

Réchauffement climatique

L'effet de Serre

« Notre maison brûle et nous regardons ailleurs ! »

Jacques Chirac– Johannesburg– sept. 2002

Emergence - 23 octobre 2006



Plan de la présentation

- Causes des changements climatiques
- L'effet de serre?
- Le réchauffement de la planète a-t-il commencé?
- Sommes nous responsables?
- Quel avenir pour notre futur? Les modèles climatiques.
 - Que va-t-il se passer? Que disent les modèles
 - Qu'est-ce qu'un scénario d'émission de gaz à effet de serre
 - Quelques résultats des scénarii
 - Et après 2100 ?
 - Conséquences pour le 21^{ème} siècle
 - Peut-on faire confiance aux modèles?
- Autres facteurs/théorie des variations climatiques
 - Gaïa
 - Théorie du chaos appliqué aux prévisions climatiques – Edward Lorenz
- Annexes de 1 à 9
- Bibliographie

Cause du réchauffement climatique récent

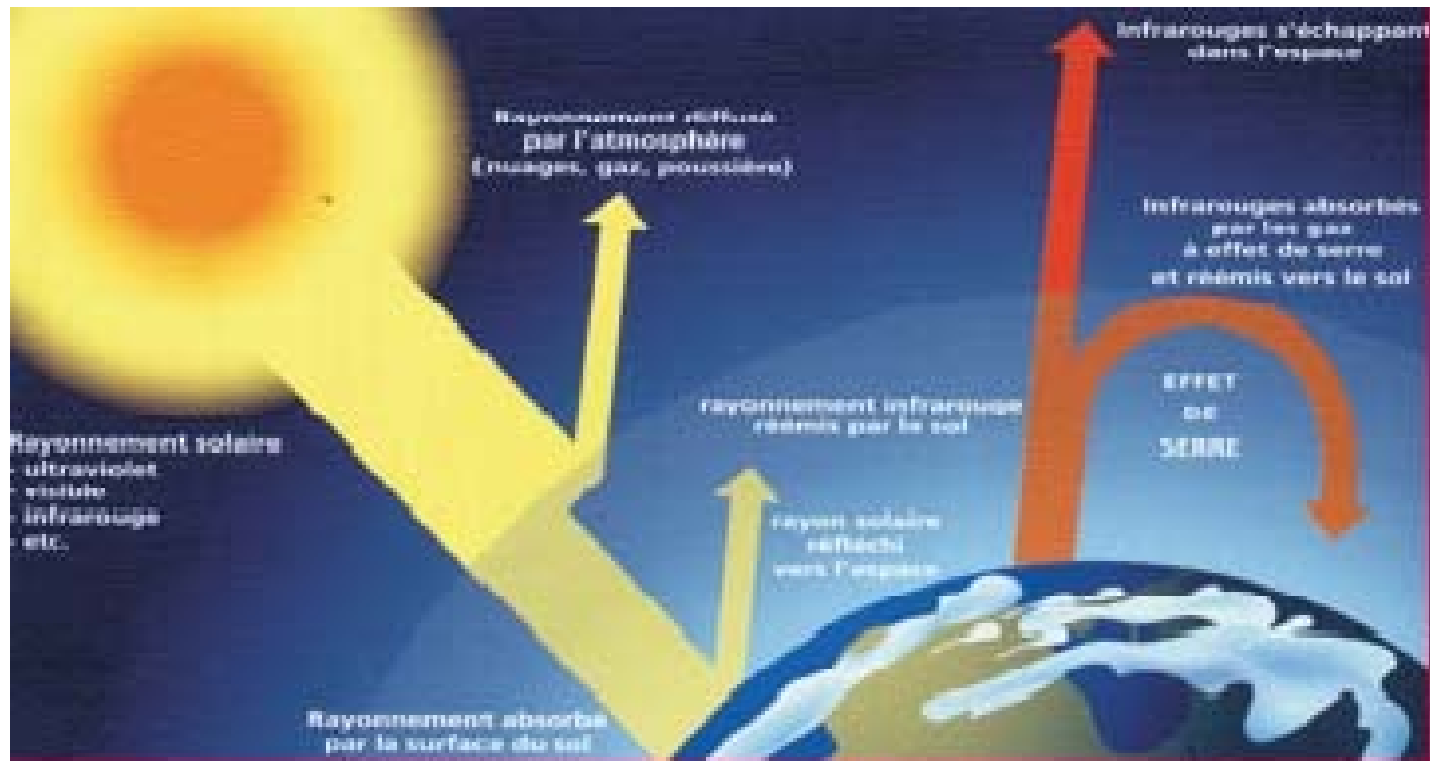
- Des causes naturelles:
 - Les gaz à effet de serre d'origine naturelle
 - les fluctuations de l'activité solaire
 - la réflectivité de la surface terrestre (albédo)
 - Les rejets massifs de poussières (éruption volcanique, météorite)
 -
- Des facteurs humains
 - La déforestation
 - Microclimats des villes
 - **L'émission anthropique des gaz à effet de serre (GES)**
 -

Ces causes du réchauffement ne sont pas contestées

C'est la contribution relative de chacune qui l'est.



Fonctionnement simplifié de l'atmosphère



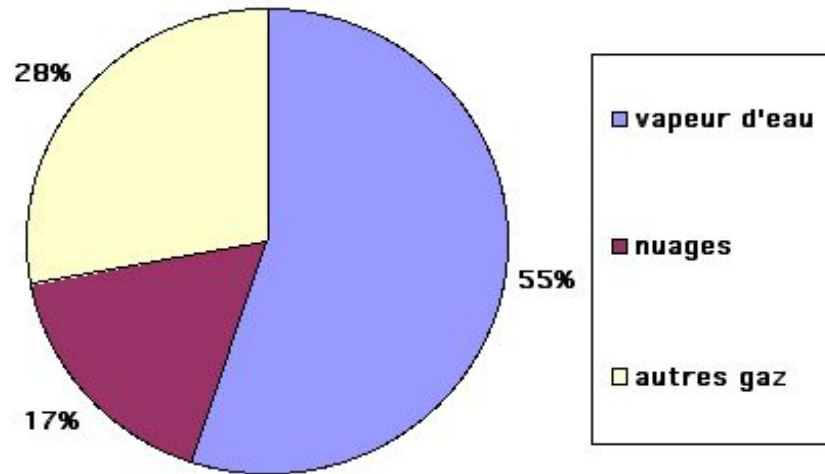
- Répartition du rayonnement solaire:
 - 30% réfléchi par l'atmosphère et le sol
 - 20% absorbé par l'atmosphère
 - 50% absorbé par la surface
- L'augmentation des GES réduit la « fenêtre atmosphérique », les rayonnements infrarouge émis par la terre et réfléchis par les GES augmentent → le sol reçoit plus d'énergie → la T°C augmente
- Cf. Annexe 0: Bilan radiatif simplifié de l'atmosphère

L'effet de serre (ES)

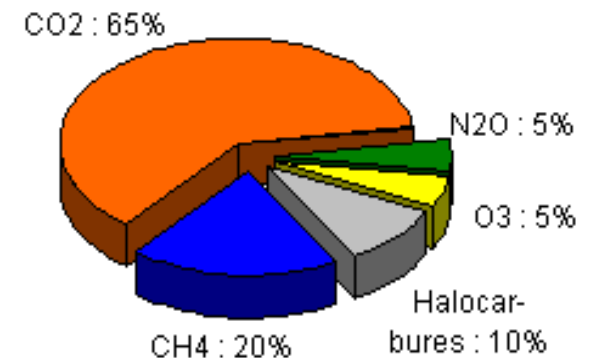
- Les « gaz à effet de serre » jouent le rôle de la vitre:
 - Transparents au rayonnement solaire
 - Arrêtent le rayonnement infrarouge émis par le sol
 - L'énergie ne se dissipe pas à l'extérieur
 - Elévation de la température

Contribution des gaz à l'ES (naturel+anthropique)→

- Les 2 GES les plus importants:
 - La vapeur d'eau
 - Le CO²
- Si l'ES n'existait pas: - 18°C vs +15°C



Contribution à l'effet de serre anthropique des différents gaz présents dans l'atmosphère



Contribution des gaz à l'ES anthropique →

- * CH₄: 23 fois plus réchauffant que CO₂
- * N₂O: 296 fois plus réchauffant que CO₂

Avec les GES, c'est comme si l'homme avait augmenté la puissance du soleil de 1%

Un peu d'histoire.

- Fin 18^{ème}: H.B. de Saussure - le 1^{er} à comprendre que le vitrage de la serre « piège » l'énergie solaire et pense que l'atmosphère agit de même (5 caisses de verre emboîtées)
- 1824: J. Fourier – « prolonge » de Saussure et expose le principe de l'ES (rayonnement solaire, réponse infrarouge et élévation de la T°C)
- 1838: C. Pouillet: attribue ES à vapeur d'eau et CO² → var. de ces 2 valeurs → changement climatique
- 1896: S. Arrhénius - calcule que CO² X 2 → Temp.moy. = + 4°C – utilisation intensive de combustibles fossiles → changement climatique
- 1904: V. Bjerknes – propose de traiter le comportement de l'atmosphère comme un problème de physique mathématique
- 1922: L.F. Richardson - 1^{ère} expér. de modélisation avec les équations physiques de Bjerknes (Prediction by Numerical process). Abandonne faute de capacité de calculs !
- 1950: J. Charney – 1^{er} modèle de prédictions météo avec Von Neumann – testé s/ ENIAC
- 1987-1990: Création de l'IPPC* (GIEC* en France) sous l'égide de l'ONU. Premier rapport du GIEC: forte probabilité de l'influence humaine sur le climat.

Cf. Annexe 1: Un peu plus d'histoire (complément)



* IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

* GIEC: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

Le réchauffement de la planète a-t-il commencé?

- Mesures directes depuis 1860

- Augmentation de la $T^{\circ}\text{C moy.}$ de $0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$
Augmentation de température la plus rapide jamais enregistrée.

Mesures directes des $T^{\circ}\text{C}$ depuis 1860 →
(écart de $T^{\circ}\text{C}$ entre année considérée et $T^{\circ}\text{C}$ moy. 1961-1990)

- Mesures avant 1860:

- Méthode des troncs d'arbre (1000 ans)
- Analyse isotopique des coraux (carbone 14)
- Analyse des carottes glaciaires (> 100 000 ans)
- Analyse des sédiments marins > 10 000 000 années

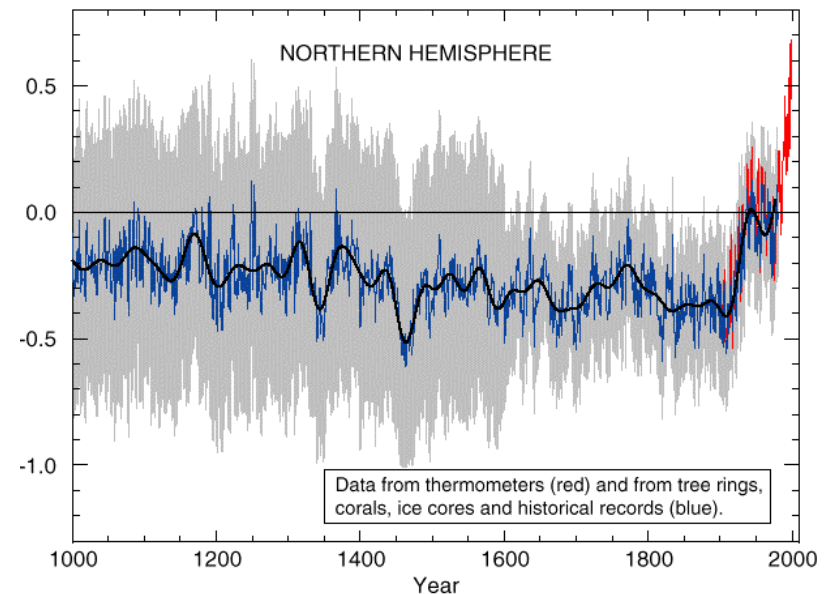
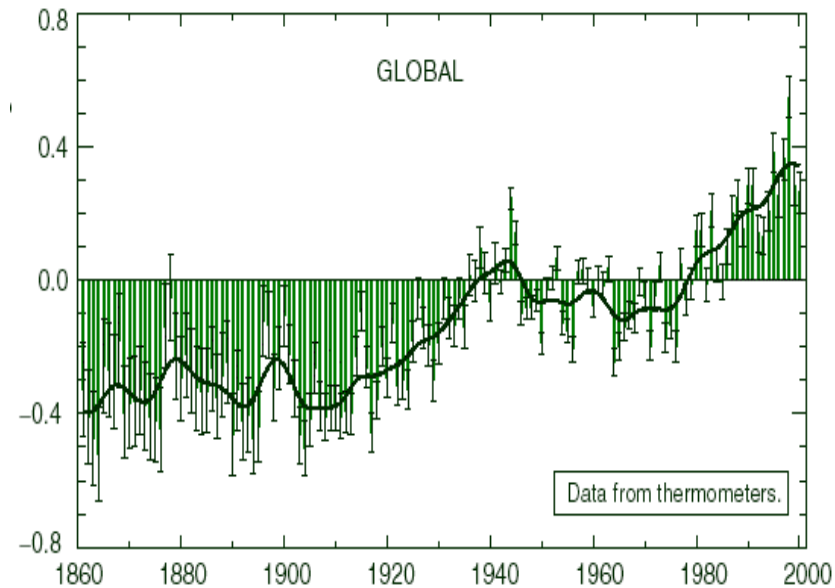
Evolution des $T^{\circ}\text{C}$ sur 1000 ans →
(bleu: mesures - courbe noire: val.moy. - Zone grise: marge d'erreur)

→ Augmentation récente très marquée vs tendance générale stable

Décennie 90 et année 98 les + chaudes du 2^{ème} millénaire

- Structure du réchauffement:

→ Augmentation plus rapide la nuit et en hiver:
spécifique à ES



Positive proof of global warming.



**18th
Century**

1900

1950

1970

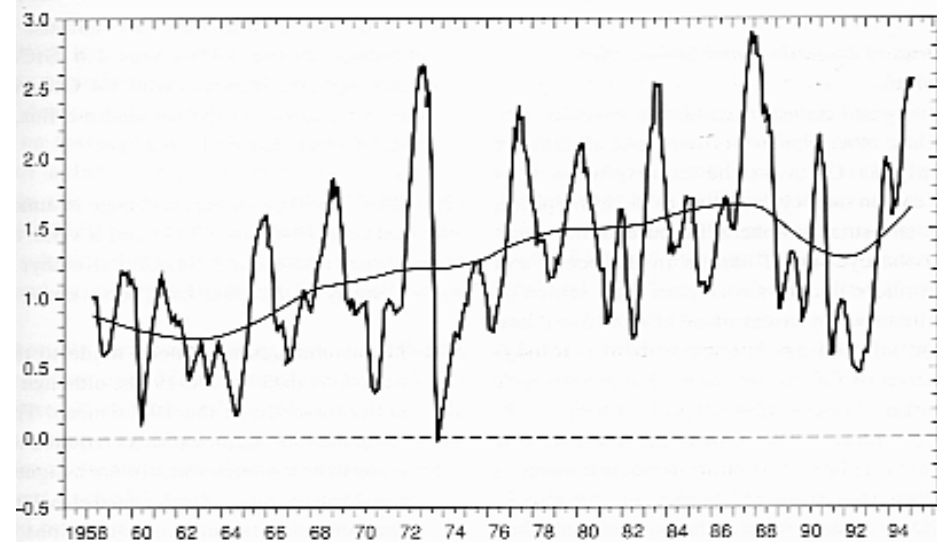
1980

1990

Sommes-nous responsables?

- Depuis 1958:
 - Mesures de la concentration en CO_2 → **accélération**.

Augmentations annuelles de la concentration en CO_2 (ppm) - (Manau Loa) →
(Courbe lissée: moyenne glissante sur 10 ans)

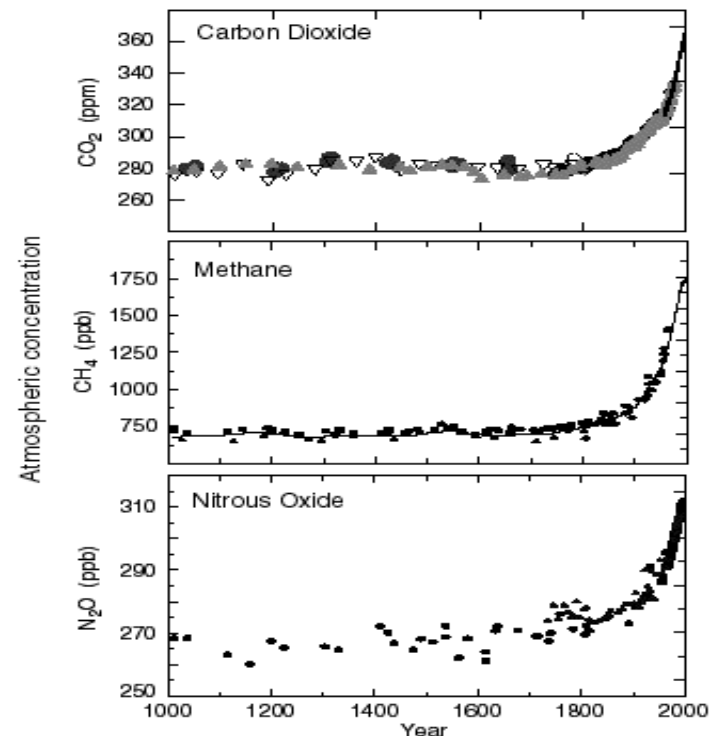


- Quid avant 1950?
 - Analyse des carottes glaciaires:
 - Précis sur 100 000 ans
 - Acceptable sur 700 000 ans

Variations des concentrations de GES (ppm, ppb) →
(Antartique)

→ Les concentrations sont
exponentielles depuis 1750

→ CO_2 : + 31%
→ CH_4 : +149%

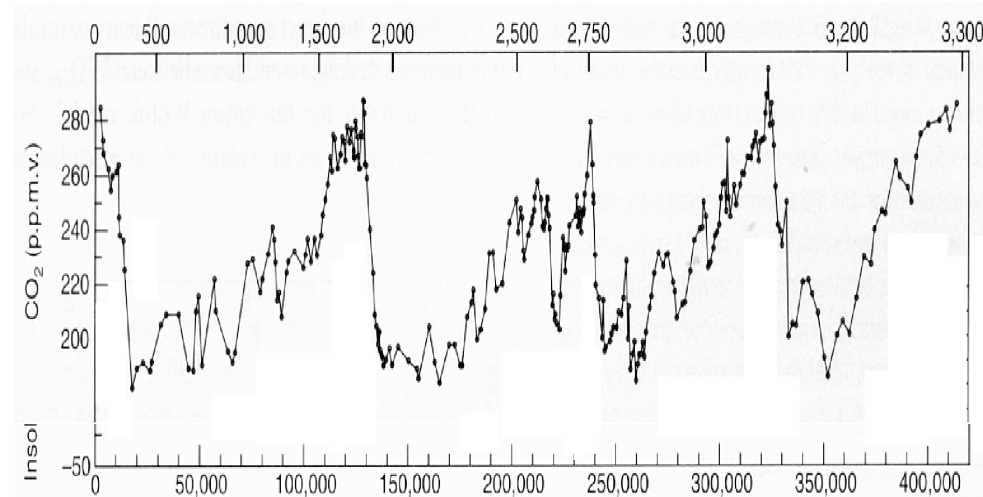


Sommes-nous responsables? Historique CO²

- Concentrations en CO² < 1950
constantes sur 400 000 ans

Var. des concentrations en CO²(ppm) s/ 400 000 ans→
(échelle du bas: années – échelle du haut : profondeur du carottage)

- Concentrations toujours < 280 ppmv
(valeur de 1750)
 - En 2005: 380 ppmv
- Même constat pour CH₄
 - De 350/700 ppb → 1 750 ppb (2 005)
- Oui nous sommes responsables !!!**
- Cf. annexe 1bis « Quelques conséquences du RC déjà observés »

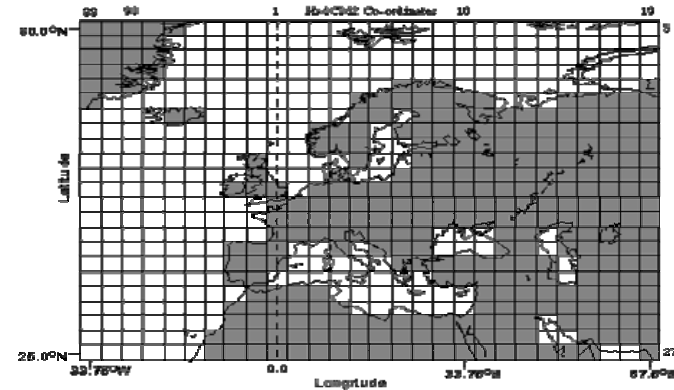


Quel avenir pour notre futur? Les modèles climatiques

- Maillage 3D

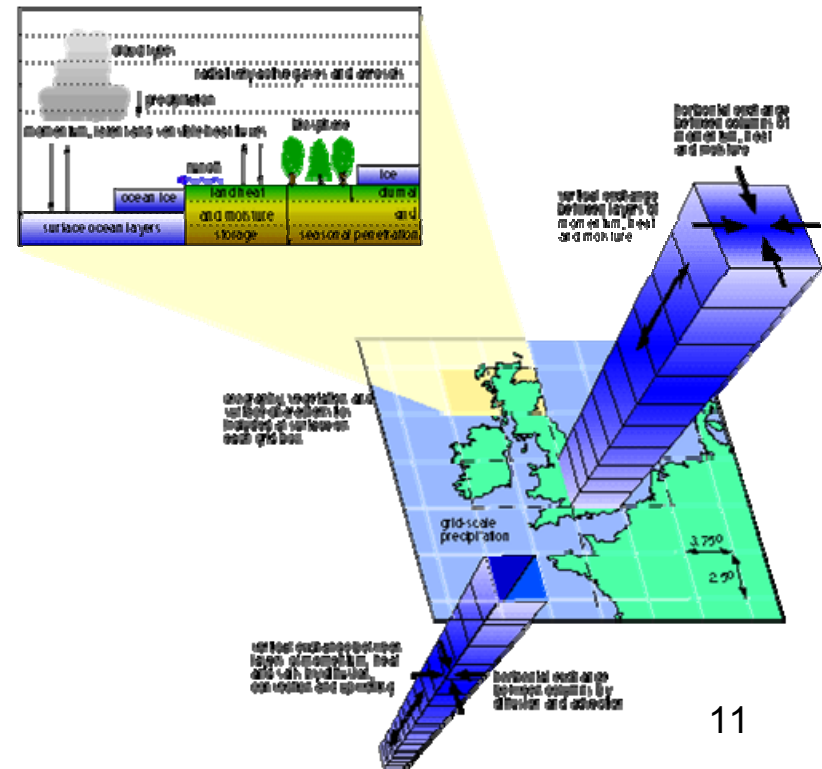
Maillage du Hadley Center (la France = 4 mailles) →

- (x, y): 50kms<maille<1 000kms)
- (z) : quelques dizaine de niveaux
- Pour chaque « boîte » conditions de départ
- A chaque nœud:
 - Température, pression, humidité, salinité, nuages, vent....,
- Evolution du système à chaque nœud à intervalles réguliers (1/2 heure<t<mois)



- Principaux items pris en compte:

- Echanges d'énergie (rayonnement électromagnétique, Terre, océan, atm. espace)
- Transferts radiatifs (solaires, infra-rouge)
- Circulation air/eau
- Circulation océanique – interactions océan/atmosphère
- Nuages
- échanges CO² atm./planète
- Interactions GES / réchauffement



- # 15 modèles → 2 000 scientif. → 20 000 pers.
 - France: Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)

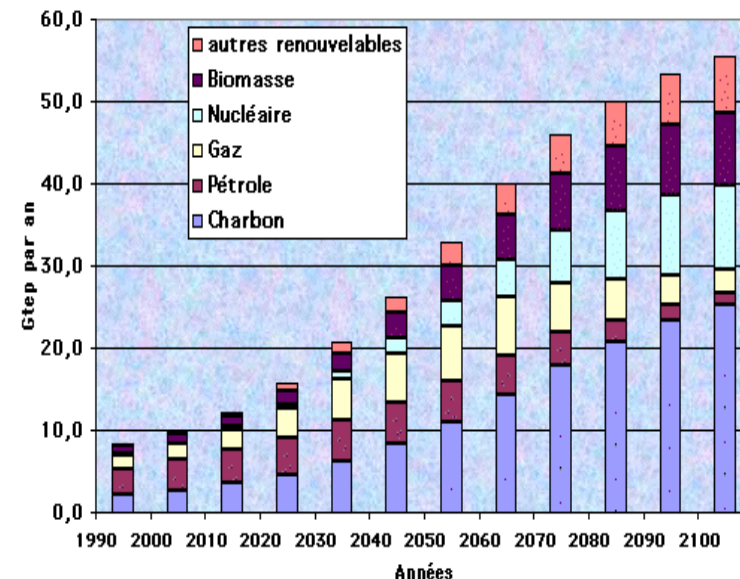
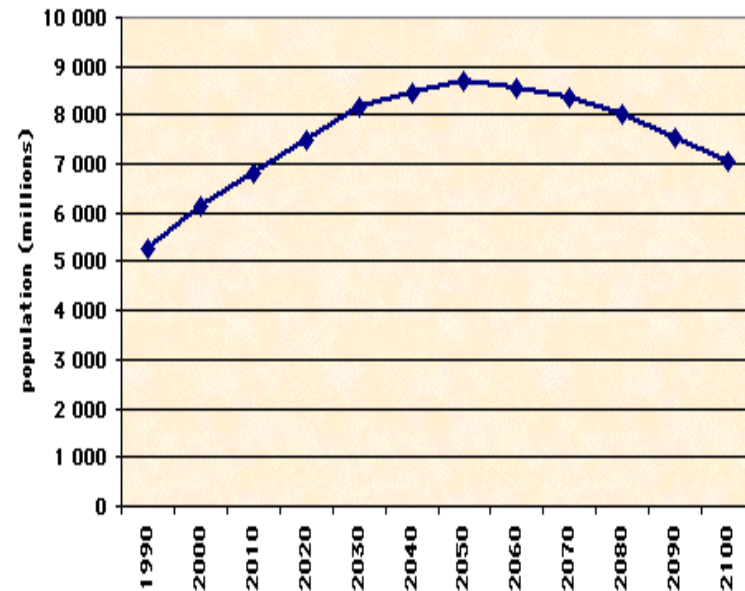
Qu'est-ce qu'un scénario d'émission de GES?

- Base de départ: état plausible d'un monde futur:
 - Population
 - Pratiques agricoles
 - Evolution des techniques
 -
- Modélisation d'une consommation d'énergie
- Conversion en émission de GES
- Rapport GIEC: 40 scénarii regroupés en 4 familles (A1, A2, B1, B2)
 - chaque famille correspond à un projet de société

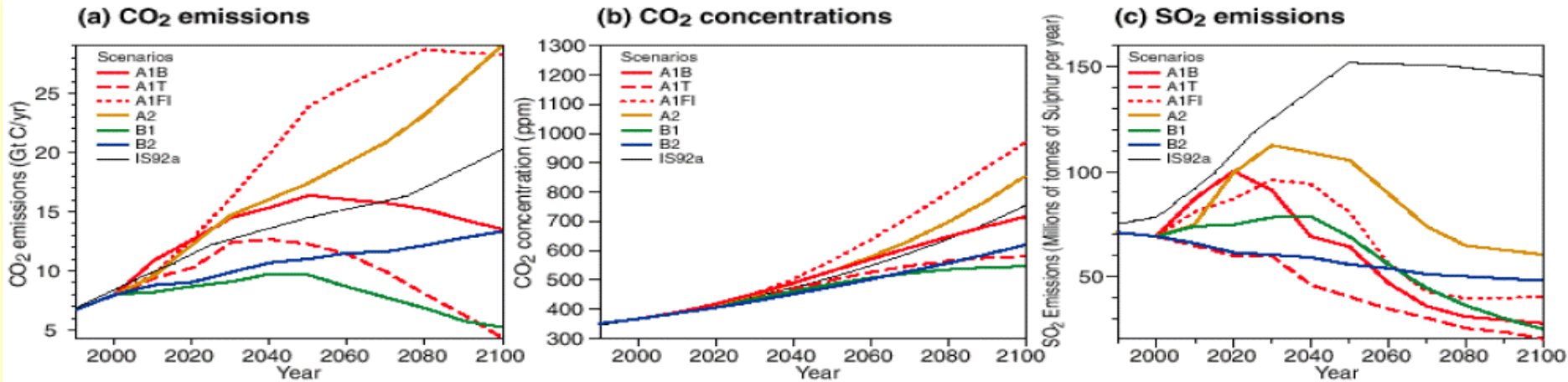
Définition qualitative	A1	A2	B1	B2
Thème	Convergence	Régionalisation	Sociale et environnemental	
			mondial	régionaux
Croissance économique	très rapide	lente	Servcies et information	
Population mondiale	max en 2050	accroissement continu	max en 2050	accroissement continu mais faible
Introduction de technologies	rapidement	lente	propres	moins rapide et + diverse
Monde	homogène	très hétérogène	solutions mondiales	12

Exemple d'un scénario d'émission de GES

- Hypothèses du scénario « A1C-MESSAGE »:
 - Croissance économique très rapide
 - Population mondiale culmine à 9 milliards et décroît
 - Pénétration nouvelles technologies énergétiques très rapides
 - Le revenu par tête et le mode de vie convergent entre régions
 - Les interactions sociales et culturelles augmentent fortement
 - Utilisation intensive des énergies fossiles
 - Pas de lutte intensive contre le changement climatique
 - Pas de rupture brutale (conflit nucléaire, épidémie massive,...)
- Quelques chiffres 2100 de « A1C-MESSAGE »
 - Conso. d'E/hab.= 7,8 tep (x4 conso.2000)
 - Conso. E. fossiles tot.=30 Gtep (x4 conso.2000)
 - Conso. E tot.=55 Gtep (x6 conso.2000)
 - Conso. Cum. Charbon = 1 152 Gtep (x2 ressources prouvées; 50% ressources ultimes estimées)
 - Conso. Cum. Pétrole = 440 Gtep (égal ressources ultimes estimées)
 - Parc de 12 000 réacteurs nucléaires vs 400 en 2000
 - Exploitation énergétique de 20% des terres émergées ou 75% des forêts
- Concentration en CO² en 2100 = 1000 ppm (x3)



Quelques résultats des scénarii



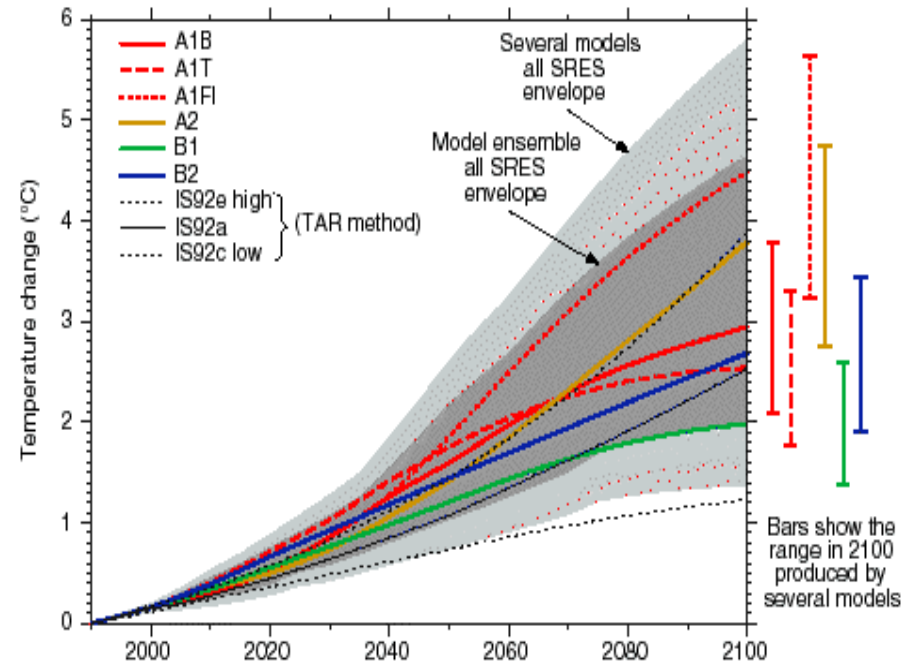
- Emissions de CO₂ facteur 5 (facteur 2 → CO₂ déjà émis)
- Emissions de SO₂ facteur 3 (refroidisseur de climat)
- Emissions de CH₄ facteur 2 et N₂O facteur 1,5 (liés à production agricole)

Prédictions de l'augmentation de T°C entre 1990 et 2100 selon les scénarii et les 15 modèles →

- Pour un même scénario l'écart de T° est de 1° à 2° suivant les modèles vs 4°5 pour l'ensemble des scénarii et des modèles.

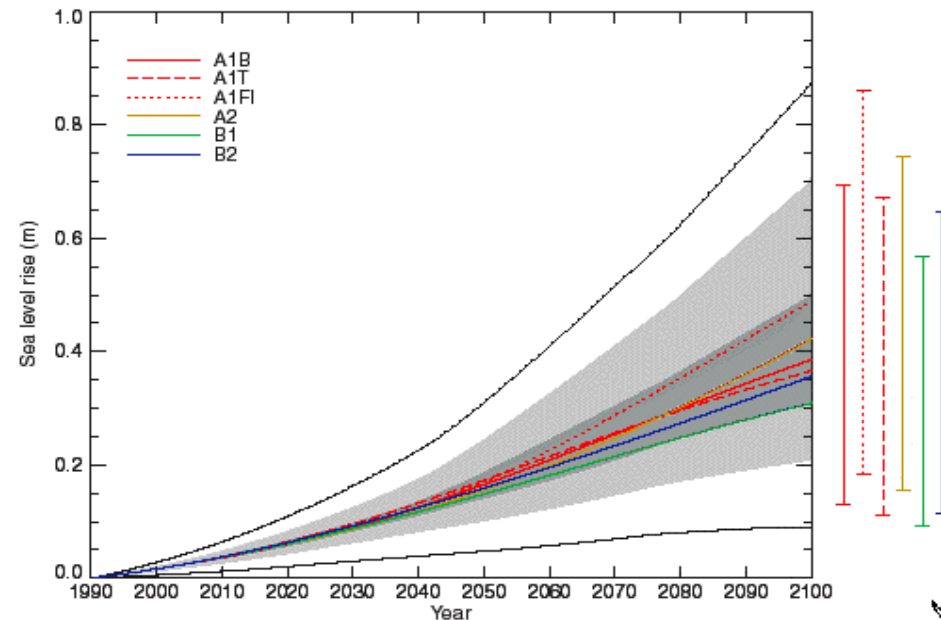
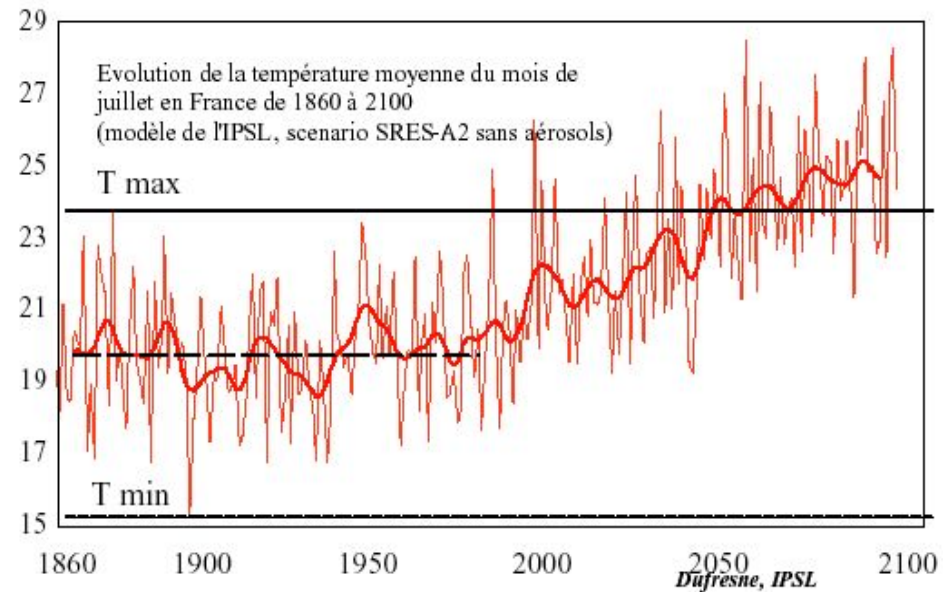
- Le plus favorable: 1,4 < T°C < 2,6
- Le plus défavorable: 3,2 < T°C < 5,6

- Cf. annexes 3 et 3 bis: Que disent les modèles? (compléments)



Quelques résultats des scénarii (suite)

- Etés 2003/2006:
 - Une bonne idée de ce qui nous attend!!!
 - T° 2003/2006 la norme en 2050?
 - Probablement pire dans le futur !

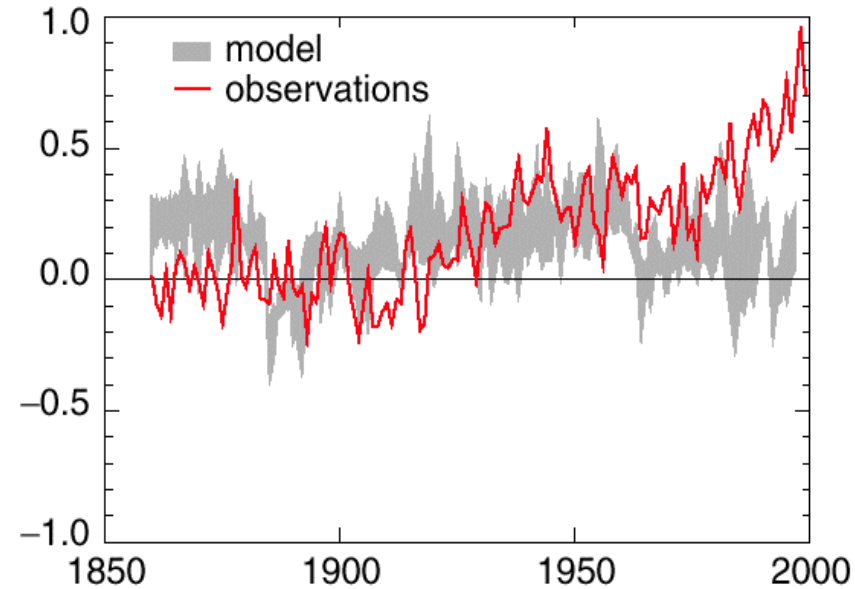


Peut-on faire confiance aux modèles?

- L'évolution donnée par les modèles est conforme à la réalité:

1. Résultats modèles sans GES

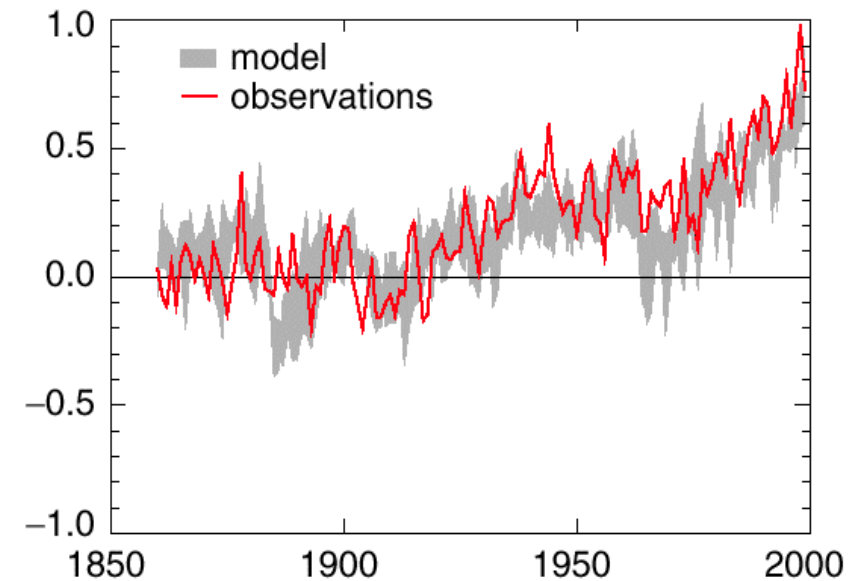
Comparaison mesures vs modèles sans paramètre ES →
(date départ de simu : 1860)



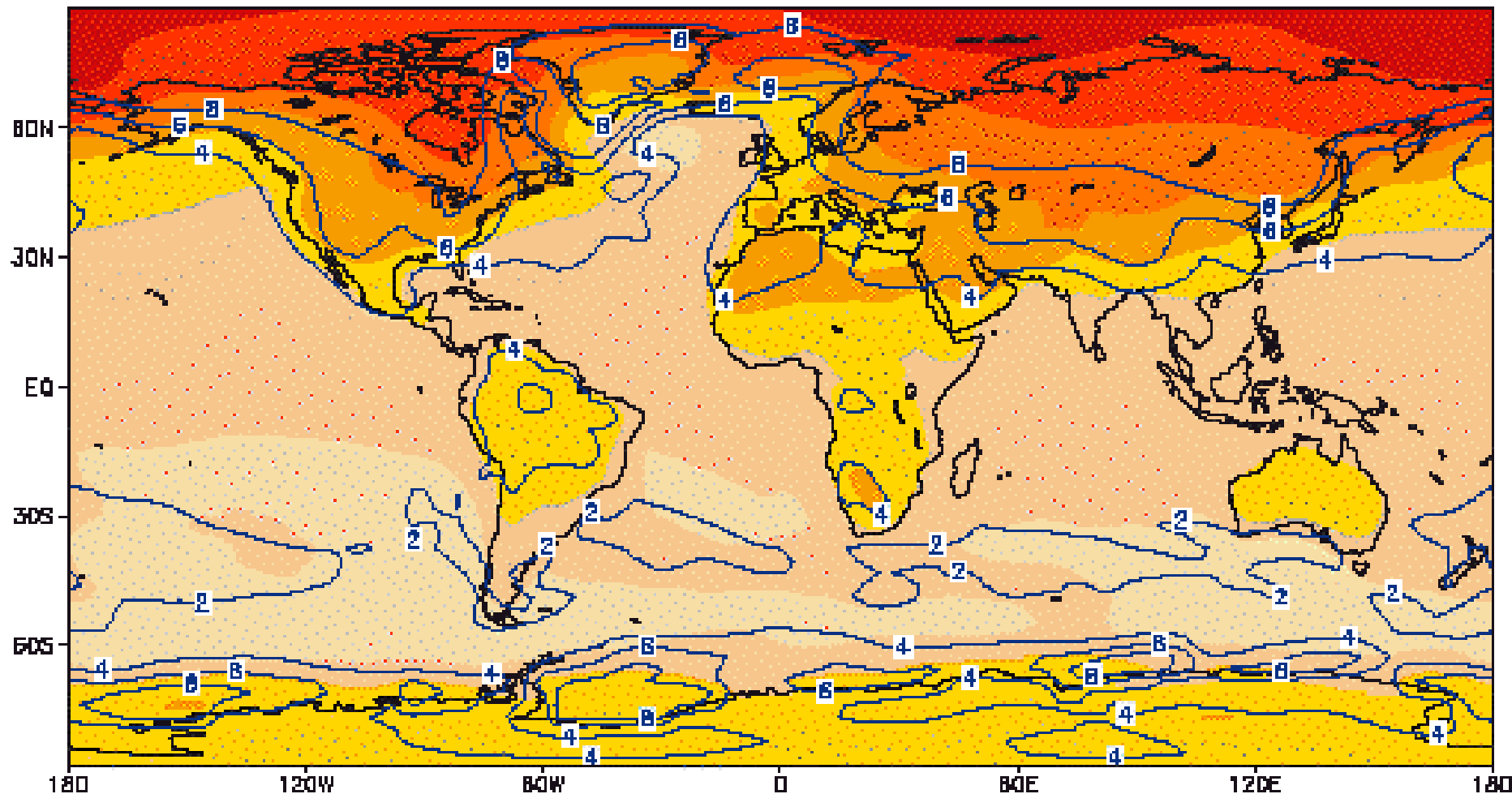
2. Résultats modèles avec GES

Comparaison mesures vs modèles avec paramètre ES →
(date départ de simu : 1860)

- Conformité aux modèles:
 - Les T° augmentent + vite:
 - l'hiver
 - la nuit
- Les modèles reproduisent fidèlement:
 - les zones climatiques,
 - le rythme des saisons,
 - les courants atmosph. et océaniques,
 - les oscillations pluriannuelles (El Nino,...)
- Les prévisions locales sont difficiles à établir



Que va-t-il se passer?



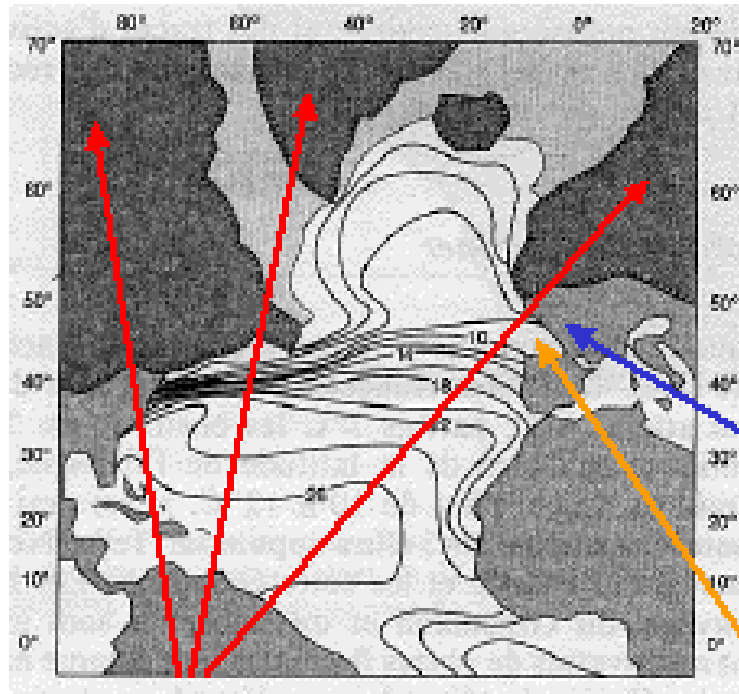
A2



Evolutions régionales des T°C - Différence entre moyenne annuelle période 1961-1990 et 2071-2100 → (scénario A2: +3,8°C en 2100.)

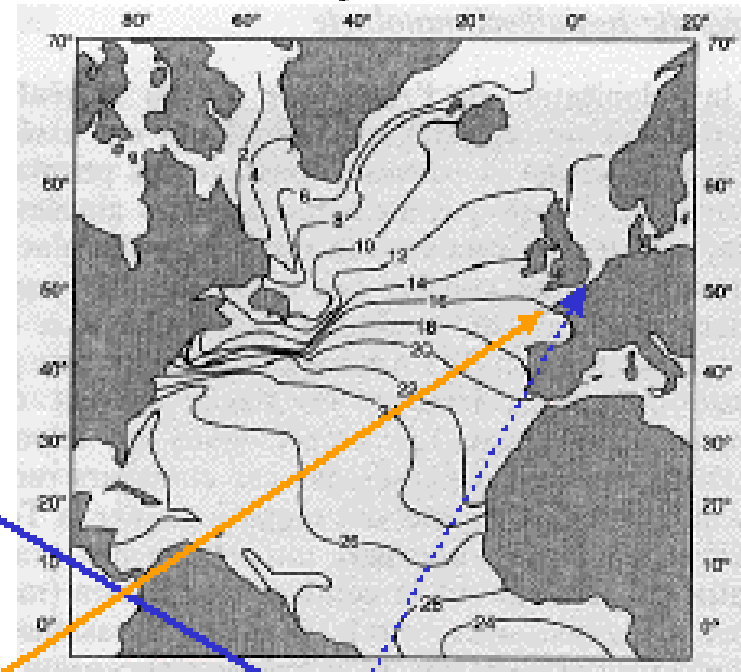
Que va-t-il se passer?

Il y a 20.000 ans



Période glaciaire : d'immenses calottes épaisses de plusieurs km recouvrent l'Amérique et l'Europe du nord. La France est couverte d'une maigre steppe, bien incapable de nourrir des millions d'hommes

Aujourd'hui



Période glaciaire : la température de l'Europe est plus basse de 8 à 10 °C mais celle des tropiques a peu varié

Période glaciaire : on passe à pied sec de France en Angleterre : la mer a baissé de 120 mètres !

- Entre la dernière période glaciaire et aujourd'hui la différence de température moyenne est de 5°C!!!!

2007

LE JOUR D'APRÈS



**Puteaux, février 2006
le climat se dégradait**

**mai 2007
une nouvelle ère glaciaire
s'installait pendant 5 ans.**

<http://sarkozix.canalblog.com/>

Conséquences prévues pour le 21^{ème} siècle

• Négatives

- Recul de la biodiversité
- Impact sur systèmes naturels: glaciers, récifs coralliens, mangroves, forêts boréales et tropicales, écosystèmes polaires et alpins
- Baisse des rendements agricoles en zones tropicales et subtropicales
- Diminution des ressources en eau dans ces régions
- Extension des zones infectées (Choléra, palu,...) 3.5 Mds de personnes
- Risques d'inondations accrus
- Augmentation de la climatisation → augmentation consommation d'énergie
- Baisse des rendements agricoles dans moyenne et hautes latitudes si réchauffement fort

• Positives

- Pétrole plus facile à exploiter (fontes polaires)
- Augmentation de la biomasse (mais baisse du nombre d'espèces cultivées)
- Plus faible mortalité hivernale dans moyennes et hautes latitudes
- Augmentation des ressources en eau dans certaines régions

• Les surprises

- Libération du CH₄ de Sibérie (23 fois plus réchauffant que le CO₂)
→ emballement de la machine climatique
- Perturbation de la circulation des océans → Ralentissement / arrêt du Gulf-stream → **baisse de 5°C en Europe !**

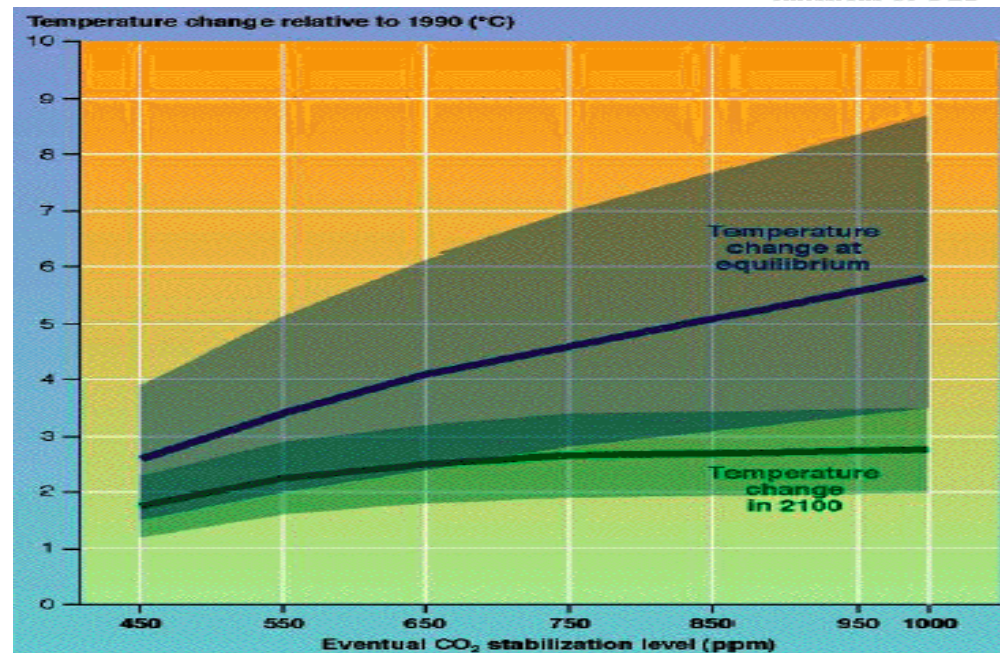
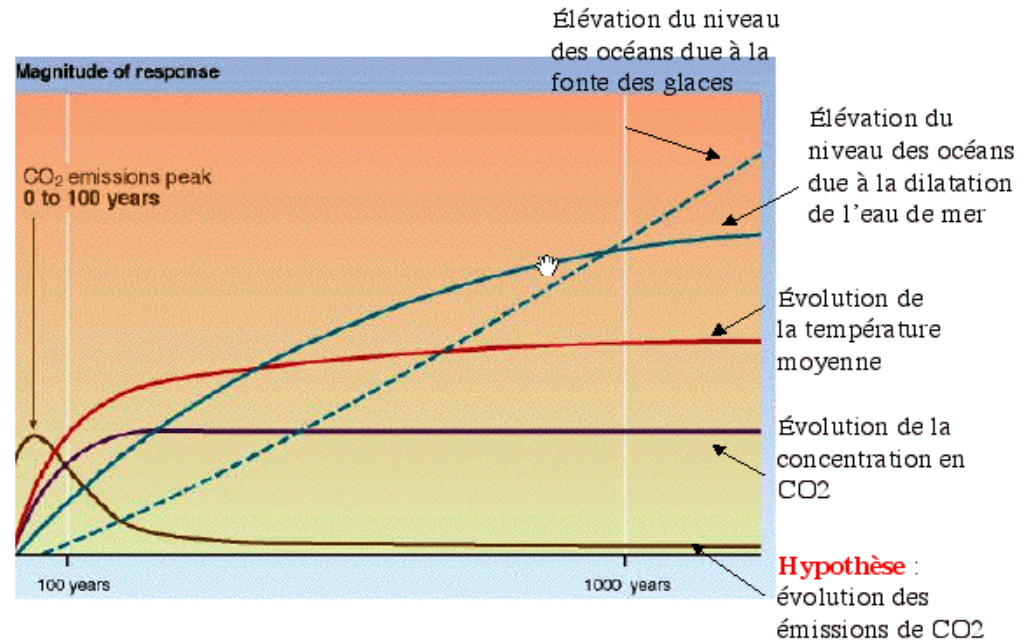
*Cf. annexe 4: Quid des phénomènes extrêmes

*Cf. annexe 5 : Complément aux conséquences des dérèglements anthropiques

*Cf. annexe 6: Autres facteurs/théories de variations climatiques

Et après 2100?

- Les valeurs atteintes en 2100 ne représentent que 50% du max. à venir
- Réponse de la concentration en CO², de la T°C et du niveau des océans en fonction des émissions de CO² →
 - Les GES font « couvercle » tant qu'ils sont présents (1 siècle - pas de possibilité de les retirer)
 - La « réponse » des océans prend des siècles
 - La « réponse » des calottes glaciaires des pôles prend des millénaires
- La stabilisation des concentrations de CO² diminuerait le réchauffement
- Variation de la T°C en fonction du niveau de stabilisation de la concentration de CO² →
 - La diminution est difficile à quantifier



Hypothèse Gaïa (James Lovelock – 1969)

- La totalité de la matière terrestre vivante fonctionnerait comme un vaste système organique; une autorégulation adapterait la planète à ses besoins
 - La biomasse modifie les conditions de vie afin de rendre la planète plus hospitalière (homéostasie*)
- **Daisyworld: modélisation informatique de Gaïa**
 - Planète de type Terre, sans océan, peu de nuages et de GES, le rayonnement solaire augmente progressivement
 - Sa T°C est déterminée par son pouvoir réfléchissant (albédo) → loi de Stefan-Boltzmann
 - 2 espèces vivantes: des pâquerettes blanches et noires (Pb et Pn)
 - A partir de 5°C → germination
 - A 20°C → croissance optimale
 - A 40°C → la croissance cesse
 - Les Pn: plus grande tolérance au froid et absorbent la chaleur solaire
 - Les Pb: ré-émettent la chaleur vers l'espace
- Première saison: dès 5°C → les Pn croissent + vite (elles absorbent + de lumière) → envahissent Daisyworld → la surface et l'atmosphère se réchauffent → favorise la croissance des Pb → **T°C d'équilibre**
- Lorsque la T°C augmente les Pn meurent et les Pb arrivent à stabiliser la T°C à 20°C
- Les Pb réfléchissent la chaleur → la T°C baisse et le cycle recommence
- **La compétition entre les Pb et les Pn installe une T°C qui s'équilibre en offrant un max. de confort**
- Elaboration par J. Lovelock d'un modèle avec 3 à 20 espèces de P de couleurs # vivant en compétition:
 - Le modèle à 10 fleurs est aussi stable que le modèle à 2 fleurs et contrôle la T°C avec + de précision
- Il incorpore l'environnement physique dans le modèle (lapins, renards,...) la stabilité des modèles s'accroît

→ **Lovelock démontre ainsi l'effet stabilisateur de la biodiversité**

• L'homéostasie est la capacité à conserver l'équilibre de fonctionnement en dépit des contraintes extérieures

Théorie du Chaos appliquée aux prévisions climatiques – Prédictibilité d'Edward Lorenz

- « Effet papillon »

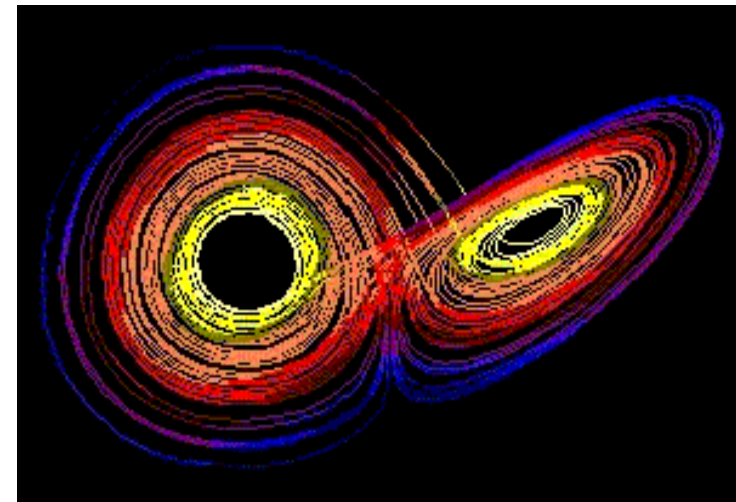
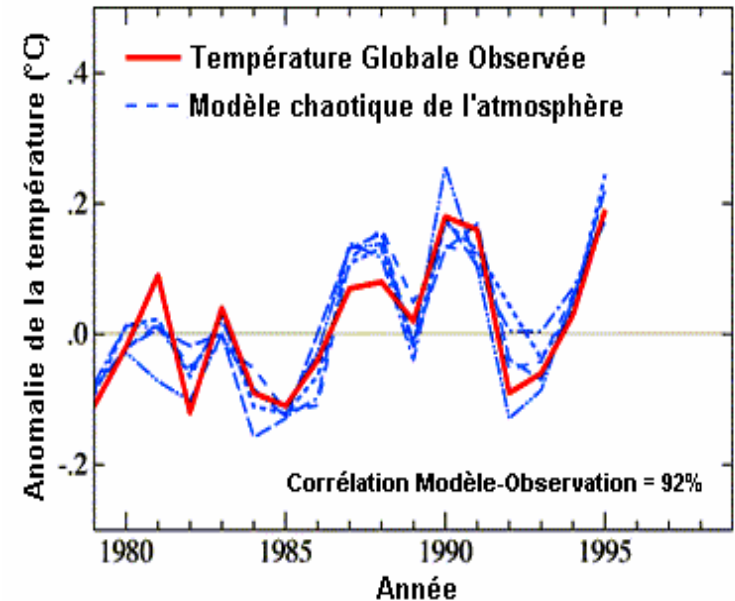
- « Prédictibilité: le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tempête au Texas ? »
 - (métaphore du phénomène de sensibilité aux conditions initiales en théorie du chaos - cf. sphères de Poincaré)
- toute perturbation quadruple de taille chaque semaine
- Prévisions météo impossibles à long terme: Incertitude de saisie de 1/1 000 000 entraîne une prévision erronée

Les mesures de température observées correspondent à 92% à l'évolution d'un système chaotique→

- Impossible de tenir compte de tous les paramètres perturbateurs
- Impossible de codifier leurs effets (appréciation, stockage)
- Accepter une marge d'erreur dans les prévisions « Limite de prévisibilité »
 - 10 jours aujourd'hui (l'atmosphère oublie tout en 2 semaines).
 - Progrès de 1 jour tous les 5 ans
 - Idem pour les prévisions océaniques: quelques semaines

- Système dynamique de Lorenz (Cf. annexe 7)

- Système d'équations simplifiées pour représenter le couplage atmosphère / océan (3 paramètres réels)
 - Lorsque les paramètres prennent chacun une valeur particulière le système présente un « attracteur étrange » →
 - Pour presque toutes les conditions initiales, la trajectoire suit l'attracteur
 - Dans ce cas l'ordre a émergé du Chaos → **Emergence** (le contraire de l'Effet papillon)



Conclusion (1^{ère} partie)

- L'homme est responsable du réchauffement
- Le réchauffement a changé le climat
- Effets défavorables et bénéfiques (eau, agri. écosystèmes, santé,...)
- Effets défavorables proportionnels à importance et rapidité du changement
- Les résultats des modèles sont controversés
- L'absence de certitudes n'est pas une raison de statu quo



Plan de la présentation

- Le protocole de Kyoto
- Politique mondiale et réchauffement climatique
- Le cas des États-unis
- De la volonté commune à l'action individuelle
 - Exemple de démarche individuelle
- Impact du prix du pétrole sur les comportements
- Le cas de la France
- L'utopie des Énergies Renouvelables
- Les actions pour lutter contre les gaz à effet de serre

Vers une action « presque » mondiale : le protocole de Kyoto

- Origine
 - Conférence de Rio de Janeiro (1992)
 - Protocole de Kyoto (décembre 1997)
- Le grand principe
 - Réduire les émissions de GES (-5% par rapport au niveau de 1990)
 - Critères : développement économique, industrialisation, niveau actuel d'émission
- Les mécanismes de suivi
 - Mesure des émissions – évaluation des actions mise en place
 - Instauration de mécanismes financiers
- Les non signataires principaux
 - Les États-unis
 - Australie

Politiques mondiales et réchauffement climatique

- Les oppositions
 - Le réchauffement climatique : un problème de riche?
 - Pays en voie de développement vs pays développés
- Les intérêts économiques
 - Les nouvelles puissances (Chine, Inde, ...)
 - Développement économique et GES
- Kyoto et après? Le cas hollandais
 - Le Pays Bas ont atteint les objectifs de Kyoto pour 2010
 - Arrêt de subvention pour l'implantation d'éoliennes

Le cas des Etats Unis

- **La philosophie gouvernementale**
 - Réguler les industries énergétiques est économiquement insensé
 - L'économie doit financer elle-même les solutions technologiques innovantes
- **Le rôle des états : l'exemple de la Californie (12^{ème} plus gros pollueur mondial)**
 - La restriction des GES (-25% en 2020) – marché du carbone
 - Le développement des énergies renouvelables
 - L'amélioration de l'efficacité énergétique dans le bâtiment
 - ...et une plainte pour nuisance publique auprès des 6 plus grands fabricants de voiture...
- **Et si l'évolution de sa position venait d'en bas?**
 - Regroupement des maires pour agir et respecter Kyoto (294 maires de petite à très grandes villes – 50 M d'habitants)
 - La volonté d'agir, même contre la volonté gouvernementale
 - Un programme environnemental nécessaire à l'élection du prochain président

De la volonté commune à l'action individuelle

Niveaux d'actions

Kyoto



Etat



Region



Maire



Initiative individuelle



Individu

- Les points de basculement d'une prise de conscience collective?

- Prix du pétrole
- Réglementation/pénalité
- Prise de conscience (Loi de Franck)
- Accidents...

- Un besoin fort de connecteurs

Qualité

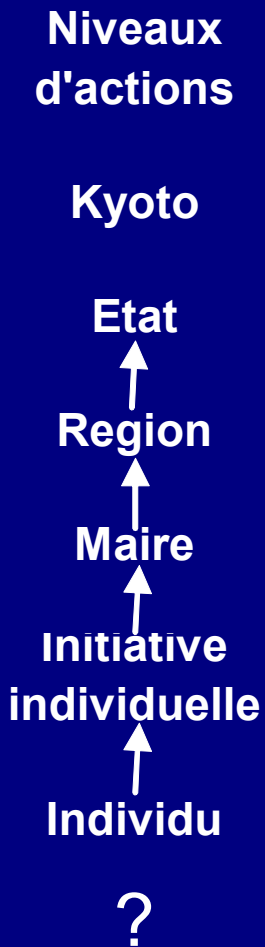
- ✓ Réseau relationnel
- ✓ Savoir reconnu
- ✓ Capacité à promouvoir

Qui?

- ✓ Politique (Al Gore)
- ✓ Chef d'entreprise (Branson)
- ✓ Responsable collectivité locale
- ✓ Media, Star, Sportif,...

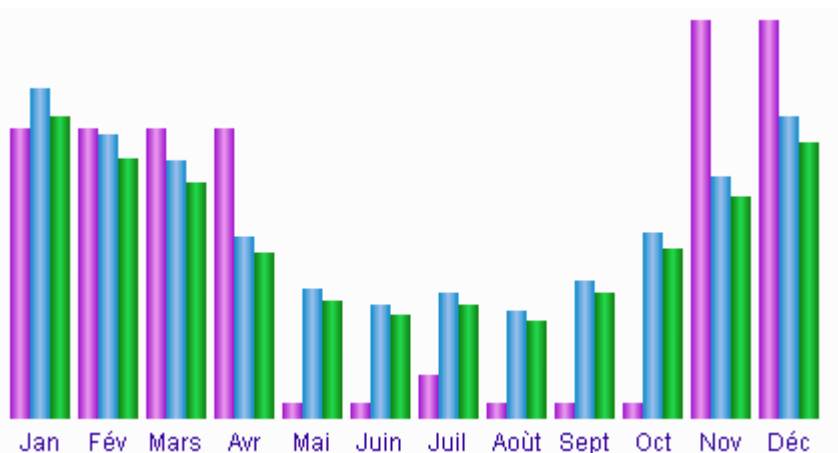
De la volonté commune à l'action individuelle

- Du top-down au bottom-up : utopie?
 - L'implication individuelle au service du collectif
 - Favoriser la sensibilisation (Loi de Franck)
 - Une taxe du particulier est elle possible?
 - A titre individuel, respectons nous les engagements de Kyoto?

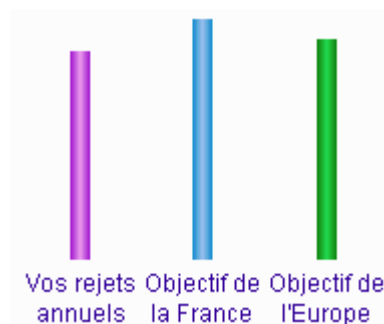


Exemple de démarche individuelle: www.Kyot-Home.com

- Site Internet dédié au calcul des émissions de GES à la maison
- Objectif :
 - Ratifier vous-même le protocole de Kyoto
 - Suivre vos consommations énergétiques
 - Vérifier que vous respectez le protocole
 - Réduire vos consommations énergétiques



KYOT'HOME
le protocole à la maison



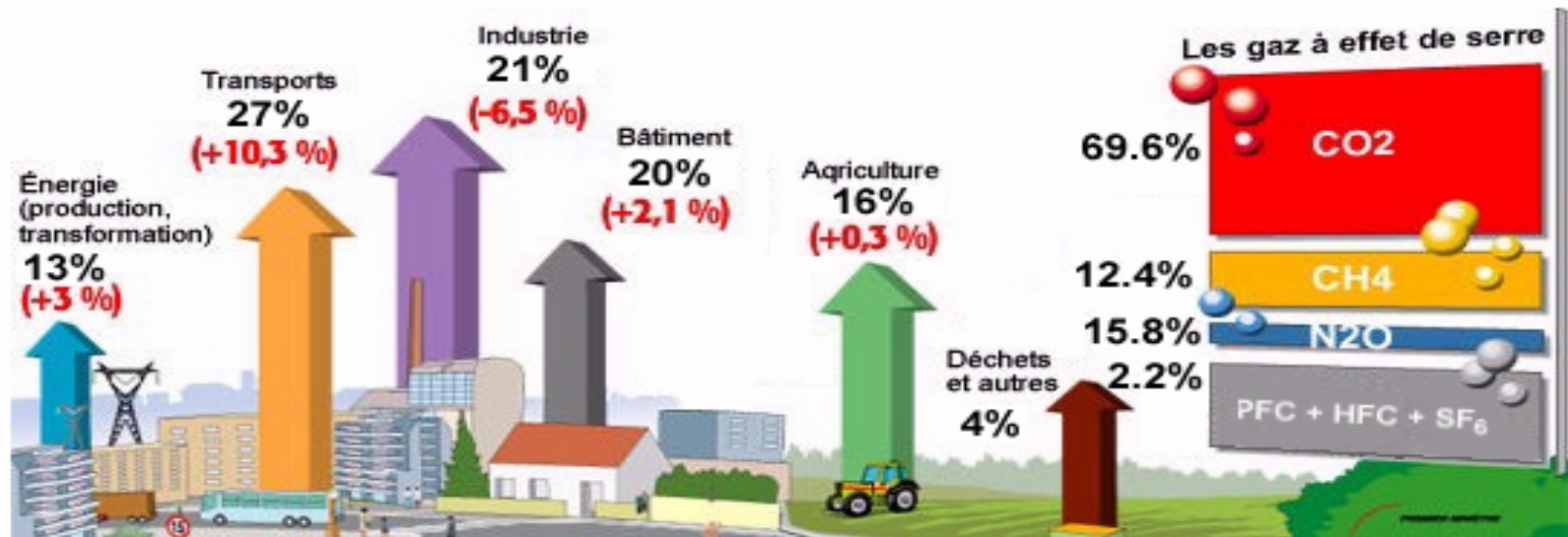
L'impact du prix du pétrole sur les comportements

Prix du pétrole

	<40\$	entre 40 et 60\$	> 60\$
Utilisation Énergies plus polluantes	Forte consommation de pétrole. Autre énergie peu rentable	Faible, plutôt développement de nouvelles technologies gaz (GNL, GTL,...) et d'infrastructures gaz.	Forte. Relance du charbon (Chine)
Exploration nouveaux gisements	Non rentable pour les gisements les plus délicats	Oui dans certaines régions du globe (Iran, Russie,...) mais pas de nouveaux acteurs	Oui (ex: fonds sous marin profonds) Traitement des huiles lourdes. Ouverture nouveaux gisements (Canada)
Bio carburants	Peu d'investissement. Prix trop élevé face aux carburants traditionnels	Faible, et avec intervention de l'état	Oui avec adaptation des constructeurs et nouveaux producteurs
Développement ENR	Non rentable	Développement avec financement public	Investissement rentable avec intervention de l'état
Économie d'énergie	Non. Pas de changement des habitudes de vie. Forte augmentation de la consommation	Oui mais peu d'investissement, et faible prise de conscience	Fort avec remise en cause équipements, mode de vie,...
Conséquence sur l'effet de Serre	Consommation à outrance notamment aux États-unis, rentabilité des énergies propres mauvaise, pas de marge d'investissement pour les compagnies pour la captation des gaz : situation dangereuse.	Scénario plus favorable, en particulier grâce aux gaz naturels qui sont plus propres, déblocage des investissements pour réduire la dépendance aux hydrocarbures (nucléaire).	Scénario probablement le plus favorable, à condition que l'utilisation des huiles lourdes, des ressources non conventionnelles et du charbon soit maîtrisée. Sinon, le danger est très fort.

Émission de GES en France

- Part relative des activités dans les émissions de GES en France et leur croissance en l'absence de mesures nouvelles. Chiffres CITEPA 2000



CO₂ = Dioxyde de carbone

CH₄ = Méthane

N₂O = Protoxyde d'azote

HFC = Hydrofluocarbone

PFC = Perfluorcarbone

SF₆ = Hexafluoride sulfuré

Différences entre le discours politique et le terrain (France)

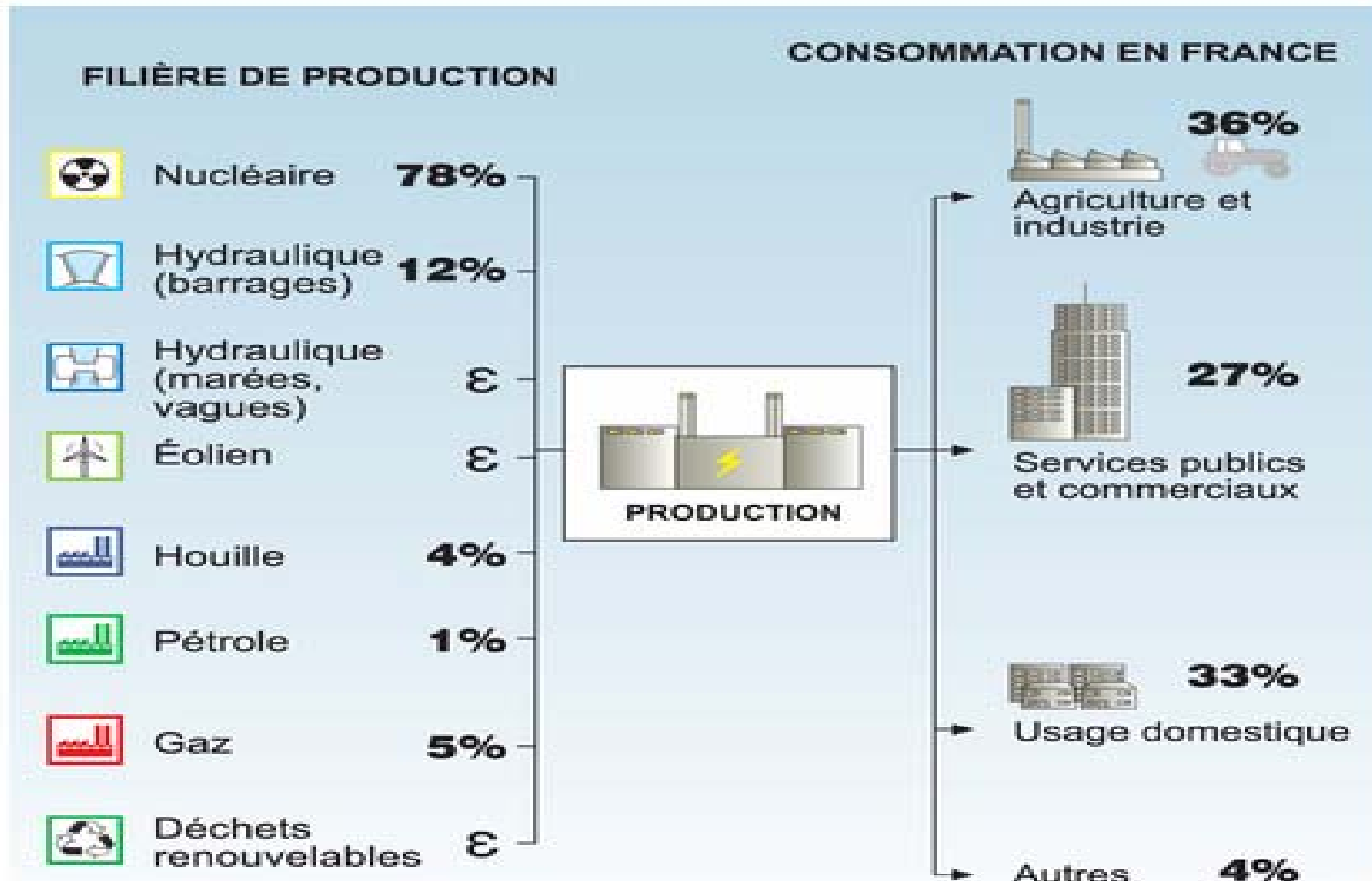
- **La volonté politique**

- Développer les politiques de développement durable et les énergies renouvelables
- Respecter le protocole de Kyoto et réduire par 4 les GES d'ici 2050
- Sensibiliser les citoyens

- **Les moyens mis en œuvre**

- L'Agence De l'Environnement et de l'Économie d'Énergie (ADEME)
- Les subventions pour l'utilisation rationnelle de l'énergie (URE)
- La création des Certificats d'Économie d'Énergie
- Le financement des projets d'énergie renouvelable
- Lancement d'un plan climat

L'électricité en France



Comité Professionnel du Pétrole/IEA

© Petroleum Economist Ltd / Comité Professionnel du Pétrole / IEA

L'utopie des Énergies renouvelables

Part dans la consommation intérieure d'électricité



Source : Observatoire de l'énergie.

Leurs handicaps

- Chères, faibles puissances, dispersées et pas toujours disponibles
- Problématique de l'adéquation offre/demande sur le marché
- Externalités négatives
- Nécessite l'intervention des pouvoirs publics pour le financement
- Leur développement ne peut pas se faire par le simple jeu des marchés

Difficulté d'implémentation d'ENR en France

- Rareté des sites
- Les coûts
- Dépendance des conditions climatiques
- Les pressions de citoyens, riverains et associations

Financement

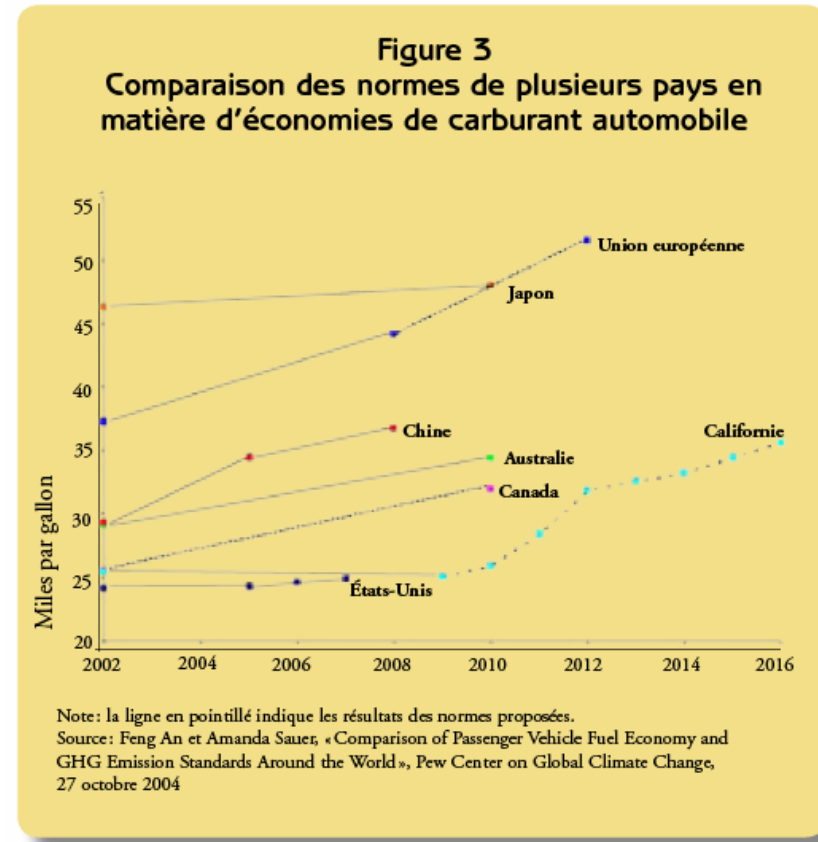
- 60 Mds\$ contre 150Mds pour les énergies fossiles
- Arrêt des subventions en Hollande
- Subvention limitée en France (source ADEME)
- Augmentation des coûts pour la PCH – EDF

Entreprise et changement climatique

- **La rationalité économique**
 - Augmentation du budget énergie
 - Impact fort sur les marges (chimie, verrerie,...)
- **Quels sont les leviers d'actions et mécanisme d'incitation?**
 - La bourse de carbone
 - Les Certificats d'Économie d'Énergie
 - La rationalisation des coûts et la communication
 - La création de normes – Efficacité énergétique
- **Vers une nouvelle norme**
 - Pression sur les grands groupes – quotas CO²
 - Pour une pression top-down vers les sous-traitants?

Les solutions préconisés

- Transport
 - Améliorer l'efficacité des véhicules
 - Réduire les distances parcourues
 - Promouvoir les transports en commun



Les solutions préconisés

- Bâtiment
 - Améliorer l'efficacité énergétique
- Production d'énergie
 - Améliorer le rendement des centrales de production
 - Remplacer le charbon par le gaz dans la production à cycle combiné
- Fission nucléaire
- Énergies renouvelables
 - Éolienne
 - Hydrogène
 - Photovoltaïque
 - Bio carburants
- Décentraliser la production

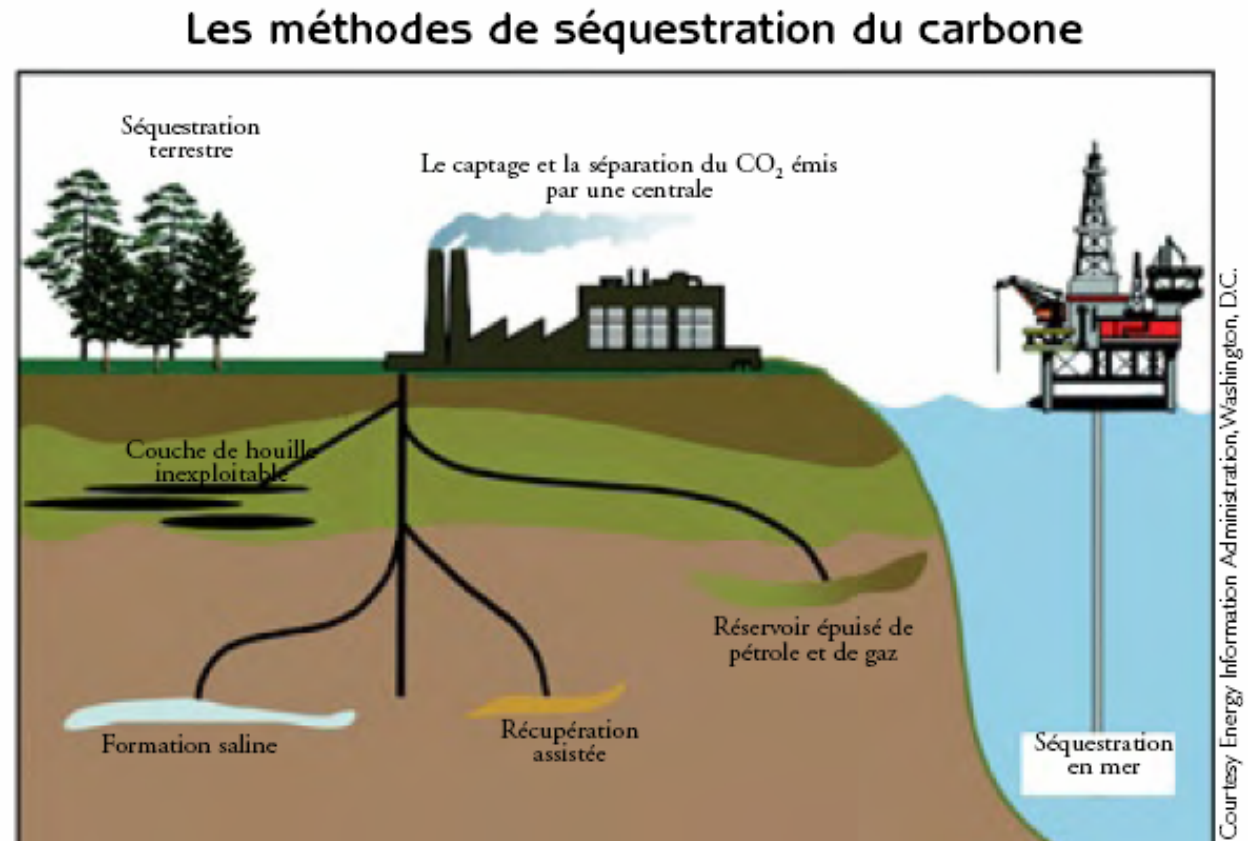
Les solutions préconisés

- Capter et stocker les GES de la production

- ✓ Charbon
- ✓ Hydrogène
- ✓ Fuel synthétique

Lieu de séquestration

- ✓ Terrestre
- ✓ En mer
- ✓ Sous sol



Les solutions préconisés

- Préserver et gérer les forets qui sont d'importants puits de carbone
- Limiter la pollution agricole (excédents azotés)
- Moderniser les actifs industriels
- Obliger les producteurs de biens d'équipements à optimiser l'efficacité énergétique de leurs produits

10 conseils pour réduire vos émissions de GES

Changez d'ampoules : les lampes basse consommation utilisent 4 fois moins d'électricité que les ampoules à incandescence, réduisant d'autant les émissions de CO₂.

Laissez votre voiture au garage : marchez, roulez à vélo, empruntez plus souvent les transports en commun. 1 km en voiture particulière = 154 g de CO₂ dans l'atmosphère en moyenne.

Roulez moins vite et plus cool : rouler à 120 km/h au lieu de 130 km/h vous fait gagner 8 € sur 500 km.

Vérifiez vos pneus : des pneus sous gonflés, même de seulement 0,3 bar, c'est dangereux et ça consomme plus !

Recyclez davantage : en recyclant vos déchets, vous réduirez chaque année vos émissions de CO₂.

Utilisez les produits jetables uniquement à bon escient : passons du mono-usage au durable, chaque fois que c'est possible.

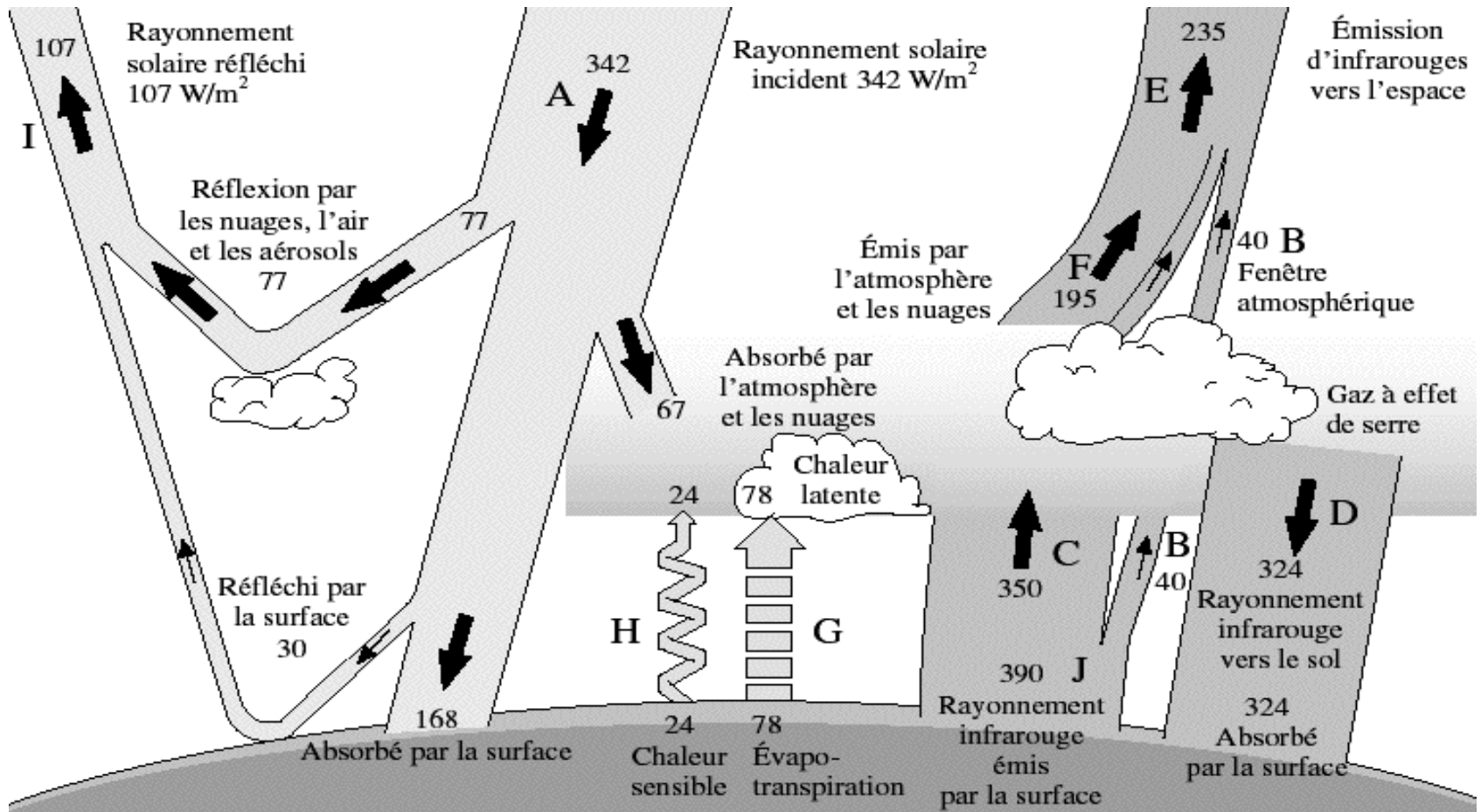
Limitez votre consommation d'eau chaude : prendre une douche plutôt qu'un bain divise au minimum par deux la consommation d'eau. Laver à 20 °C consomme 2 fois moins qu'un cycle à 40 °C.

Chauffez-vous sans gaspiller : renforcer l'isolation thermique de son logement et l'équiper d'une ventilation mécanique divise par 3 ou 4 le besoin de chauffage. Une chaudière régulièrement entretenue permet de baisser sa consommation de 8 à 12 %, une chaudière « basse température » ou « à condensation » de 30 ou 40 % ; mettre en place un système de régulation ou de programmation, c'est encore 10 % de gagné !

Éteignez vos appareils électriques : éteindre votre téléviseur, votre lecteur DVD, votre stéréo et votre ordinateur quand vous ne vous en servez pas fera baisser votre facture et votre impact sur l'environnement.

Sauvegardez les forêts : elles permettent d'absorber une grande quantité de CO₂.

Annexe 0: Bilan radiatif simplifié de l'atmosphère



- Répartition du rayonnement solaire:
 - 30% réfléchi par l'atmosphère et le sol
 - 20% absorbé par l'atmosphère
 - 50% absorbé par la surface
- L'augmentation des GES réduit la « fenêtre atmosphérique » (B), les rayonnements infra-rouge émis par la terre (C) et réfléchis par les GES (D) augmentent → le sol reçoit plus d'énergie → la $T^{\circ}\text{C}$ augmente

Annexe 1: Un peu plus d'histoire (complément)

- 1958: Observatoire de Manau Loa - Début de la mesure en continu de la concentration de CO²
- 1966: Scientif. US – 1^{er} forage glaciaire → carotte de glace d'1 Km → courbe var. de CO² et T°C sur 400 000 ans
- Années 70-80: Les ordinateurs et les satellites permettent le développement rapide de la modélisation climatique
- Années 80: nombreux programmes internationaux sur l'étude du climat lancés.
- 1992: signature de la Convention climat à Rio: « stabiliser les concentrations de GES afin d'empêcher toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique »
- 1997: signature du protocole de Kyoto
- 2001: 3^{ème} rapport du GIEC: « nos émissions de gaz vont modifier le climat – l'élévation de T° depuis un siècle est le début du processus » - prochain rapport 2007

Annexe 1bis – Quelques conséquences du RC déjà observées (complément)

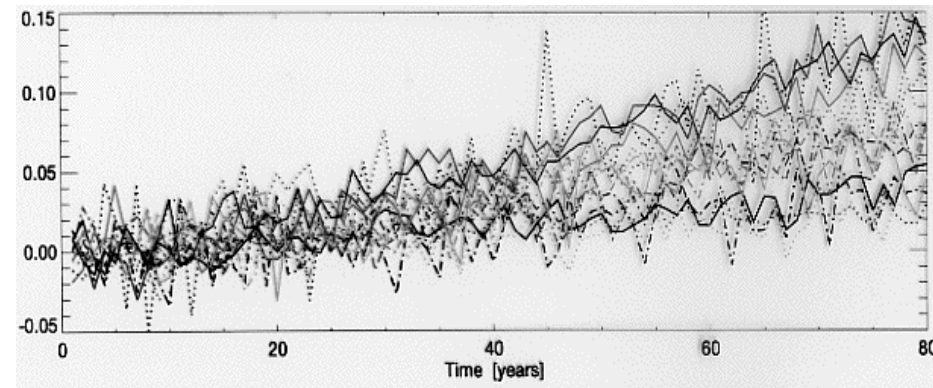
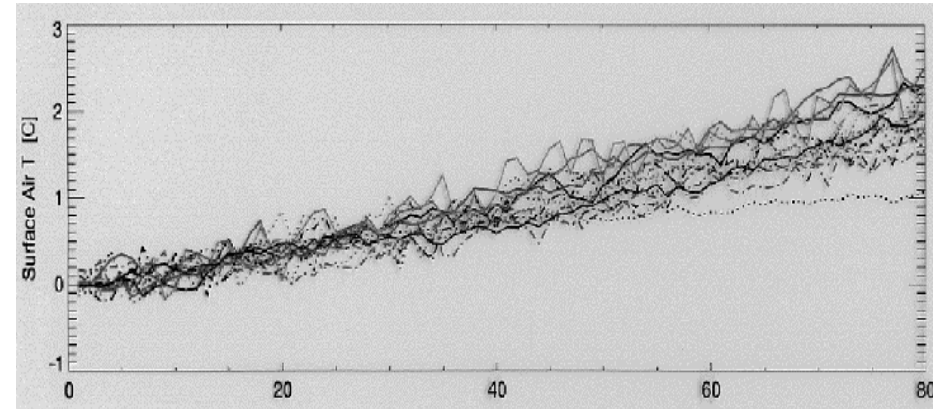
- Glace arctique: diminution déjà constatée de **40% de l'épaisseur** de la calotte glaciaire – diminution de **31% de la surface** depuis 1980 (8 Mkm² en 1980 vs 5.5Mkm² en 2005 !) source ESA
- Couverture neigeuse: diminution de 10% depuis 1960 (date début observations satellites)
- El Nino: manifestations plus fréquentes, plus longues et plus intenses. Observations des 20-30 dernières années, vs 100 antérieures
- Saisons de croissance: plus longues de 1 à 4 jours / décennie dans hémisphère nord.
- Espèces végétales et animales (plantes, insectes, oiseaux, poissons): déplacement vers les pôles et en altitude.
- Reproduction, floraison, migrations: plus précoce

Annexe 2 - Les modèles climatiques (complément)

- Exemple de modèle: GEM d'Environnement Canada
 - Maillage de l'Amérique du nord en « tuiles » de 15 km de côté
 - Nbre de « boîtes » verticales: 58
 - Chaque itération fait avancer la prévision de 450 secondes
- Paramétrisation sous-maille: représenter à gde échelle l'influence moyenne des phénomènes de petite échelle
 - Convection verticale (orages,...)
 - Physique des nuages
 - Effets radiatifs atmosphériques (rayonnement de chaleur)
 - Echanges de chaleur et d'humidité
 - Effet des montagnes et des irrégularités de terrain
- Ex. de simulations:
 - Si on double la résolution spatiale → le Nb de points x 8
 - Si on double la résolution temporelle (pas de temps / 2) → coût informatique x 16
 - Bottle neck: E/S et puissance CP
 - Actuellement, simuler le climat jusqu'en 2100 prend de 9 à 12 mois

Annexe 3 : Que disent les modèles? (complément 1)

- **1,5 < T° < 6°C horizon 1 siècle**
 - Hypothèse concentration CO²: +1% /an (rythme actuel)
Augmentation de la T°C moyenne →
(axe x: 0 = aujourd'hui; axe y en °C)
- **Réchauffement plus prononcé:**
 - La nuit
 - L'hiver (impact végétation)
 - Aux pôles
- **Evolution des précipitations moy. annuelles →**
(axe x: 0 = aujourd'hui; axe y: mm d'eau/jour)
- **Précipitations plus fréquentes ou plus fortes (inondations)**
 - Ex: 0,05mm/jour = 18mm/an = 3,5% précipitations actuelles (520mm/an)

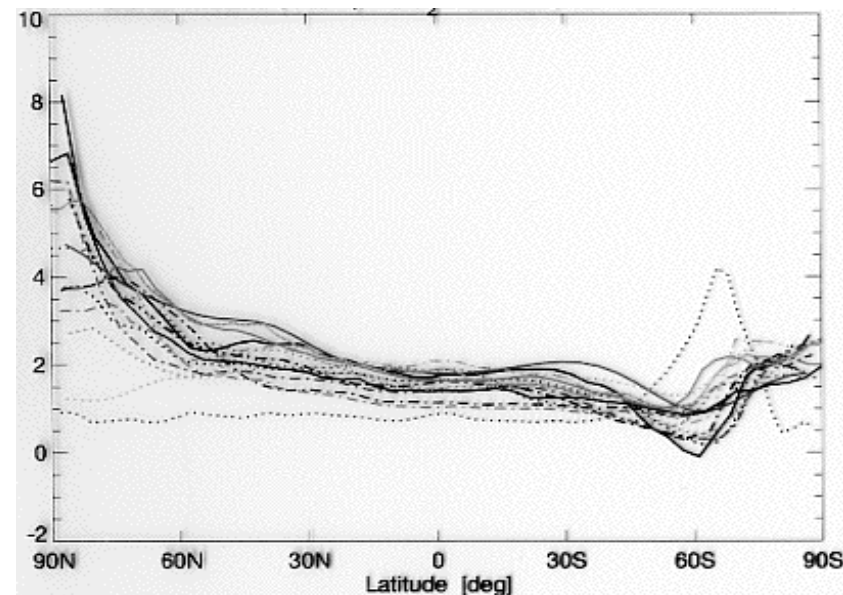
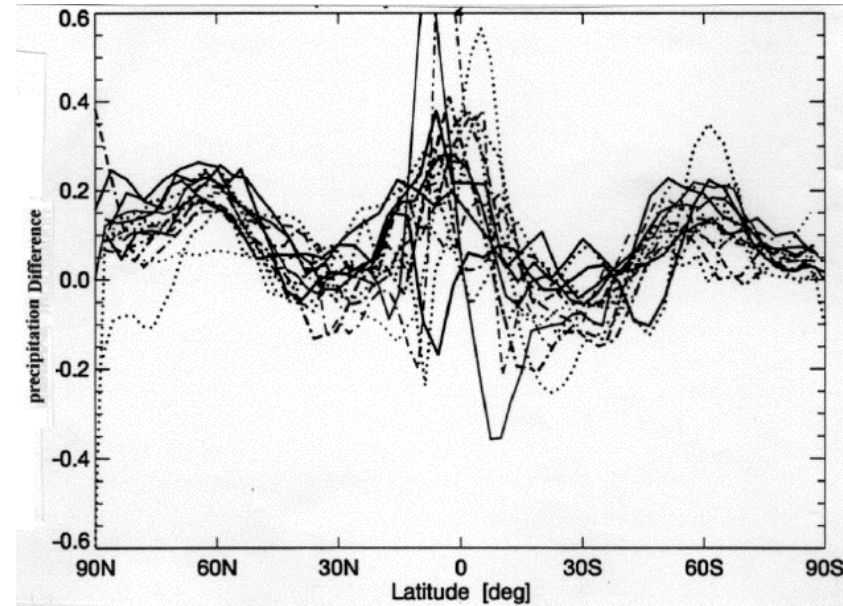


Annexe 3 bis: Que disent les modèles? (complément 2)

Répartition du surplus/déficit des précipitations →

(axe y: en mm d'eau; différence moy/jour entre date de simu future et aujourd'hui)

- Précipitations: disparités f (latitude)
 - 60°N: Ecosse, Norvège: +70mm/an
 - 30°N: Californie, Sahara, Mongolie (-)
 - 30°S: Afrique Sud, Australie, Argentine (- ou =)
- Températures: disparités f (latitude)
 - 90°N: Pôle nord 1^{er} concerné (+8°C!!!)
 - Continents: + 5°C vs médiane= 3°C en 2100
- Horizon 2 siècles: +8 à 9°C !!!



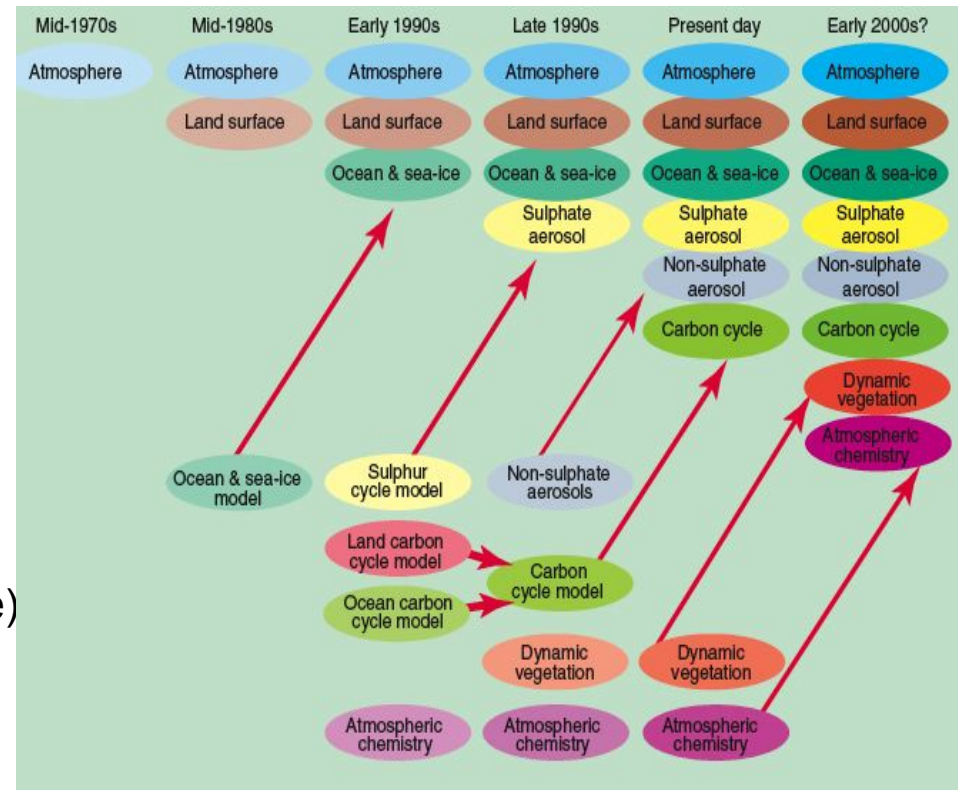
Annexe 3 ter - Peut-on faire confiance aux modèles?

1. Notre système atmosphérique n'est pas entièrement prévisible

2. Simplifications dans la construction des modèles

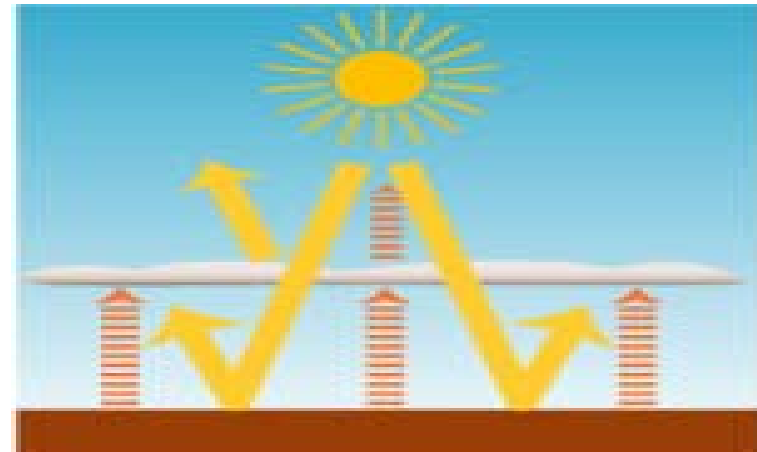
1. Ne représentent qu'une partie du système; « peut mieux faire »:

- Les nuages (petite taille)
- Puits et sources du CO² (océanique/continental)
- Evaporation continentale (petite taille)
- Circulation océanique profonde
- Cycle CH₄ et N₂O
- Augmentation de l'ozone troposphérique
- Aérosols organiques/minéraux



Nuage élevé (Cirrus) : Faible effet parasol / Fort effet de serre →

⇒ La plus dangereuse, la possibilité de changements abrupts dans le réel mal détecté par le modèle



Annexe 4: Quid des phénomènes extrêmes?

Evolution climatique concernée	Cette évolution pourra-t-elle survenir au XXI^e siècle si l'on en croit les simulations climatiques ?	Cette évolution s'est-elle déjà manifestée durant la deuxième moitié du XX^e siècle au vu des données disponibles ?
Augmentation des températures maximales, et des vagues de chaleur	Très probablement pour la quasi-totalité des terres émergées	Probablement
Augmentation des épisodes pluvieux intenses	Très probablement pour de nombreuses zones	Probablement , au-dessus de nombreuses zones des moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord
Augmentation des sécheresses estivales au-dessus des continents	Probablement , pour la majorité de l'intérieur des continents des moyennes latitudes (pas de convergence des simulations dans les autres cas).	Probablement pour quelques régions
Augmentation de la force maximale du vent des ouragans (tropicaux)	Probablement pour certaines zones	N'a pas été constaté dans les quelques analyses disponibles.
Augmentation des précipitations lors des ouragans (tropicaux)	Probablement pour certaines zones	Pas assez de données disponibles pour une évaluation
Augmentation du nombre d'ouragans ou de leur zone de survenance	Incertain	Incertain

Annexe 5 – Complément aux conséquences des dérèglements anthropiques

- **Effet Bascule**

- Les effets de ces dérèglements ne sont pas indépendants. Ils influent les uns sur les autres avec **des risques de bascule** d'un scénario modéré vers un scénario catastrophique, ce qui est appelé un emballement.

- **La rétroaction**

- Les effets combinés sont extrêmement complexes car se créent des boucles de rétroaction.
- Rétroaction ou feedback, est l'action en retour d'un effet sur le dispositif qui lui a donné naissance, et donc, ainsi, sur elle-même. C'est à dire que la valeur de sortie (à une date antérieure) fait partie des éléments de la commande du dispositif.
- Les rétroactions sont très importantes dans de nombreux domaines car une rétroaction positive amplifie le phénomène
- une rétroaction négative le réduit, provoque un amortissement
- la rétroaction peut avoir un effet variable (la rétroaction est parfois positive, parfois négative) selon les conditions et notamment selon le délai de transmission (paramètre important) et l'inertie du système, ce qui induit des effets très variés (cycle, comportement chaotique, etc)]

Annexe 6 - Autres facteurs / théories de variations climatiques

- **Paramètres de Milankovic (1911-1941)**
 - Les périodes glaciaires et interglaciaires s'expliqueraient par les var. d'excentricité, d'obliquité et de précession terrestre. Non significatifs sur une période de 1 000 ans. Théorie crédible à approfondir.
- **Effet Albédo**
 - Rapport énergie solaire réfléchi/incident; en période glaciaire la surface réfléchissante augmente → albédo augmente → renforce l'ère glaciaire; inverse en interglaciaire → amplifie l'ES
- **Crises volcaniques**
 - Les éruptions volcaniques ont perturbé le climat durant des centaines d'années; vitesse événement incompatible avec évolution espèces
 - Perturbations visibles récentes: Pinatubo /1988 (0.1°C à 0.2°C); Luka /Islande / 1775
- **Nuages interstellaires**
 - Lors d'un passage du système solaire dans nuage interstellaire → énergie solaire absorbée → influe sur Quantité de chaleur → influe sur climats. Théorie controversée.
- **Tâches solaires (Schwabe 1840 – Hale 1906)**
 - Nombre de tâches solaires important → baisse d'énergie solaire → influe sur climats – cycle de 11 ans. Théorie controversée, explique les faibles changements tous les 11 ans
- **Déplacements des continents vers les pôles**
 - En se déplaçant, les continents forment ou arrêtent les courants marins – Ex: Avant la migration vers le nord, de l'Australie, l'Afrique et l'Amérique du sud, Climat Antarctique chaud et humide
- **Cycles climatiques**
 - Cycles de 100 000 ans s/ 400 000ans
 - Début de cycle: réchauffement brutal
 - Période interglaciaire chaude de 10 000 à 20 000 ans
 - Refroidissement progressif et glaciation
 - Réchauffement brutal et amorce nouveau cycle
 - Nous sommes en période interglaciaire depuis 10 000 ans...
- **Obscurcissement global (Global dimming)**
 - Réduction graduelle de la lumière diurne (G. Stanhill mesures 1950-1985)
 - Diminution de 8% à 30% (Russie)
 - Cause: Augment. Aérosols
 - nuages + réfléchissants
 - moins de condensation → moins de pluie
 - Effet de serre sous-estimé
 - Si pollution combattue → effet de serre plus fort → **Réchauffement climatique 8° / 10°**
 - Effet 11 septembre (interdiction vols / 3 jours) → **augmentation écart T° entre jour/nuit = 1°!**
- **Hypothèse Gaïa (James Lovelock – 1969)**
- **Prédictibilité (Edward Lorenz)**

Annexe 7 – Modèle dynamique de Lorenz

- **Modèle de Lorenz**
- Mathématiquement, le couplage de l'[atmosphère](#) avec l'[océan](#) est décrit par le système d'[équations aux dérivées partielles](#) couplées de [Navier-Stokes](#) de la [mécanique des fluides](#).
- Ce système d'équations était beaucoup trop compliqué à résoudre numériquement pour les premiers ordinateurs existant au temps de Lorenz.
- Celui-ci eut donc l'idée de chercher un modèle très simplifié de ces équations pour étudier une situation physique particulière : le phénomène de [convection](#) de Rayleigh-Bénard.
- Il aboutit alors à un système dynamique différentiel possédant seulement *trois* degrés de liberté, beaucoup plus simple à intégrer numériquement que les équations de départ.
- **Système dynamique différentiel de Lorenz**
- Ce système différentiel s'écrit (cf. bas de slide)
- Dans ces équations, σ, ρ et b sont trois paramètres réels.
- **Points fixes**
- Les points fixes du système sont les solutions (x, y, z) *constantes* du système différentiel. Il en existe trois :
- le point fixe $(0, 0, 0)$, qui existe quelles que soient les valeurs des paramètres réels σ, ρ et b , et deux autres points fixes symétriques.
- **Attracteur étrange**
- Lorsque les paramètres σ, ρ et b prennent les valeurs suivantes : $\sigma = 10$, $\rho = 28$ et $b = 8/3$, le système dynamique différentiel de Lorenz présente un superbe [attracteur](#) étrange en forme d'ailes de papillon.
- Pour presque toutes les conditions initiales (différentes de celles des points fixes), l'orbite du système se promène sur l'attracteur, la trajectoire commençant par s'enrouler sur une aile, puis sautant d'une aile à l'autre pour commencer à s'enrouler sur l'autre aile, et ainsi de suite, de façon apparemment erratique.

$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x)$ $\frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y$ $\frac{dz}{dt} = xy - \beta z$	σ is called the Prandtl number and ρ is called the Rayleigh number. All $\sigma, \rho, \beta > 0$, but usually $\sigma = 10$, $\beta = 8/3$ and ρ is varied. The system exhibits chaotic behavior for $\rho = 28$ but displays knotted periodic orbits for other values of ρ. For example, with $\rho = 99.96$ it becomes a $T(3,2)$
--	---

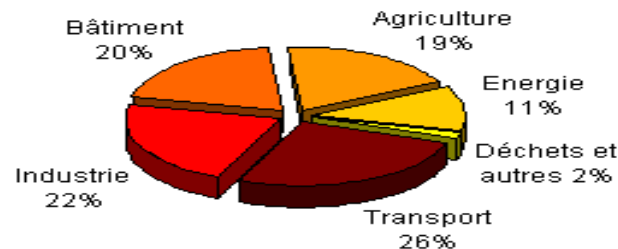
Annexe 8 - Quels actes de la vie courante font de l'effet de serre?

Actes de la vie courante	Type d'énergie utilisée	Quantité de combustible	Quantité de CO ² émis (1)	Commentaires
Se chauffer (maison)	Fioul	3000 litres	2.4	29 780kW h
	Gaz naturel		1.9	29 780kW h
	Electricité		0.6	France -90% nucléaire et Hydro
			3.8	Grande-Bretagne - 30% nucléaire
			4.0	USA - 20% nucléaire
Se déplacer			5.5	Danemark
	Essence petite cyl.	5 litres	0.8	15 000kms/an
	Essence grosse cyl.	14 litres	2.0	15 000kms/an
	RER		0.035	Banlieusard - 30 kms domicile
	Train		0.035	10 A-R Paris-Marseille
	Avion court courrier		1.2	10 A-R Paris-Marseille / 2ème classe
			2.7	10 A-R Paris-Marseille / classe affaire
	Avion long courrier		0.9	1 A-R Paris-New-York/ 2ème classe
			3.15	1 A-R Paris-New-York/ Classe affaire
	Bateau		0.040	1 A-R Paris-New-York/ 2ème classe
Actes de la vie courante	Type de production	Quantité produite	Quantité de CO ² émis (1)	Commentaires
Se nourrir	Blé	1 tonne	0.110	
	Viande de bœuf	1 tonne	4.0	
	Volaille	1 tonne	0.5/1.5	
Fabriquer	Acier	1 tonne	0.8	
	Aluminium	1 tonne	3.0	
	Plastique	1 tonne	0.5/1.6	
	Verre	1 tonne	0.4	0.12 sion part de calcin
	Ciment	1 tonne	0.25	

(1) En tonnes équivalent carbone

Emission moyenne annuelle par Français = 2.2 tonnes équivalent carbone

Quel secteur est le plus responsable des émissions de gaz à effet de serre ?



Annexe 9 - Déclaration des Académies des Sciences

- Le CC est une réalité
 - L'homme est responsable du réchauffement
 - CO²: de 280ppm → 375ppm
 - T° a augmenté de 0.6°C au 20^{ème} siècle
 - Le réchauffement a changé le climat
 - Rémanence du CO² → réchauffement inévitable
 - Part prévis. des énergies fossiles = 85%
 - Prévisions 2100: entre 1.4°C et 5.8°C de plus vs T° 1990
 - L'absence de certitudes n'est pas une raison de statu quo
- Se préparer aux conséquences
 - Effets défavorables et bénéfiques (eau, agri. écosystèmes, santé,...)
 - Effets défavorables proportionnels à importance et rapidité du changement
 - Augmentation fréquence et gravité événements météo
 - Modification courants océaniques
 - Elévation niveau de la mer: 6M de pers.
- Appels aux leaders mondiaux
 - Reconnaître menace CC (évidente et croissante)
 - Lancer étude pour définir les scénarii de GES
 - Identification mesures à bon rendement coût / efficacité pour réduire GES
 - Aider pays en voie de développement pour compromis réduction GES / essor économique
 - Montrer l'exemple énergies propres et performantes et partager avec autres pays
 - Mobiliser communauté scientifique pour accroître R&D dans CC

Bibliographie

- **Sites @**

- <http://www.manicore.com/documentation/serre/>
- <http://www.ipcc.ch/>
- <http://www.greenfacts.org/fr/dossiers/changement-climatique/liens/giec.htm>
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>
- <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/sysfacte/effetserre/>
- <http://www.effet-de-serre.gouv.fr>
- <http://www.criseclimatique.fr/>
- [http:// www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- [http:// www.kyot-home.com](http://www.kyot-home.com)
- <http://www.effet-de-serre.gouv.fr/>
- [http:// www.negawatt.fr](http://www.negawatt.fr)

Bibliographie

• Ouvrages

- L'Avenir Climatique – Jean-Marc Jancovici
(<http://www.manicore.com/documentation/serre/>)
- Rapport du GIEC (<http://www.ipcc.ch/pub/un/syrfrench/spm.pdf>)
- Lutte contre l'effet de serre – Enjeux et débats – AFD –
(www.diplomatie.gouv.fr/fr/IMG/pdf/luttecontreleffetdeserre.pdf)
- Cut-and-past Memo: « Climat et Chaos » - Michel Bloch
- Le mal de Terre – Hubert Reeves (www.hubertreeves.info/livres/maldeterre.html)
- Chronique du ciel et de la vie - Hubert Reeves
(<http://www.hubertreeves.info/biblio.html>)
- Le syndrome du Titanic – Nicolas Hulot
- Atlas de la menace climatique – Frédéric Denhez
- Les Grandes Batailles de l'Energie – Jean Marie Chevalier
- Energie propre : Les diverses solutions - Revue électronique du
Département d'État des États-unis
- La révolte des maires américains – Le Monde 11/10/06