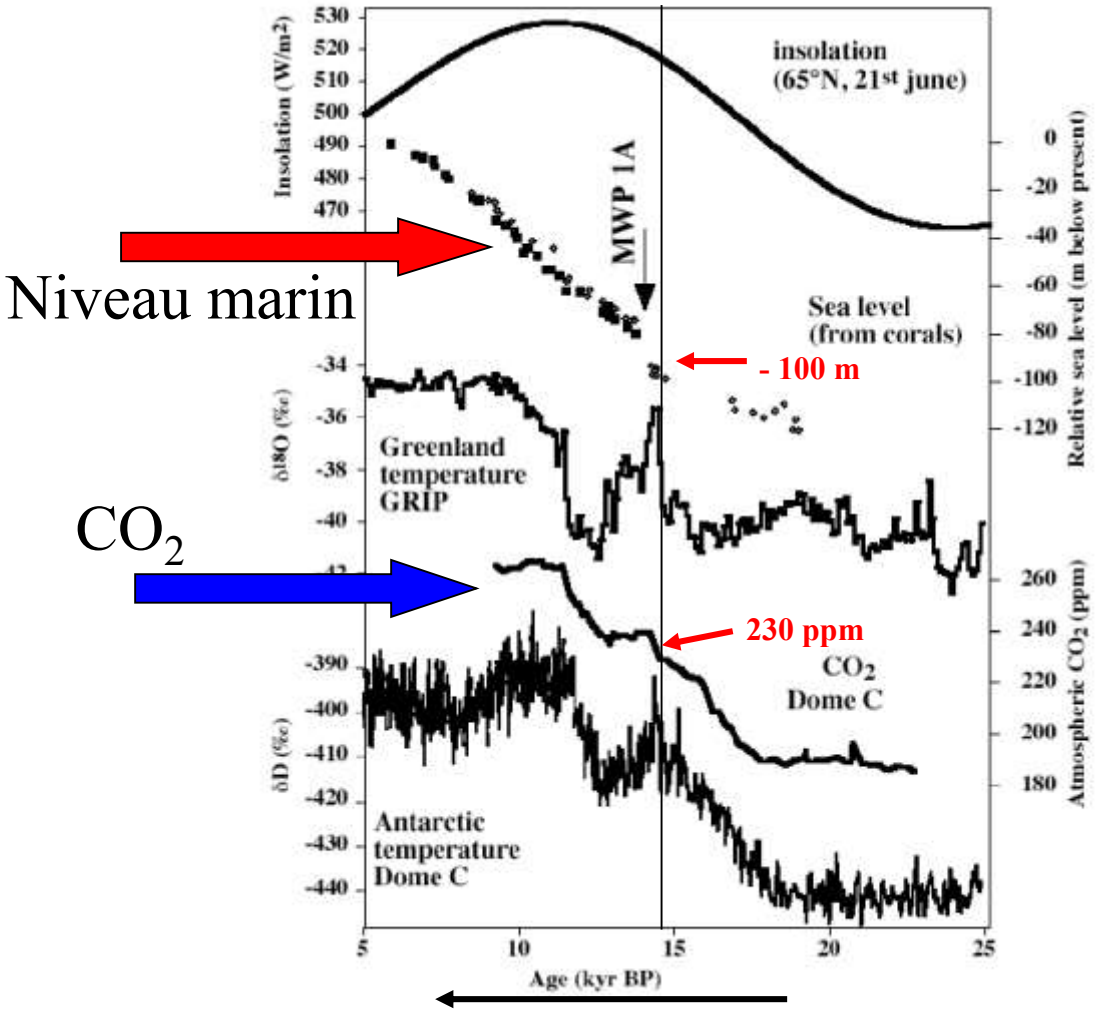
Théorie géochimique (CO_2)



La dernière déglaciation

L'augmentation des températures dans l'hémisphère sud et du CO_2 atmosphérique précèdent la fonte des glaces

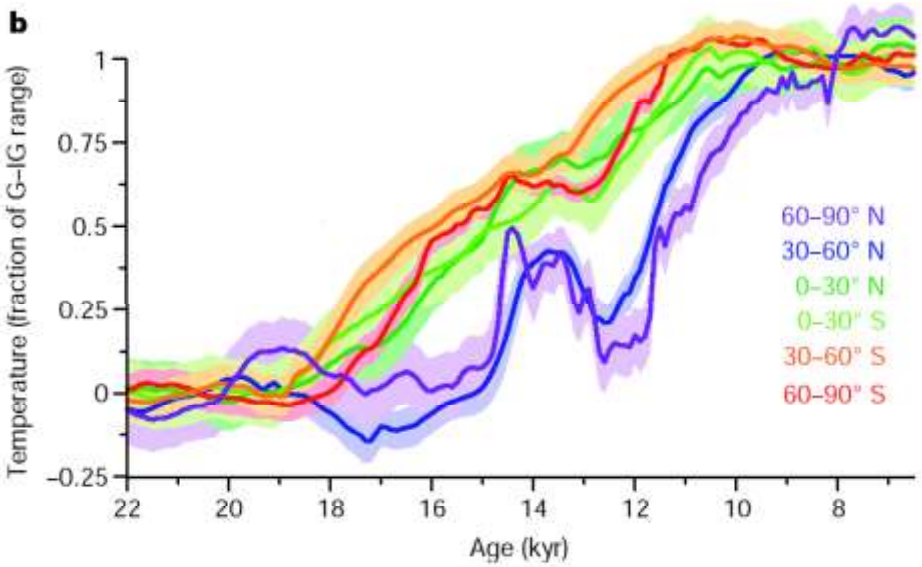
(Pichon et al. 1992; Sowers et al 1993)



La dernière déglaciation

L'augmentation des températures dans l'hémisphère sud et du CO_2 atmosphérique précèdent la fonte des glaces

(Shakun et al, 2012;
Parrenin et al. 2013)



Astronomie ou CO_2 ?

Théorie astronomique

+ Hays et al. (1976), Variations in the earth's orbit: **pacemakers** of the ice ages

+ Base physique solide pour la théorie de Milankovitch

- La périodicité prédite (41 000 ans) n'est pas celle qui domine (100 000 ans)

- Relation de phase pendant les déglaciations

Théorie géochimique (CO_2)

+ Le CO_2 change durant les cycles glaciaire-interglaciaire

+ Base physique solide pour l'effet de serre

+ Le CO_2 précède durant les déglaciations

- Pas de périodicité a priori, besoin de causes initiales, dynamique mal connue

Glaciations/déglaciations… en résumé

- La dernière déglaciation est l'archétype du changement climatique

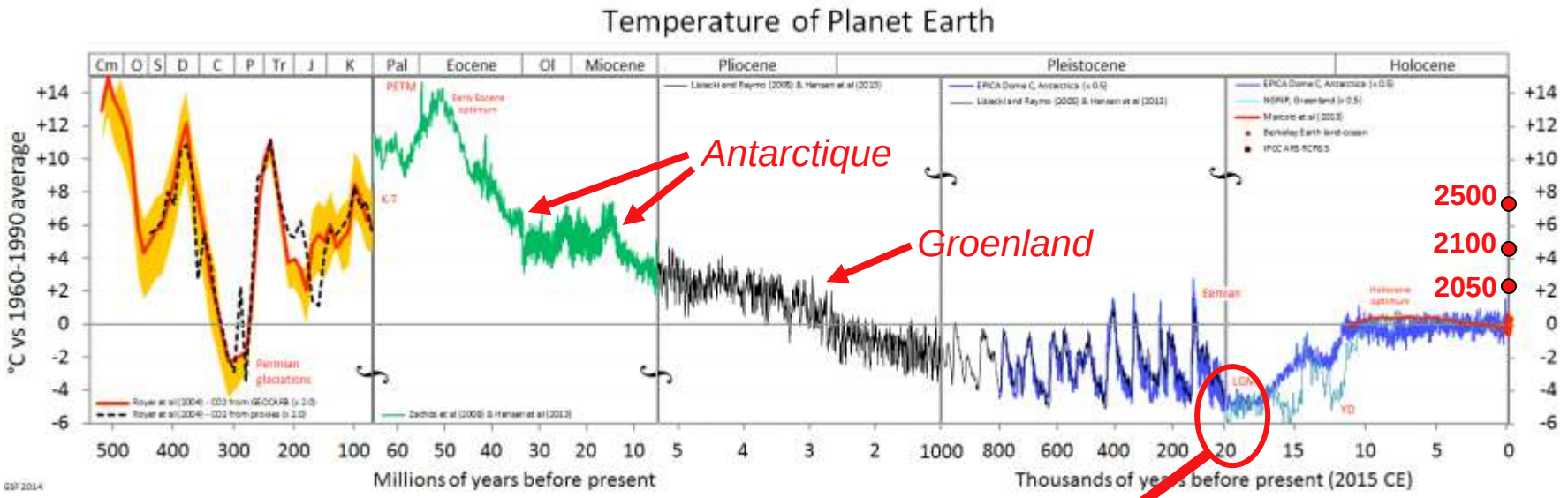
- La théorie astronomique est insuffisante

- Le CO_2 a un rôle moteur dans cette transition

- La théorie détaillée (qui fera la synthèse) reste encore à construire

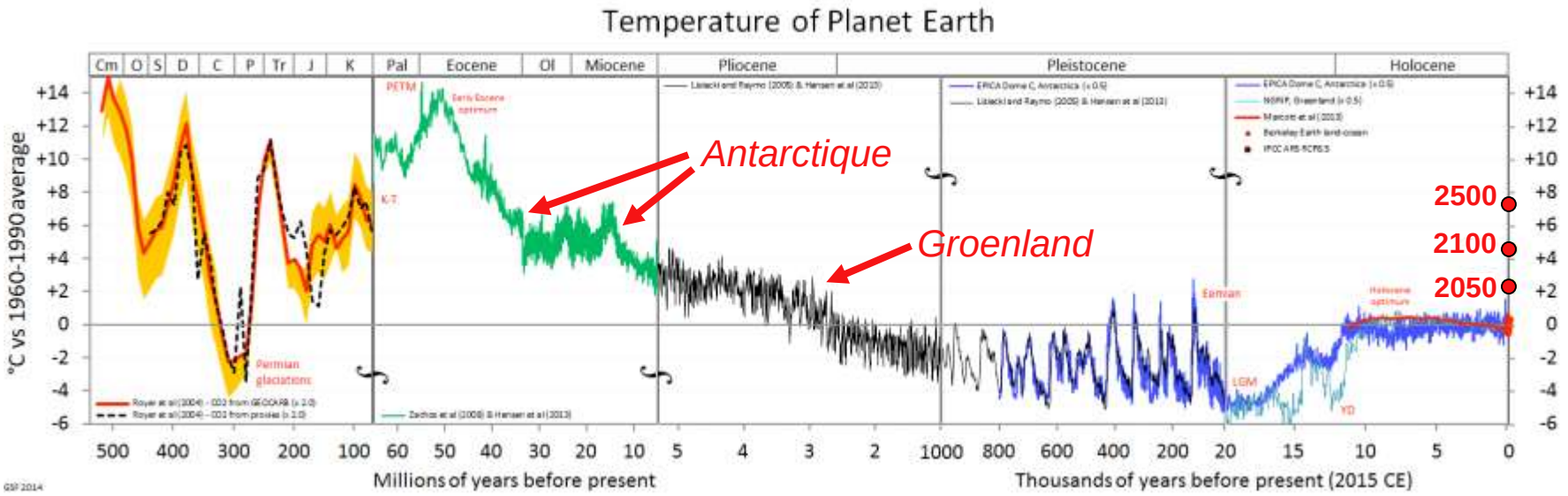
(Paillard, Quat. Sci. Rev., 2015)

Paléoclimats



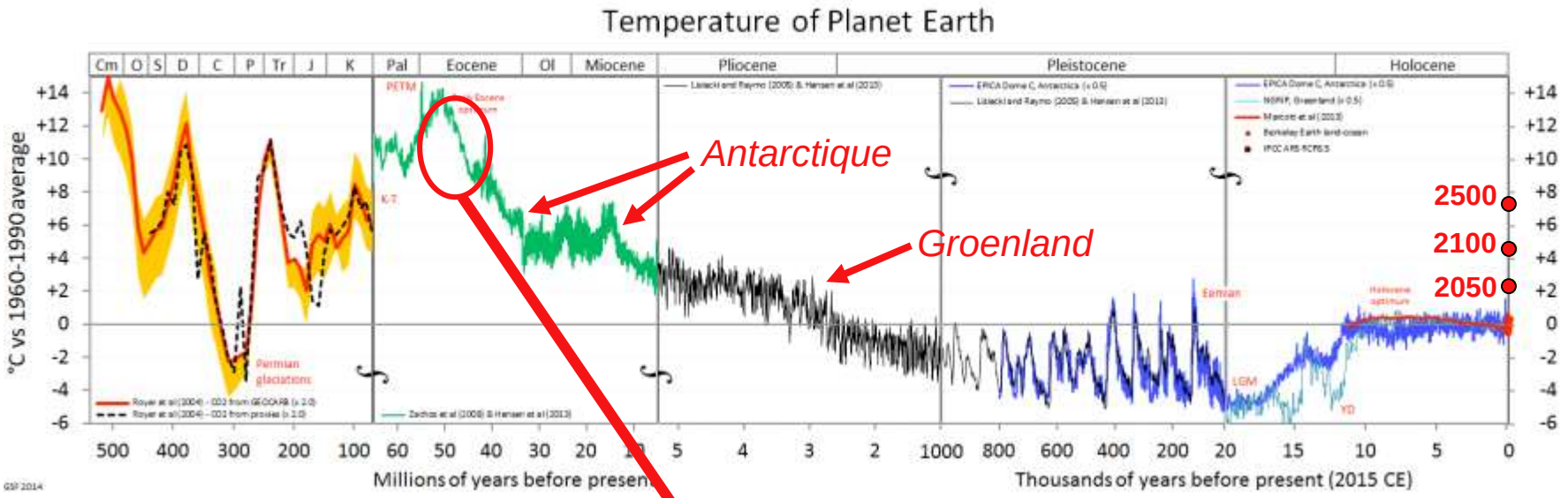
Le dernier maximum glaciaire : ~ 5° C en moins

Paléoclimats



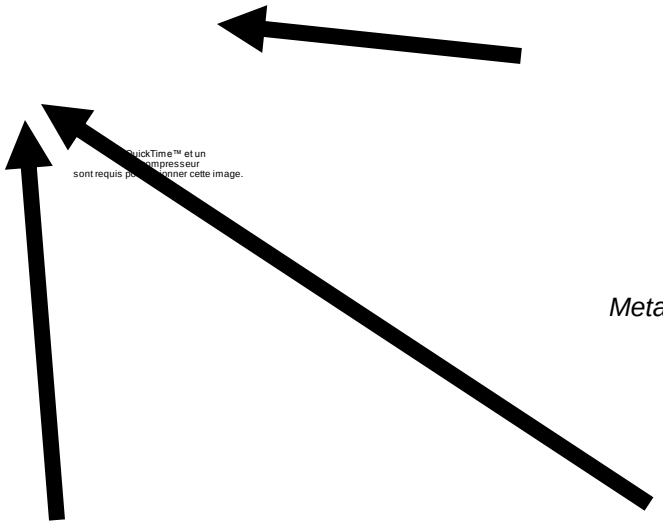
- Une longue histoire de changements climatiques
- Des écosystèmes actuels adaptés aux climats froids
- … amplitude et vitesse du changement actuel

Paléoclimats



L'éocène : ~ 8 - 10° C en plus

L’éocène : ~ 8 - 10° C en plus



Metasequoia occidentalis

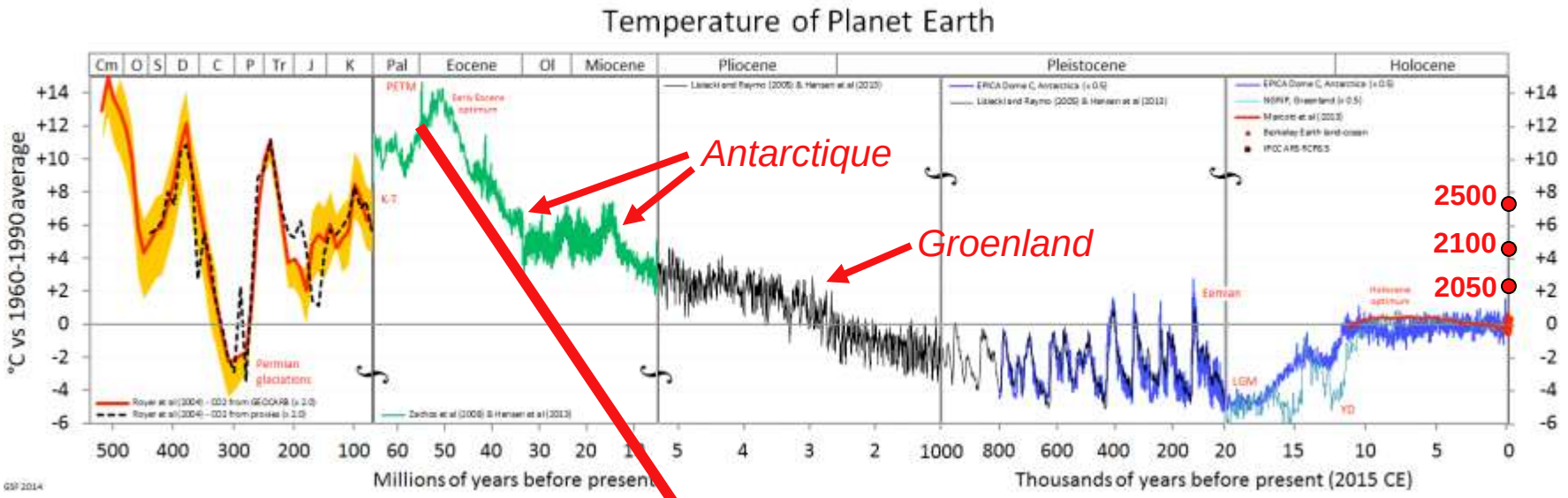
Forêt arctique
Eocène de type tropical

- palmiers, conifères,…

- crocodiles, tortues, mammifères, …

Vertèbres de crocodilien

Paléoclimats

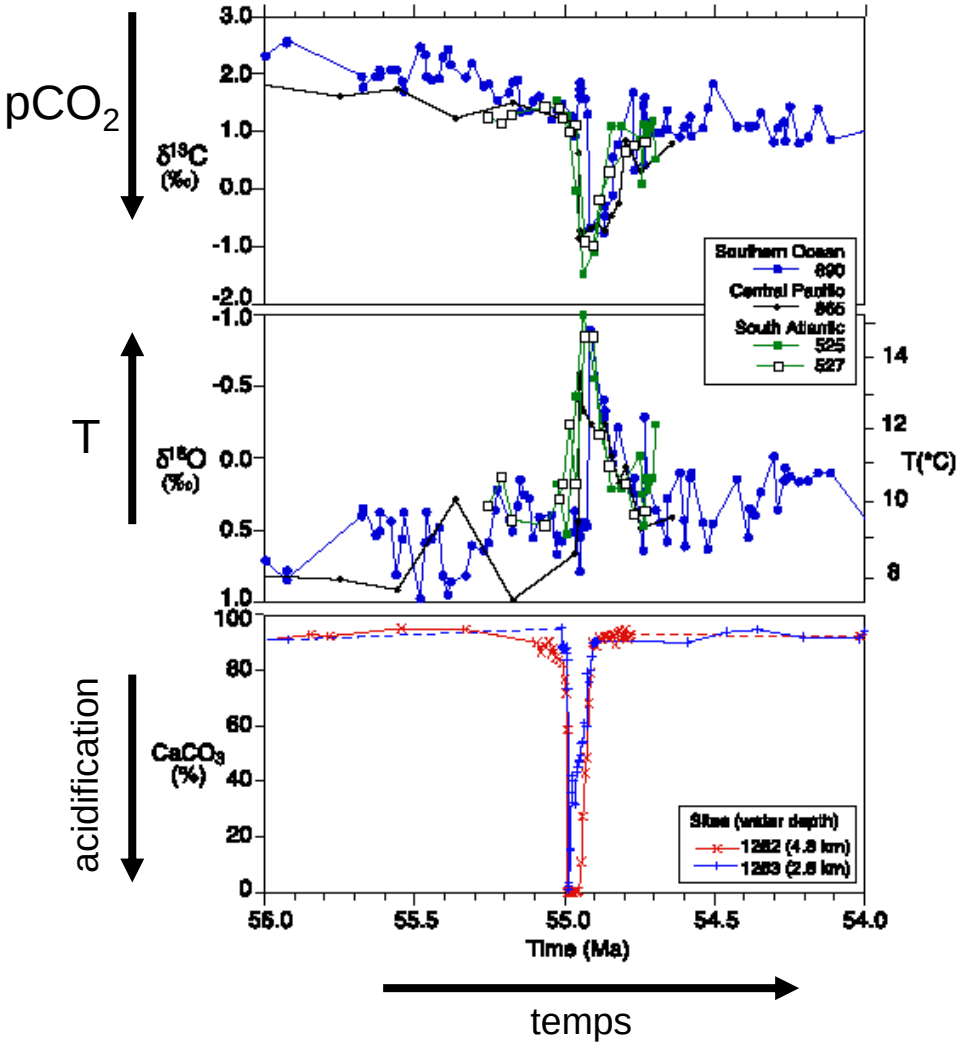


La transition Paléocène-Eocène

La transition Paléocène-Eocène

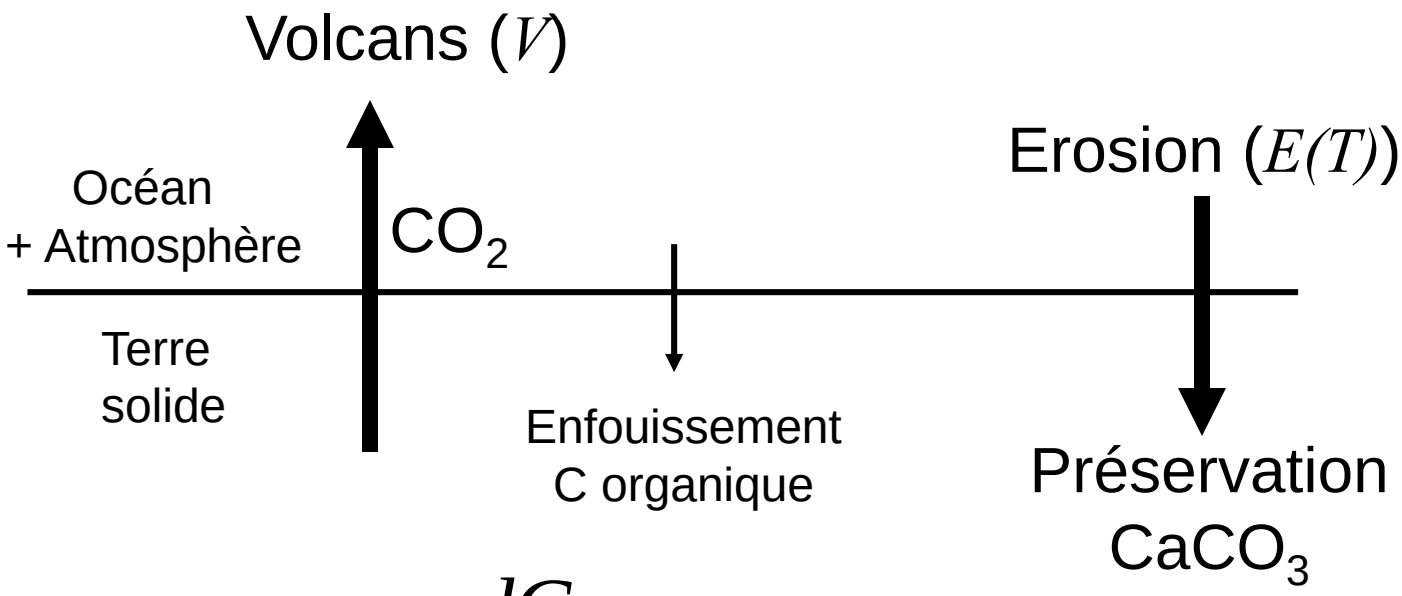
- Réponse impulsionelle à une perturbation en gaz à effet de serre (~ 1000 - 5000 PgC)

- Temps caractéristique ~ 200 000 ans



(Zachos et al, Science 2001)

Le thermostat : le carbone

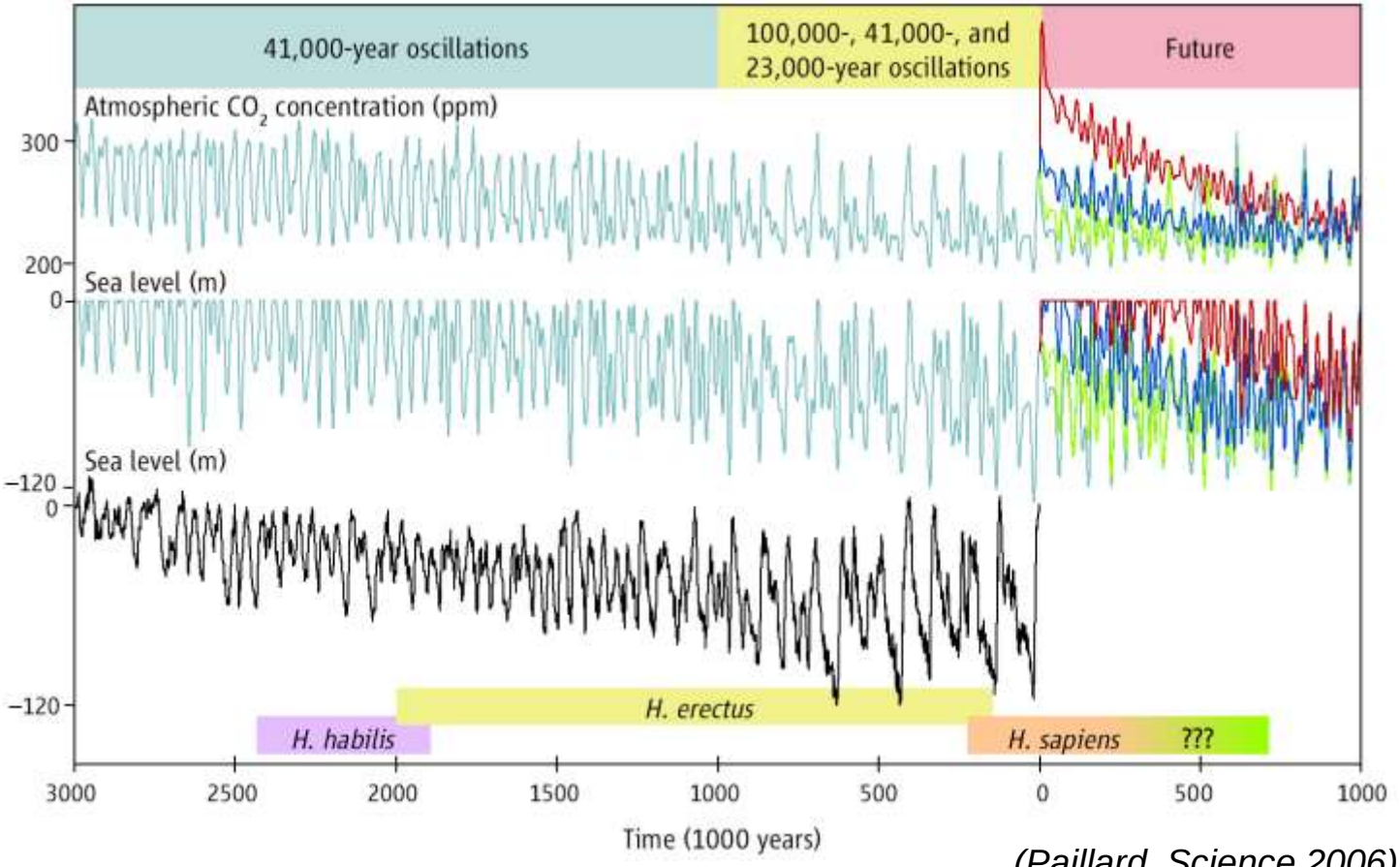


$$\frac{dC}{dt} = V - E(T)$$

- Régulation à long terme (~ 200 000 ans)
  … rapide à l'échelle géologique

Le futur : 10^6 ans

-3.10^{6}ans 0 10^{6}ans



(Paillard, Science 2006)

Modèle conceptuel: calottes de l'hémisphère nord + pCO_2

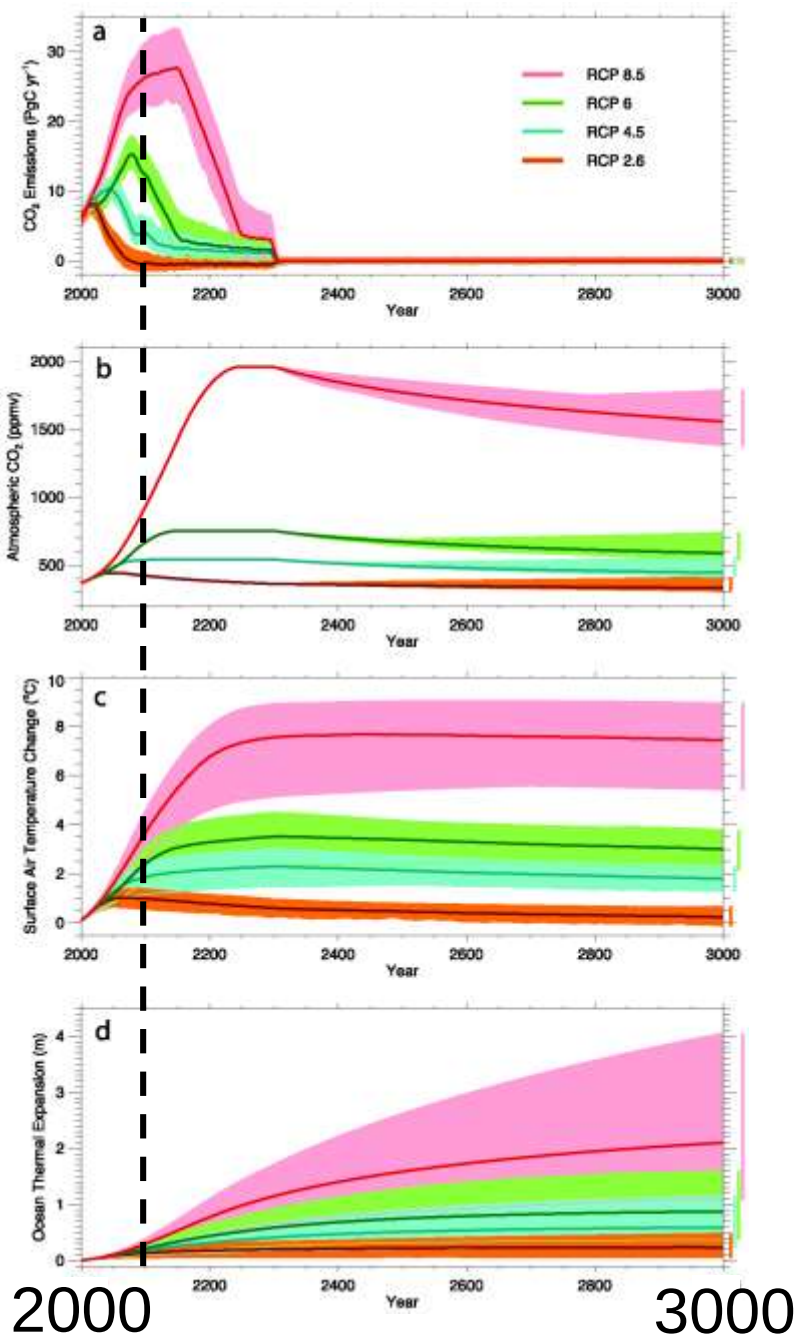
Le futur : 10^3 ans

- Les émissions de GES sont concentrées sur le XXI^e - XXII^e siècle

- La concentration atmosphérique est liée à l'intégrale des émissions

- L'inertie thermique de l'océan est considérable (~ 10^3 ans)

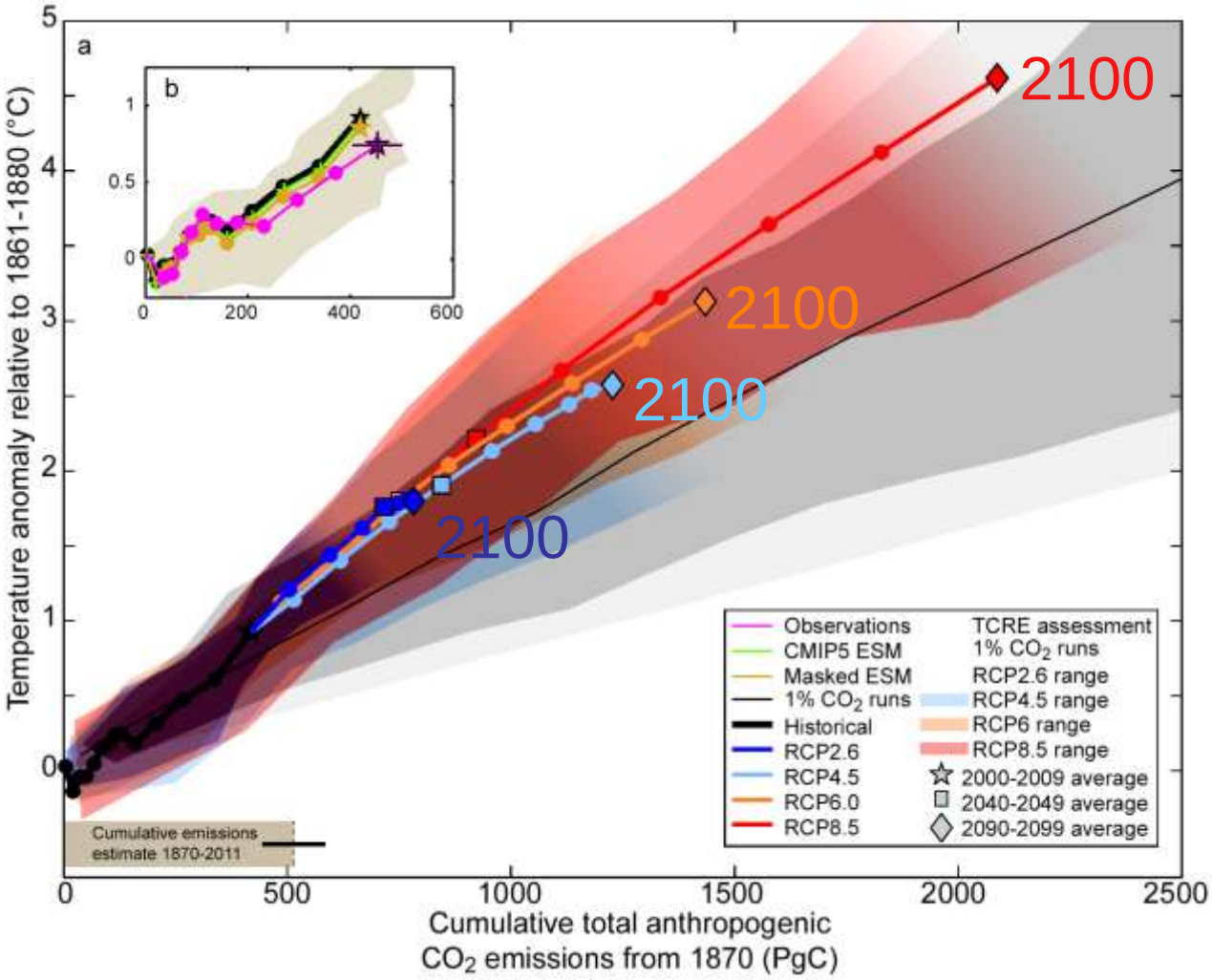
- Les composantes « lentes » (eg. calottes de glace,..) ne sont ici pas prises en compte



(Zickfeld et al, 2013)

Le futur : 10^2 ans

500 PgC = +1° C



(IPCC 2014)

Echelles de temps

Cycle du carbone

Calottes

Végétation

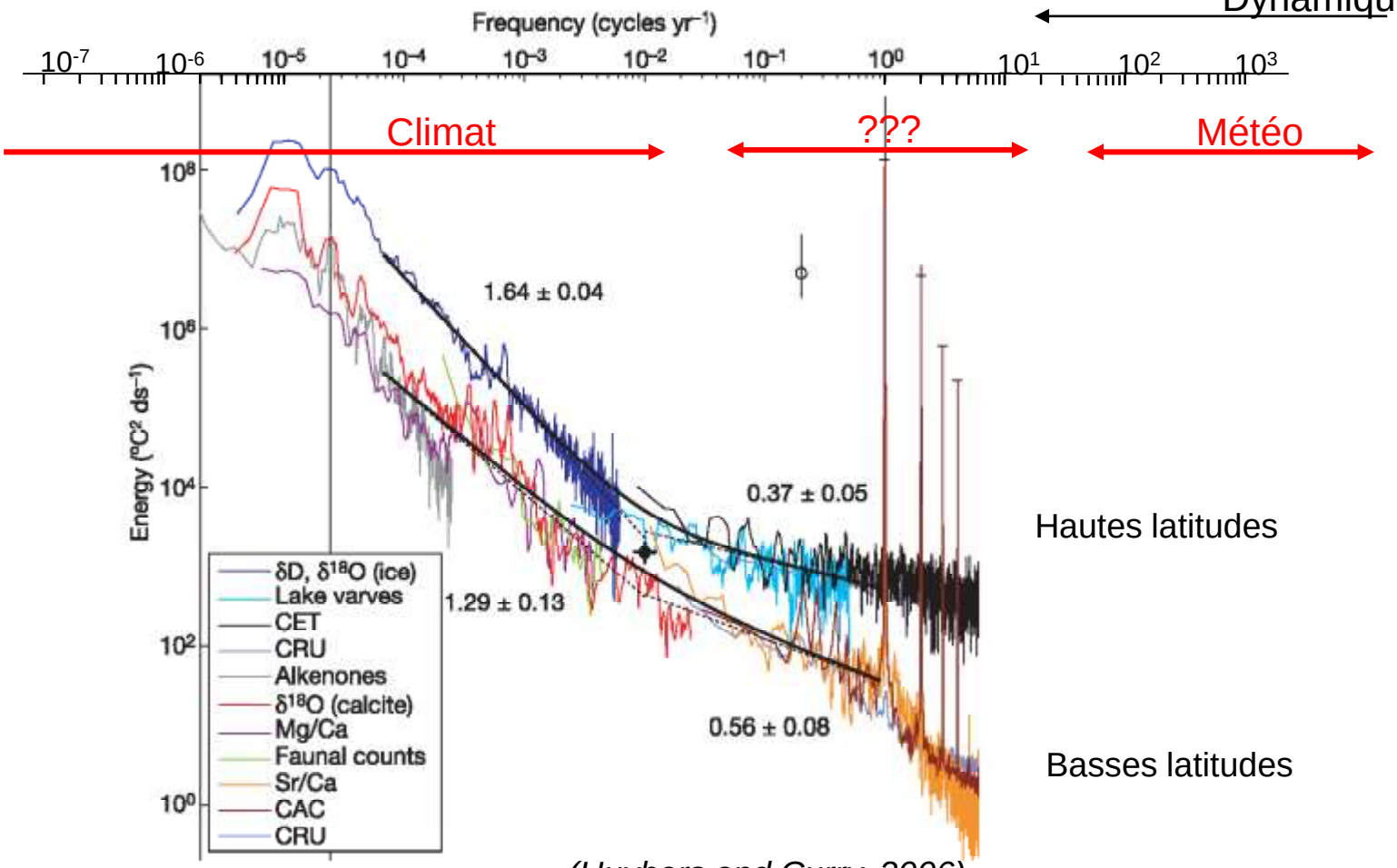
Tectonique

Océan profond

Océan surface

Chimie atmos.

Dynamique atmos.

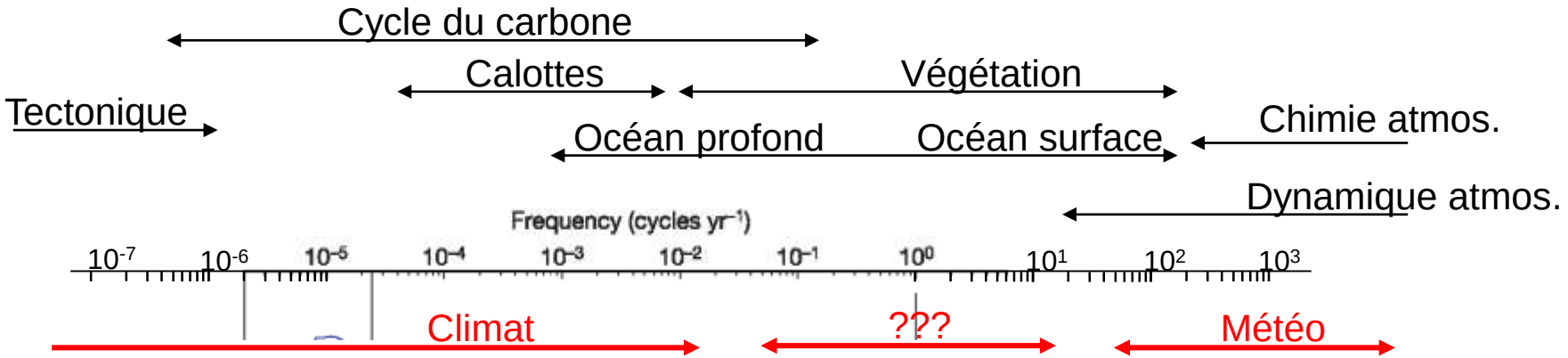


Hautes latitudes

Basses latitudes

(Huybers and Curry, 2006)

Echelles de temps



GCMs

EMICs

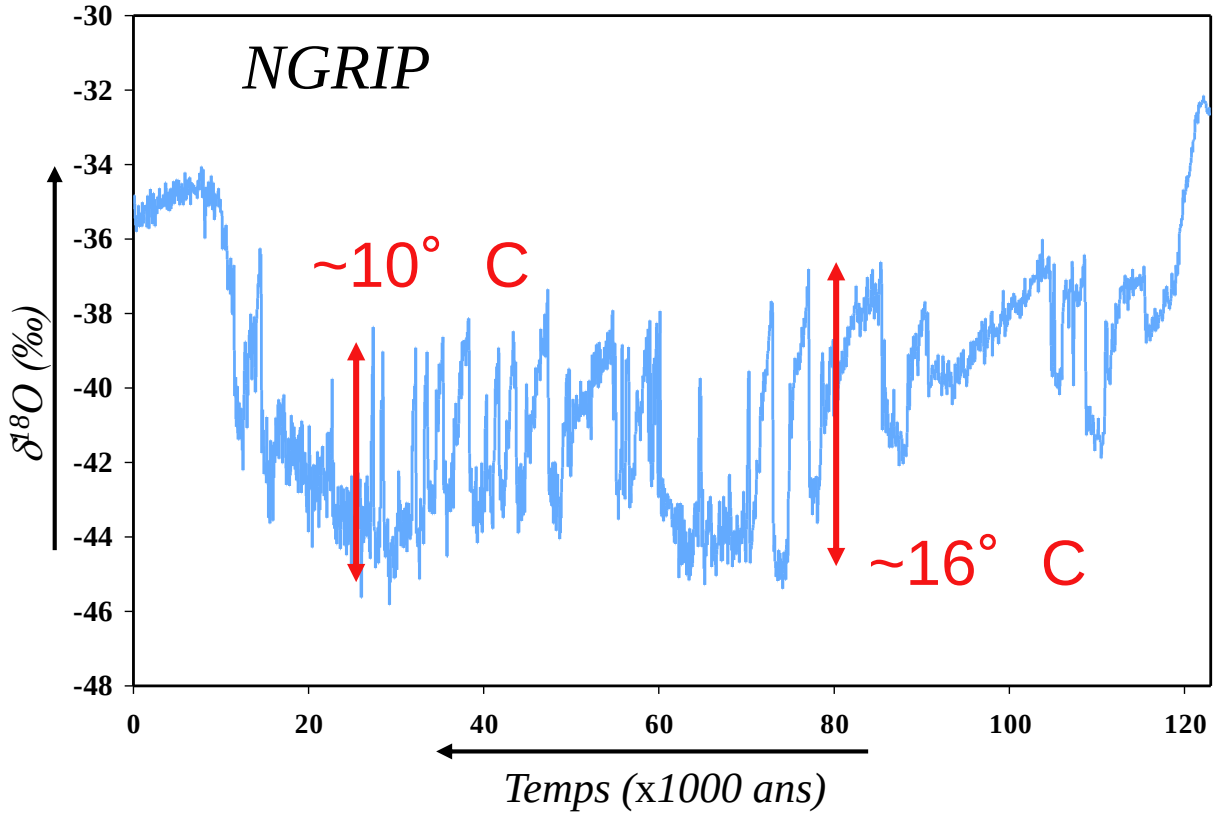
Les surprises ne sont pas exclues…

Les surprises ne sont pas exclues…

Des variations climatiques abruptes de grande amplitude

- +10-16° C
- transitions

  < 100 ans



Les surprises ne sont pas exclues…

Des remontées abruptes du niveau marin…

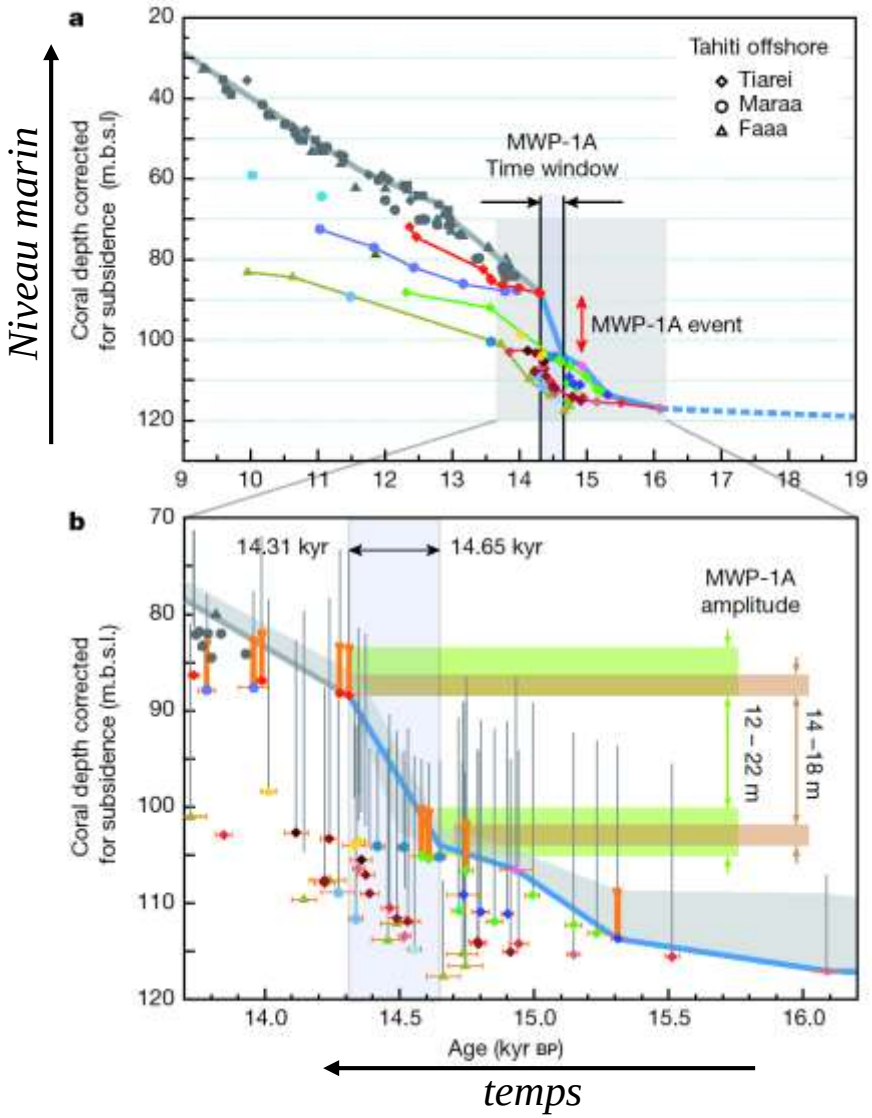
… comme durant la dernière déglaciation:

~ 14 600 ans avant le présent

- + 20 m en 300 ans

  (> 6 m/siècle)

- + 10° au Groenland en 50 ans



(Deschamps et al., Nature 2012)

Conclusion

Cycle du carbone

Calottes

Végétation

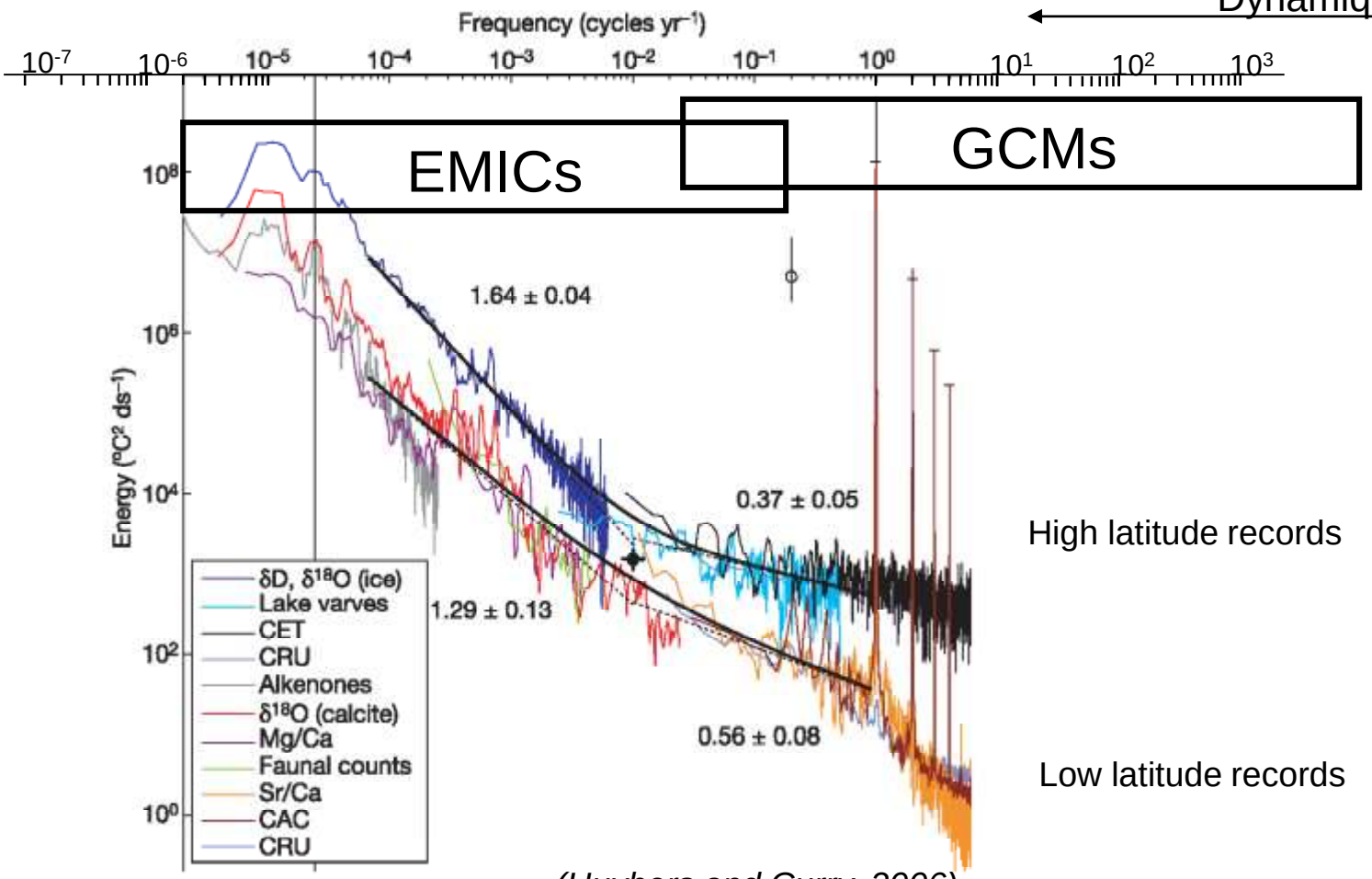
Tectonique

Océan profond

Océan surface

Chimie atmos.

Dynamique atmos.



High latitude records

Low latitude records

(Huybers and Curry, 2006)

Merci

Colloque AFPSVT

Climat, Atmosphère et Hydrosphère

Enjeux contemporains, enjeux éducatifs

Les énergies renouvelables: Utilisation et perspective

Sylvain LASSONDE

Doctorant LMD – Ecole Doctorale de Polytechnique

Mardi 7 juillet 2015

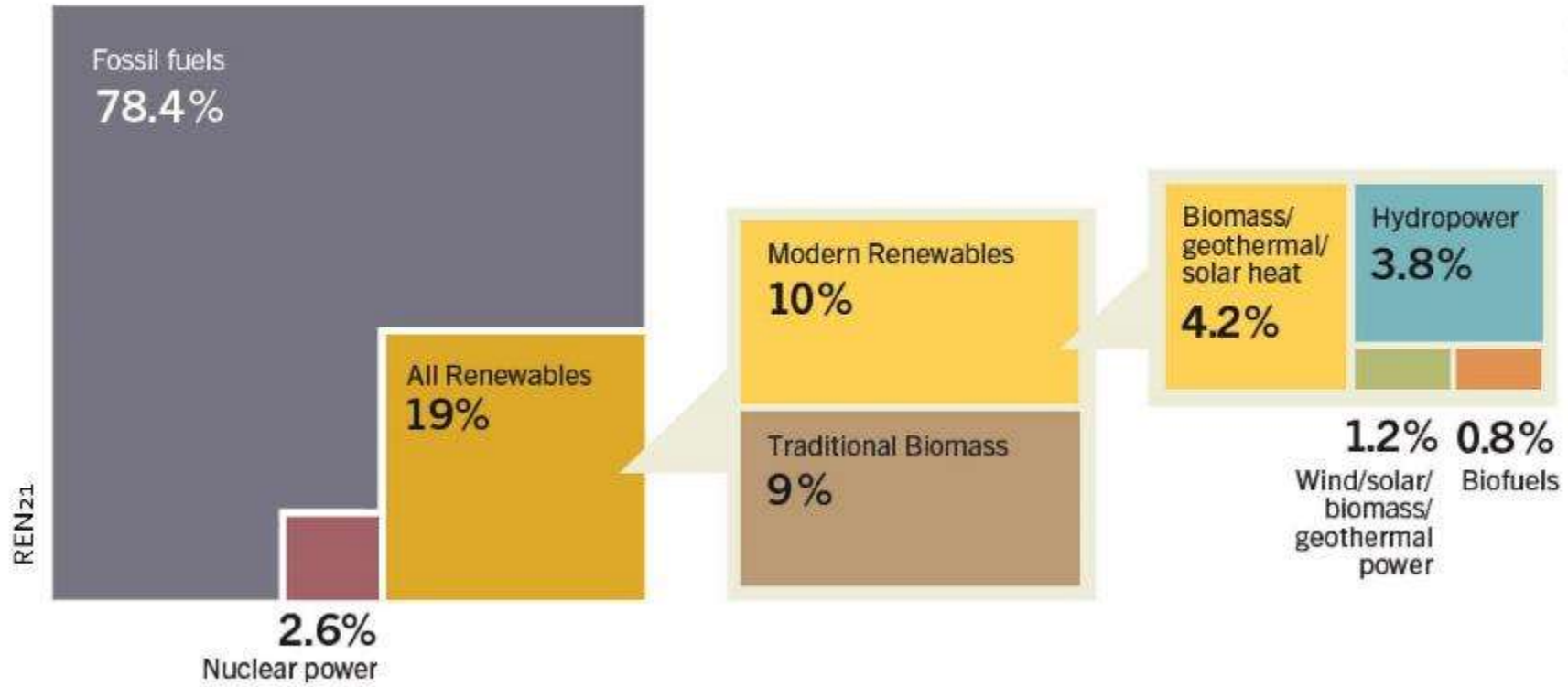
Institut Pierre Simon Laplace

LMD

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY

Introduction

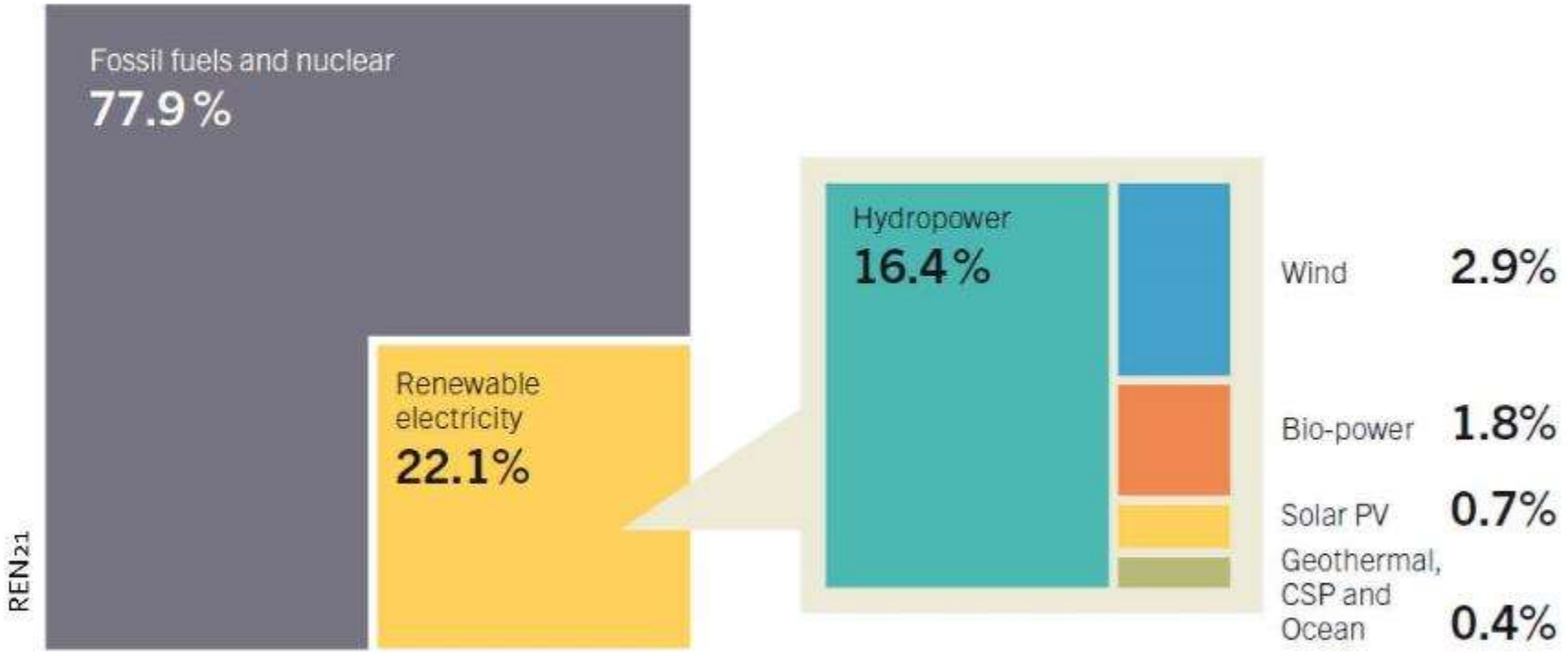
Consommation finale d'énergie au niveau mondial en 2012



19 % de l'énergie mondiale consommée est d'origine renouvelable

Introduction

Production d' électricité au niveau mondial en 2013



19 % de l'énergie mondiale consommée est d'origine renouvelable

22 % de la production mondiale d'électricité est d'origine renouvelabl

Introduction

- La demande énergétique ↗
- Les émissions de GES ↗ (280ppm -> 404ppm CO_2)
  - Accord internationaux ↘ émissions de GES (Kyoto, 3x20 EU, COP21?)
  - ↗ a long terme baril de pétrole → besoin indépendance énergétique +

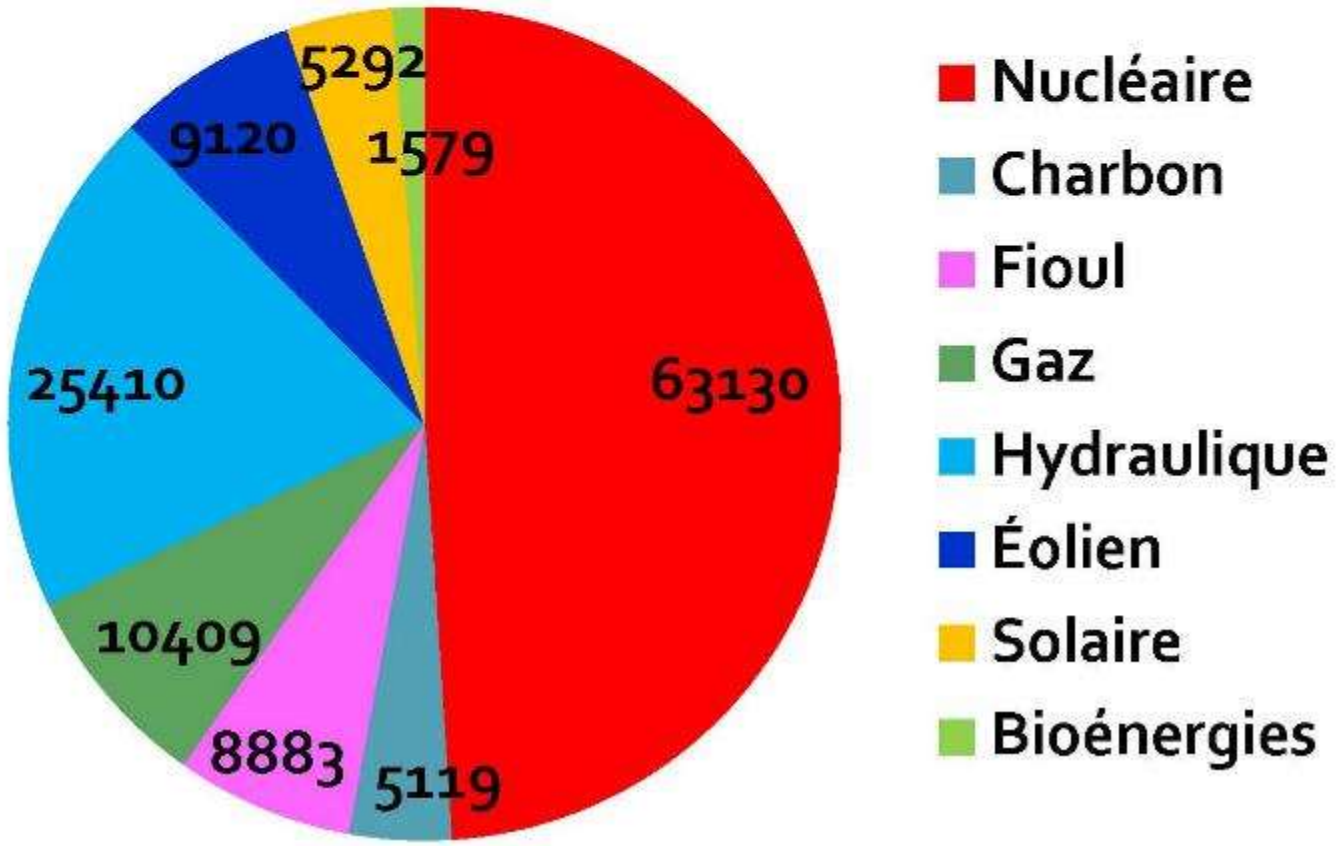
➔La part des énergies renouvelables dans le mix énergétique et électrique va continuer à augmenter

Sommaire

- Les énergies renouvelables en France
- Les énergies renouvelables : production électrique
  - Eolien
  - PV
  - Hydraulique
  - Biomasse & Géothermie
  - Energies Marines
- Limites et Perspectives des énergies renouvelables
  - Intermittence
  - Stockage
  - Réseau

Les énergies renouvelables en France : le mix électrique

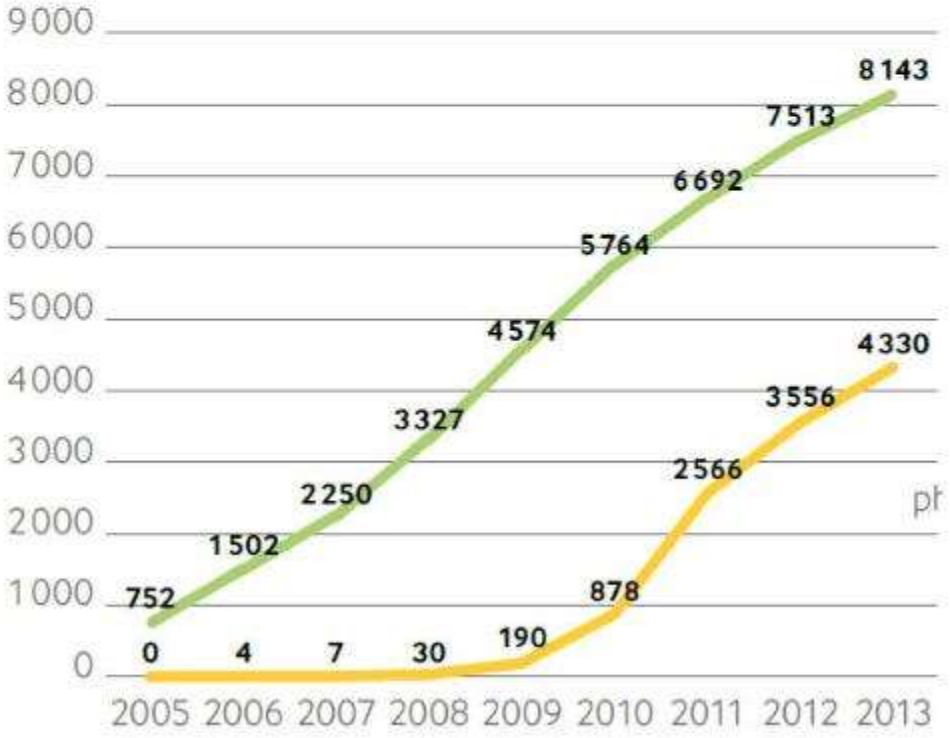
- Capacités de production électrique installées en France au 1 janvier 2015 (MW)



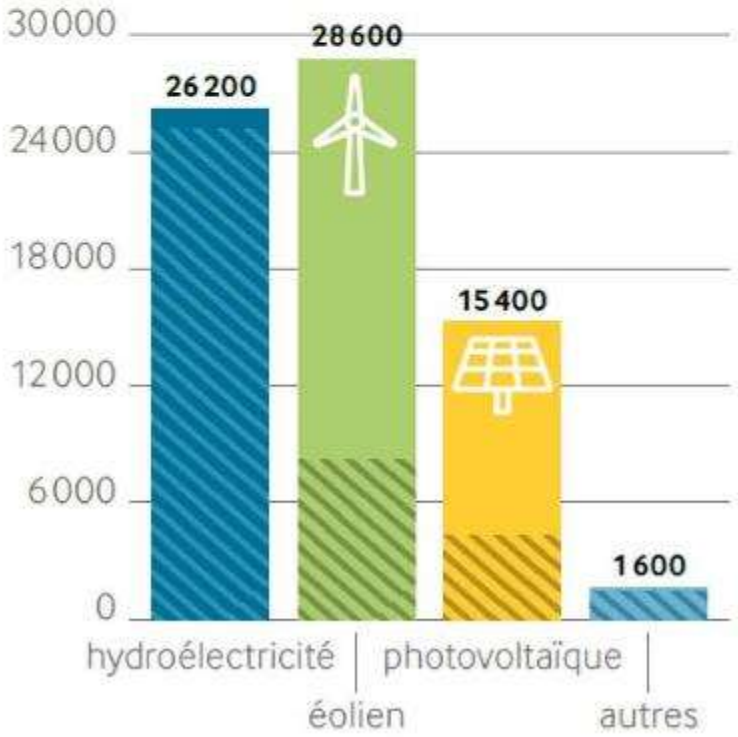
Les énergies renouvelables en France

Evolutions et Objectifs

Puissance installée par filière (MW*)



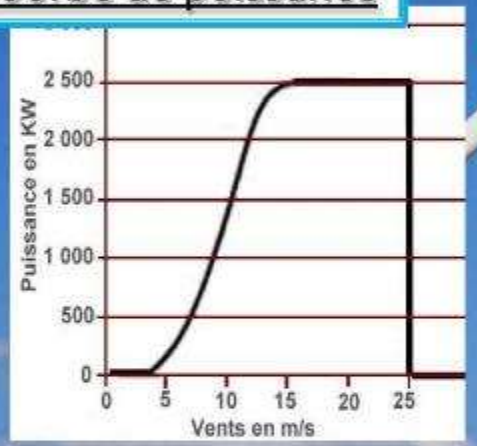
Estimation des ambitions EnR 2020 sur l'ensemble de la France, hors Corse (MW)



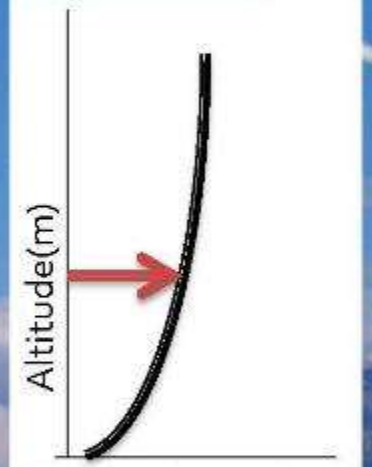
Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables : L'éolien

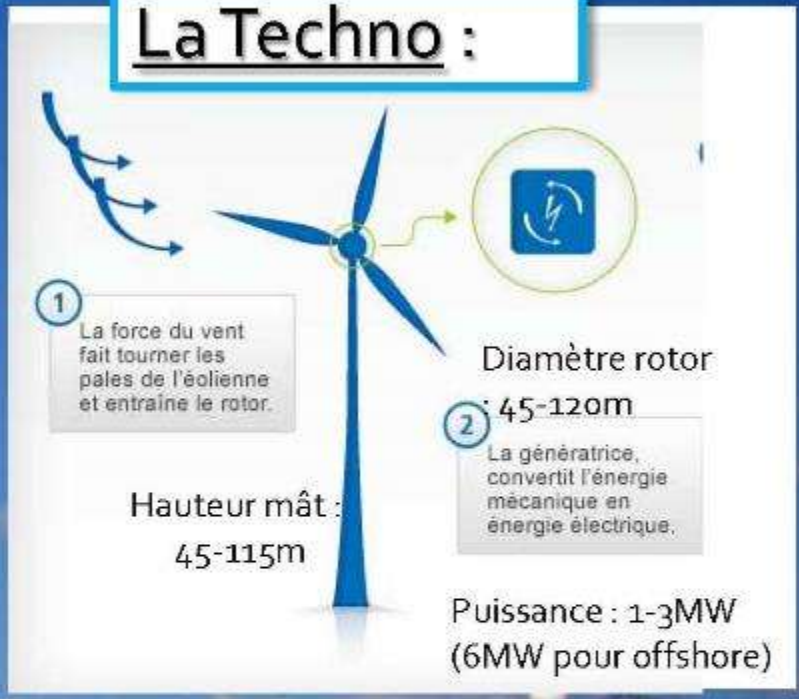
Courbe de puissance



Profile de vent



La Techno :



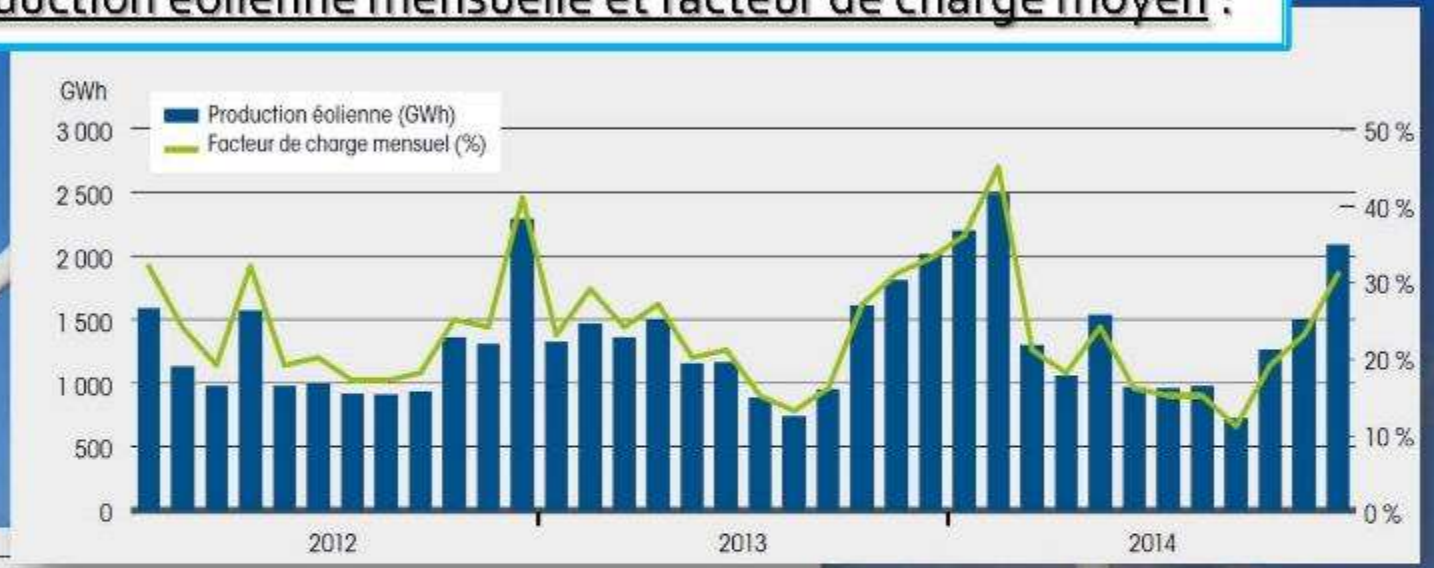
Différents types d'éoliennes:

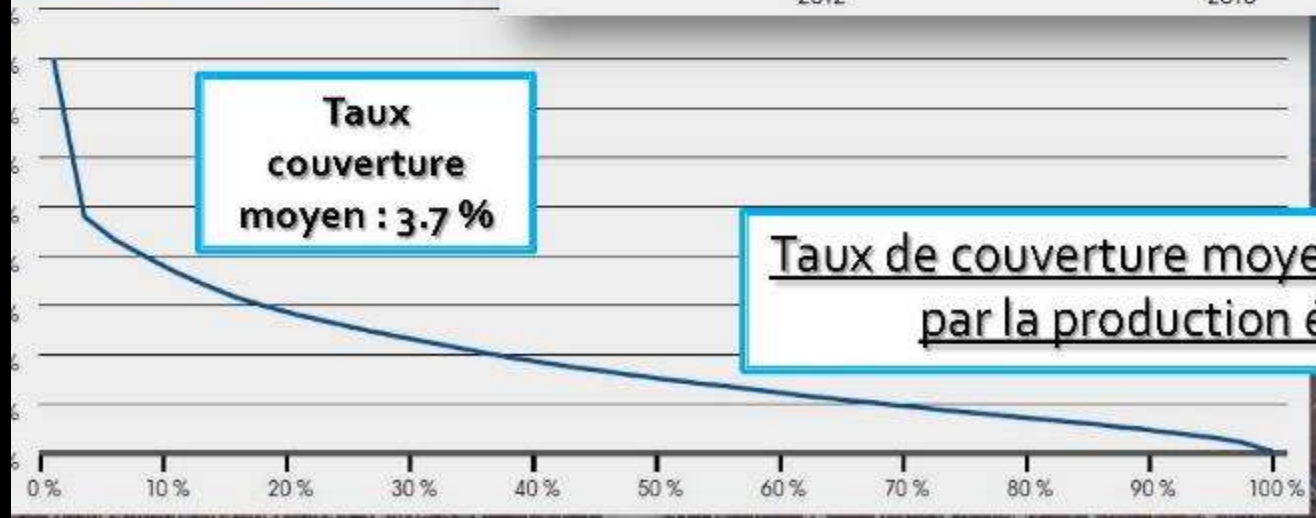
- **Inshore :** Eolienne terrestre (plusieurs générations)
- **Offshore :** Eolienne en mer

Puissance installée : 9120 MW

Les énergies renouvelables : L'éolien

Production éolienne mensuelle et facteur de charge moyen :





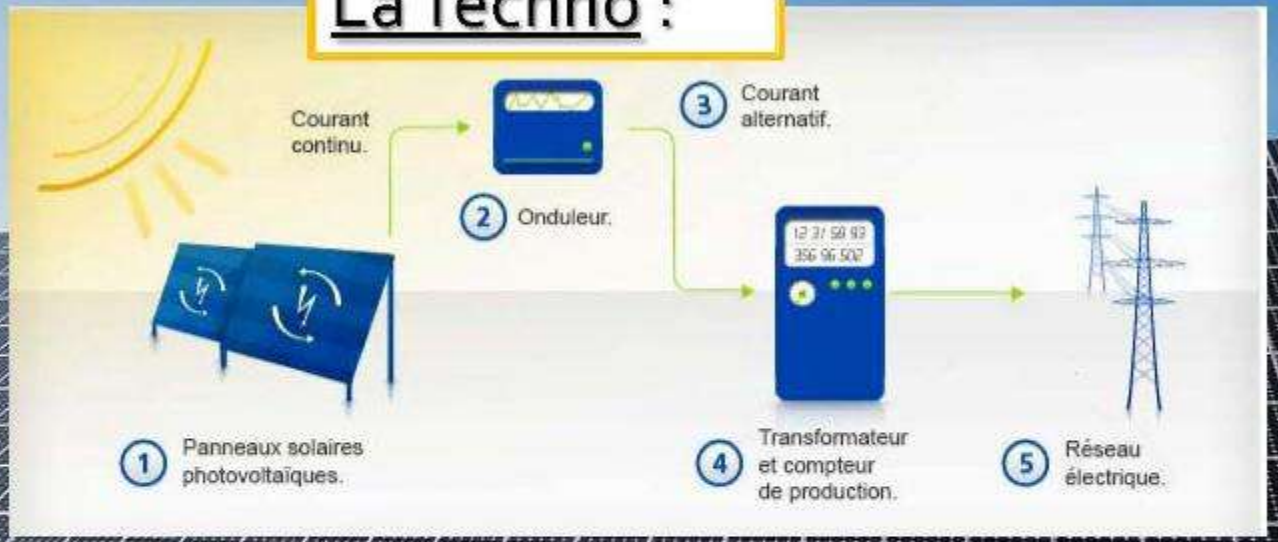
Taux couverture moyen : 3.7 %

Taux de couverture moyen de la consommation par la production éolienne en 2014

Le Solaire : Photovoltaïque

ance installée :
5292 MW

La Techno :

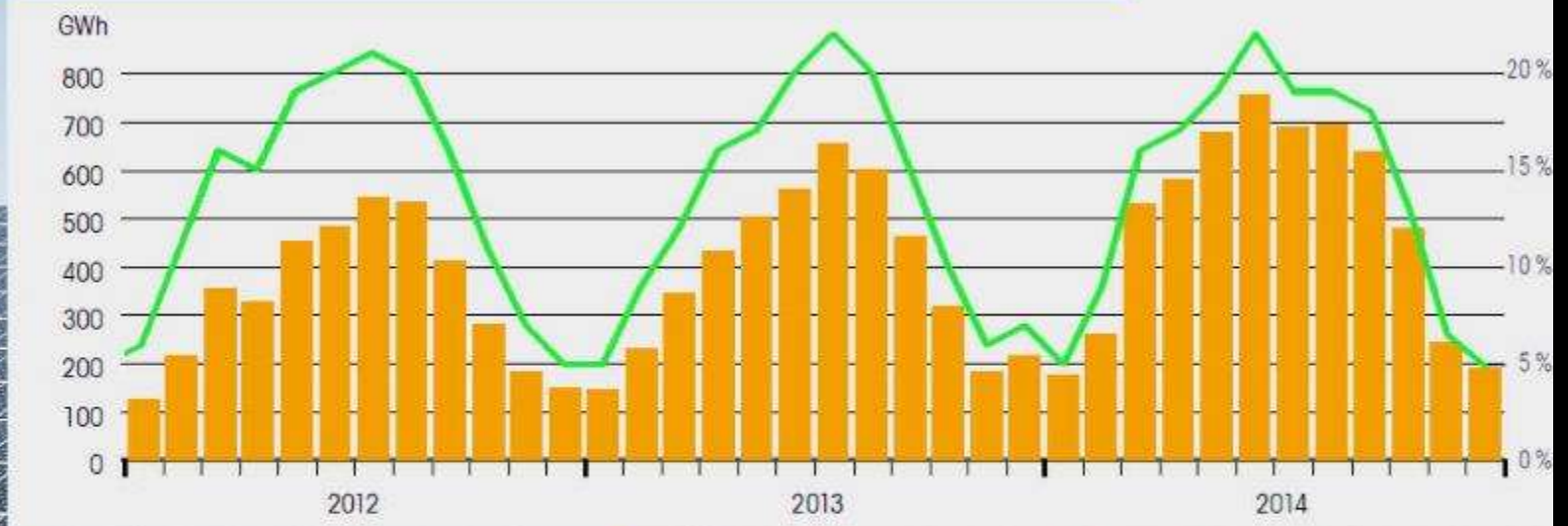


Différents types de panneaux :

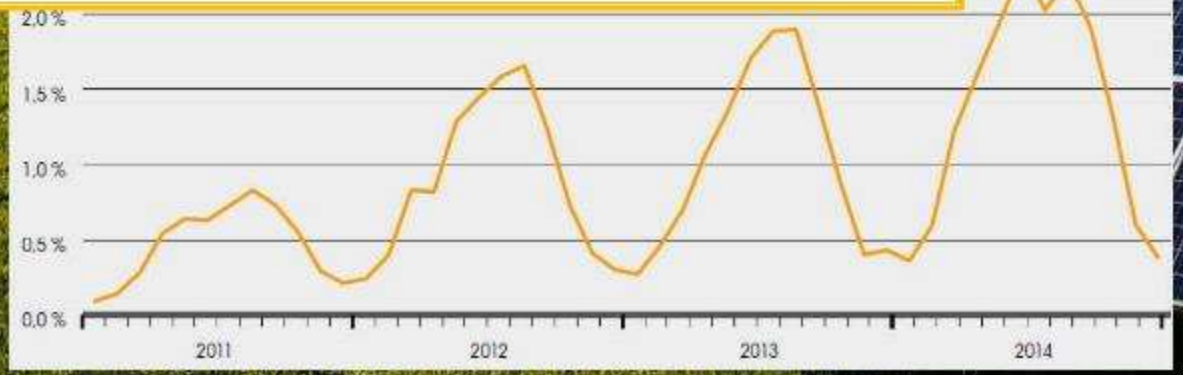
- **monocristallins** : à base d'un cristal de silicium, aux formes géométriques parfaites
- **polycristallins** : à base de plusieurs cristaux aux motifs non uniformes
- **couches minces amorphes** : à base de silicium non cristallin
- **couches minces** : à base de Tellurure de Cadmium (CdTe)
- ou Cuivre Indium Gallium Sélénium (CIGS)

Le Solaire : Photovoltaïque

Production PV mensuelle et facteur de charge moyen :



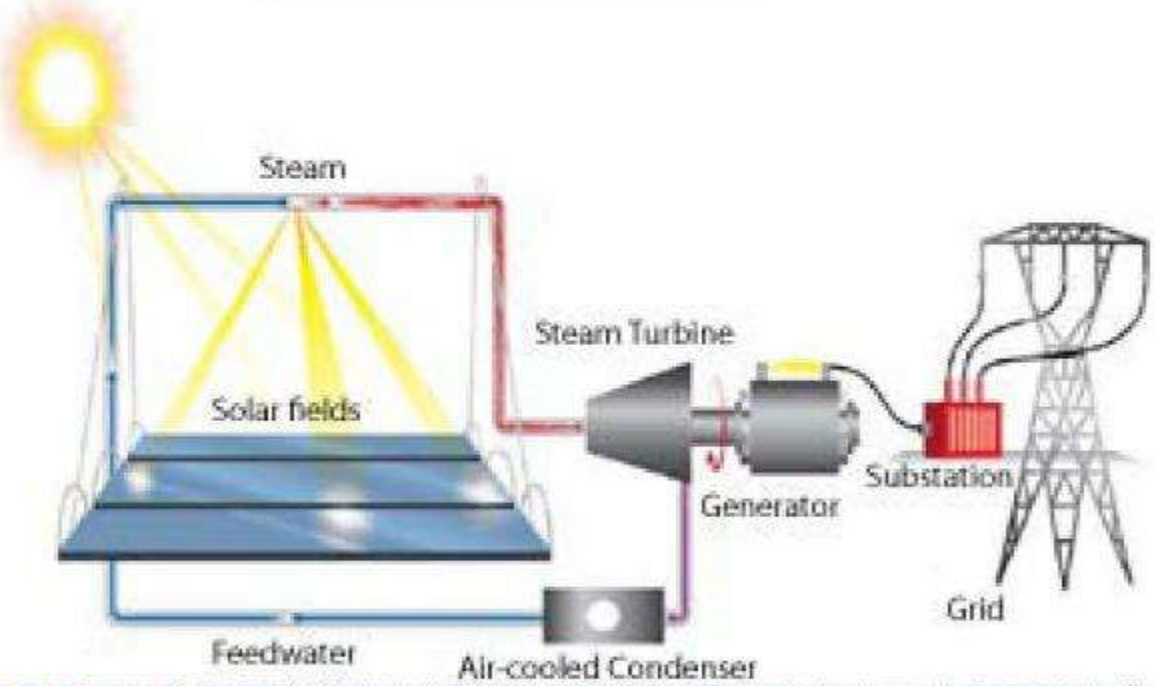
Taux de couverture moyen de la consommation par la production PV



Taux couverture moyen : 1.3 %

e Solaire : solaire thermique à oncentration (CSP)

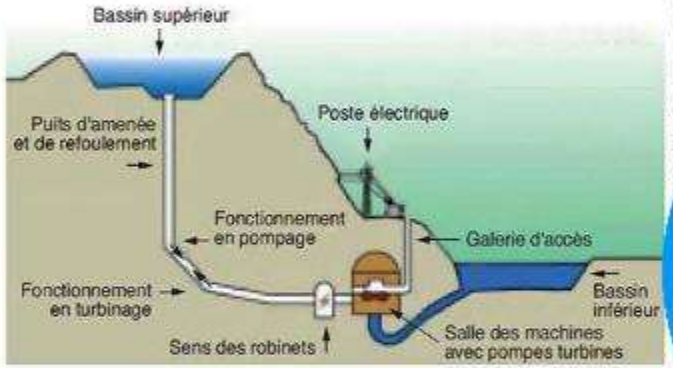
La Techno :



Puissance installée : 1MW

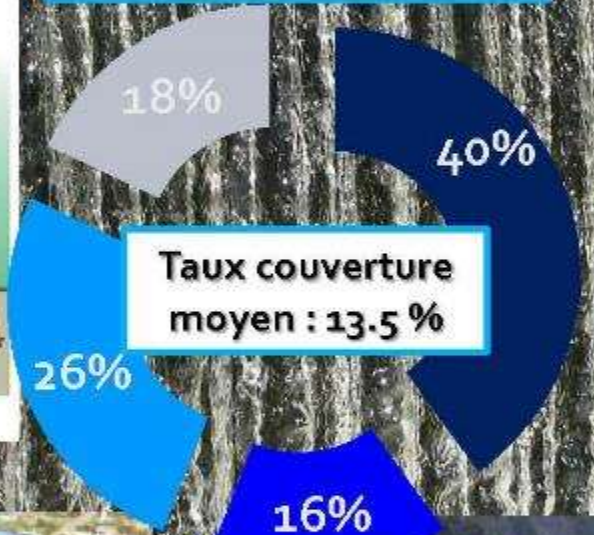
L'Hydraulique

La STEP (Station de Transfert d'Energie par Pompage)



Source : EnerGeek 2011

Puissance installée : 25410 MW



Taux couverture moyen : 13.5 %

Lac ou de haute chute

© La médiathèque EDF / Franck Oddoux

Centrale au fil de l'eau

© La médiathèque EDF / Thierry Dichtenmuller

D'éclusée ou de moyenne chute

© La médiathèque EDF / Franck Oddoux

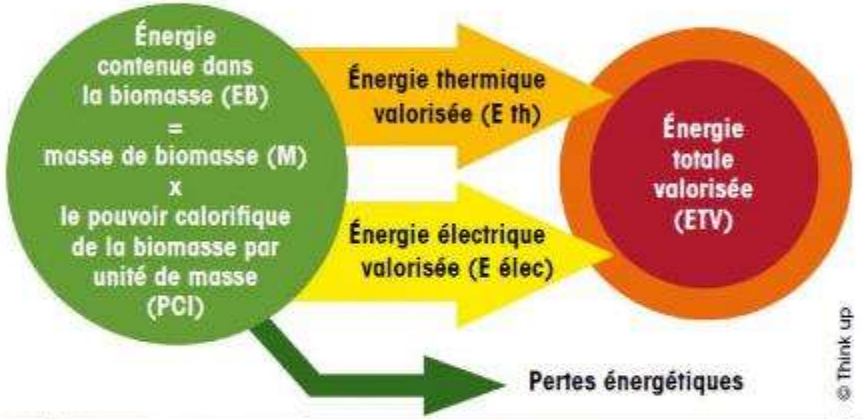
Biomasse et Géothermie

Puissance installée : 1579 MW

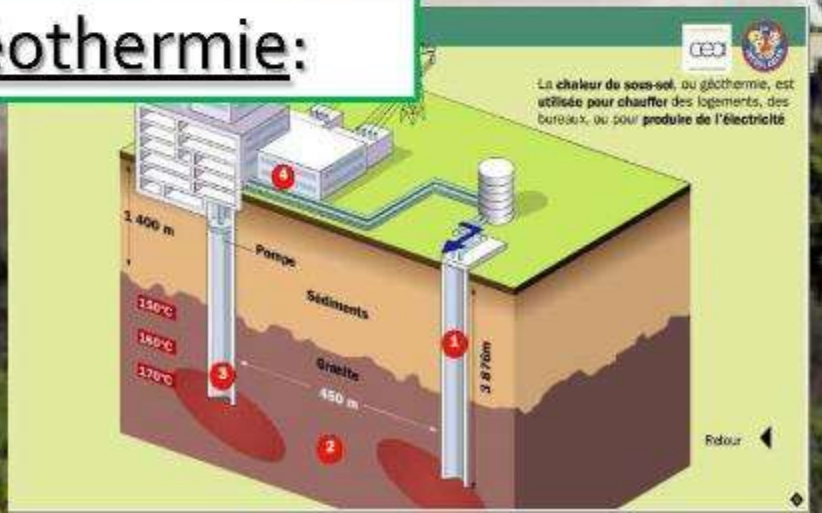
Les combustibles:

La Techno :

Principe de la cogénération à partir de la biomasse

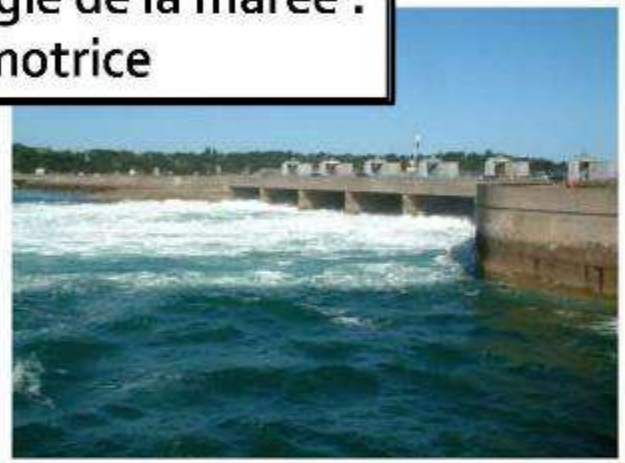


La Géothermie:

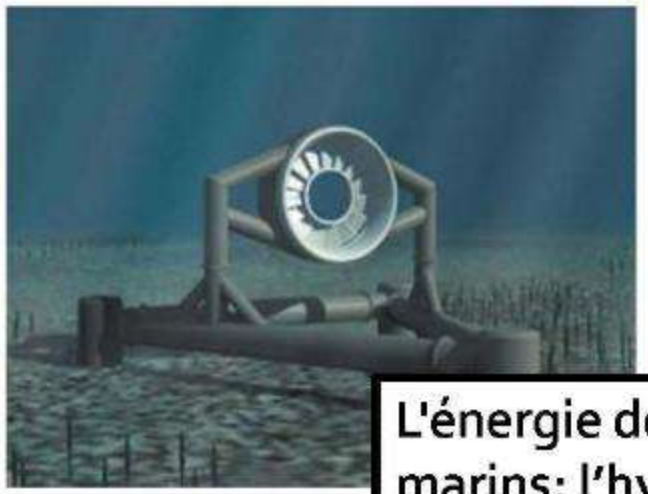


Energies Marines

L'énergie de la marée : marémotrice



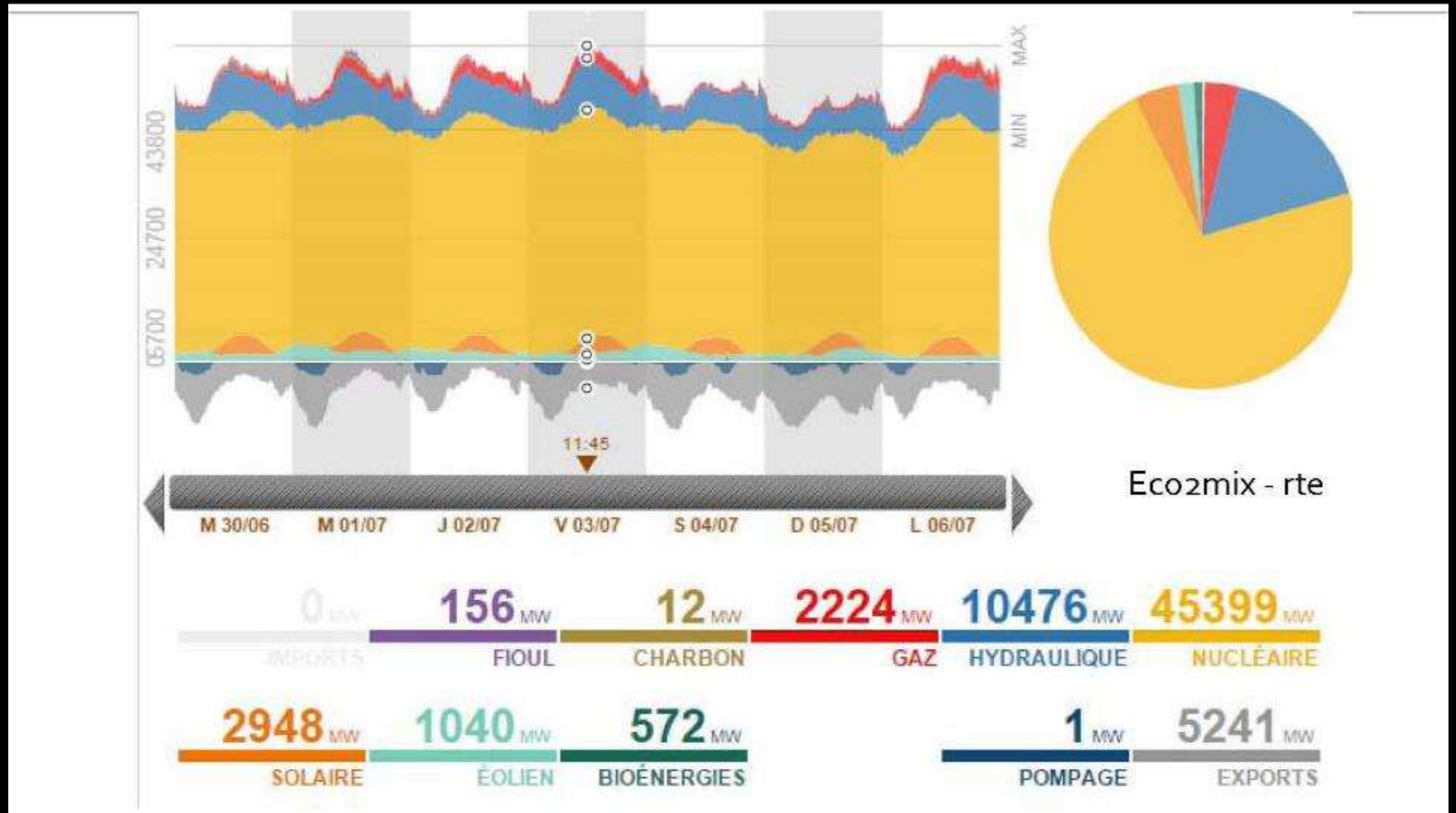
L'énergie de la houle



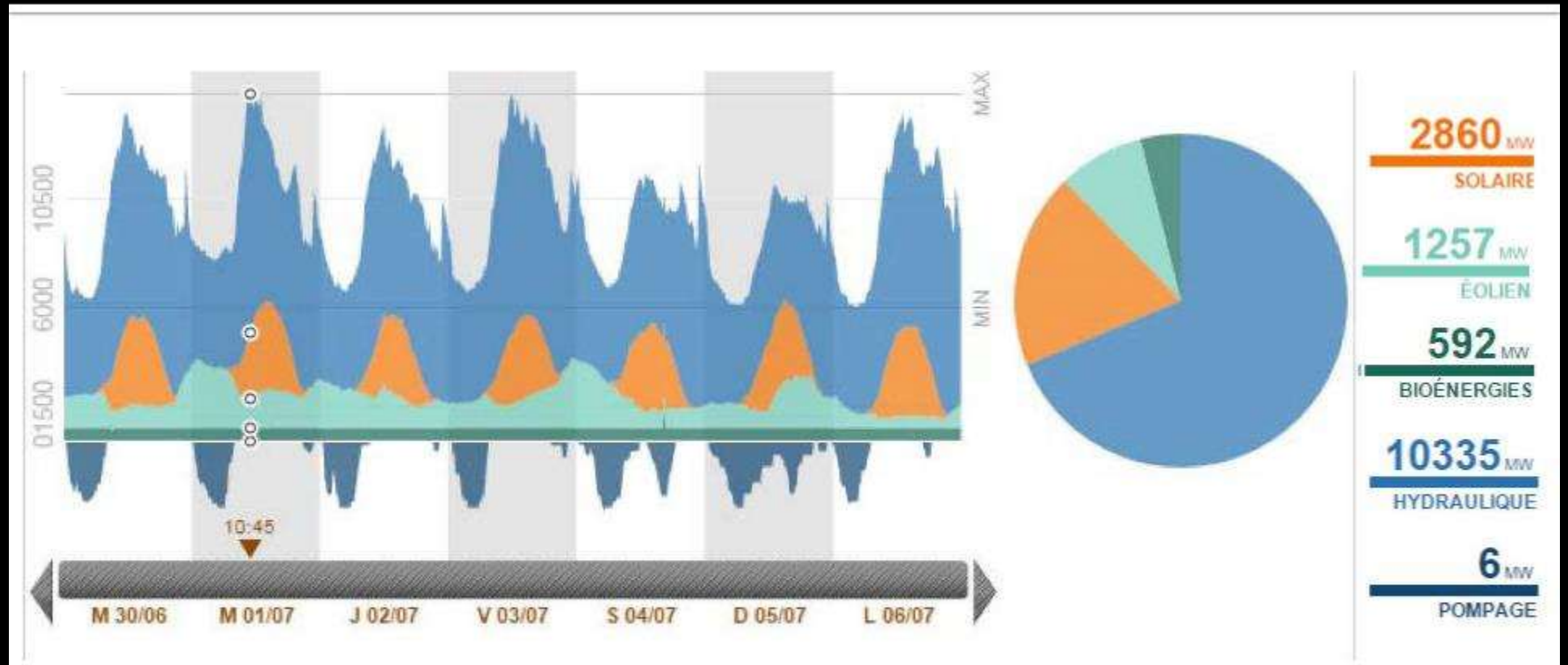
L'énergie des courants marins: l'hydraulienne

Limites et Perspectives

II. Intermittence



II. Intermittence



L'intermittence des énergies renouvelables complique la gestion de l'équilibre offre demande électrique

II. Surcapacité thermique

En réponse à l'intermittence du renouvelable :
compléter les capacités renouvelables avec des capacités thermiques (fioul, gaz, charbon)

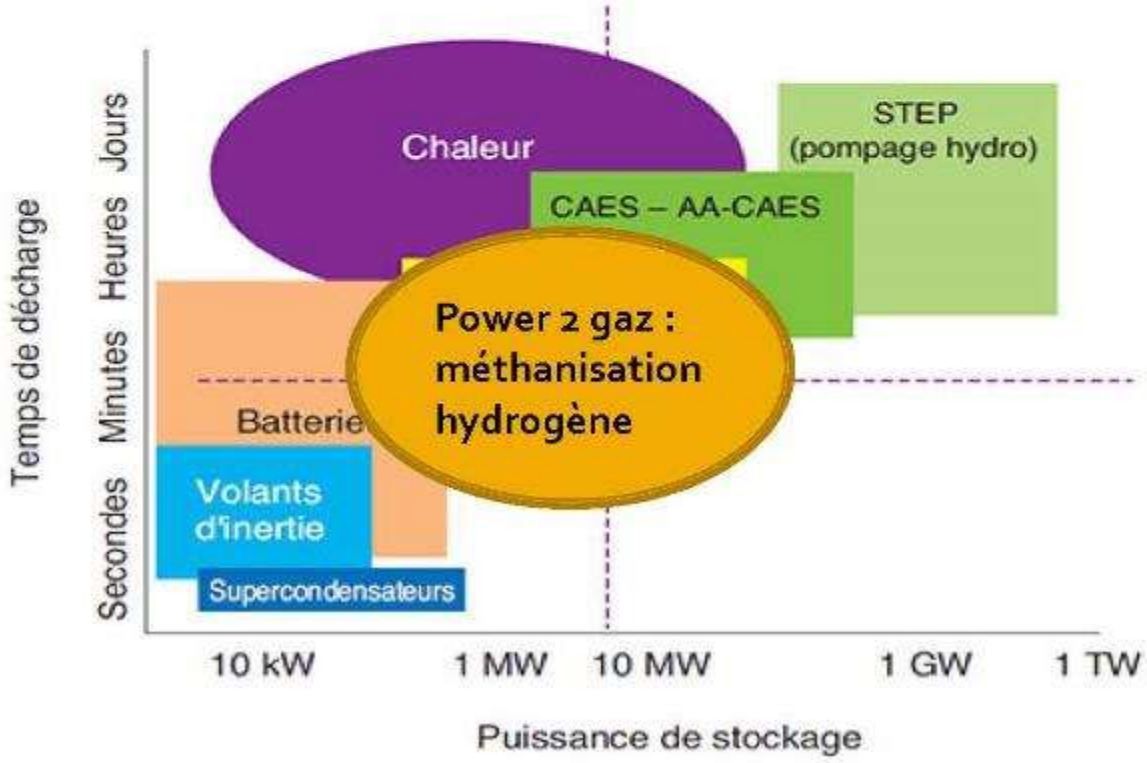
Problème émission de CO_2 et centrale peu utilisée au cours de l'année donc prix kw ↗

II. Stockage

En réponse à l'intermittence du renouvelable :

→ stocker les surplus de production électrique renouvelable

Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)



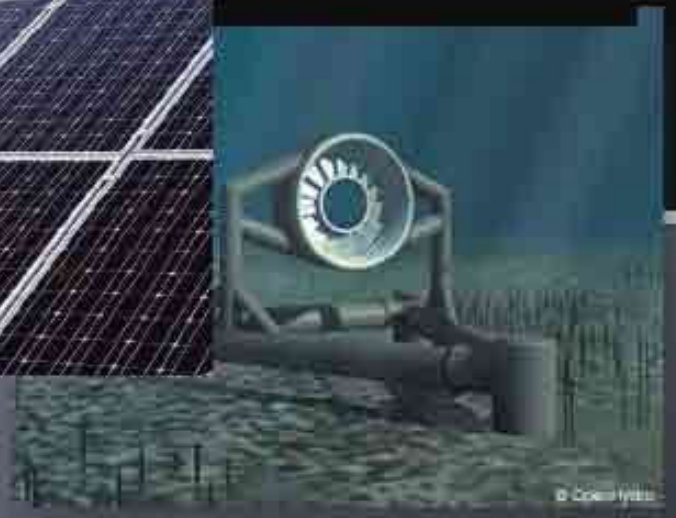
Source : IFPEN d'après diverses sources

II. Réseau

- Le système électrique actuel est un système centralisé
- La transition énergétique vers plus de renouvelable
  → mutation système électrique vers + de sources de production diffuses

➔ Adaptation du réseau électrique , coût?

Questions



Reférence

En Français :

- Panorama de l'électricité renouvelable 2014 (RTE)
- Accueil des énergies renouvelables sur le réseau (RTE)
- Le baromètre 2014 des énergies renouvelables électriques en France – Observ'er
- http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/
- Site internet RTE www.rte-France.com et appli Eco2mix
- http://encyclopedie-electricite.edf.com/

En anglais :

- IEA World Energy Outlook
- BP Energy Outlook
- Renewable 2014 Global Status Report (REN21 – UNEP)