



Energie nucléaire et Climat

Blandine Antoine
Blandine -point- antoine -at- m4x -point- org
(avec l'aide d'Elodie Renaud, de Claire Lecointe et de Michel Gonin)
www.promethee-energie.org

Institut Notre Dame, Saint Germain en Laye, le 11 Janvier 2008

De quoi allons nous discuter :

- L'énergie aujourd'hui dans le monde:
quels défis pour notre génération ?
- L'énergie nucléaire
 - Fondamentaux
 - La pratique

De quoi allons nous discuter :

- L'énergie aujourd'hui dans le monde:
quels défis pour notre génération ?
- L'énergie nucléaire
 - Fondamentaux
 - La pratique

Qu'est-ce que l'énergie ?



Comment définir l'énergie?



Quelles formes revêt-elle?



Pour quelles actions
en avons-nous besoin?



D'où vient-elle?



Tout ! (ou presque)



Partout ! (ou presque)

Réponses

- Définition: Faculté d'un système à produire un travail (phys)
Matière première ou phénomène pouvant produire un travail (éco)
- Formes:
 - Énergie mécanique
 - Énergie lumineuse
 - Énergie thermique (chaleur)
 - Énergie électrique
 - Énergie magnétique
 - Énergie gravitationnelle
 - Énergie nucléaire
 - ...
- Énergie primaire, énergie secondaire
- D'où viennent celles que nous utilisons?
 - **85% d'énergies fossiles** : 34% pétrole + 25% charbon + 21% gaz
 - 13% d'énergies renouvelables (dont 2% d'hydro)
 - 6% d'énergie nucléaire

Energie et Développement (1)

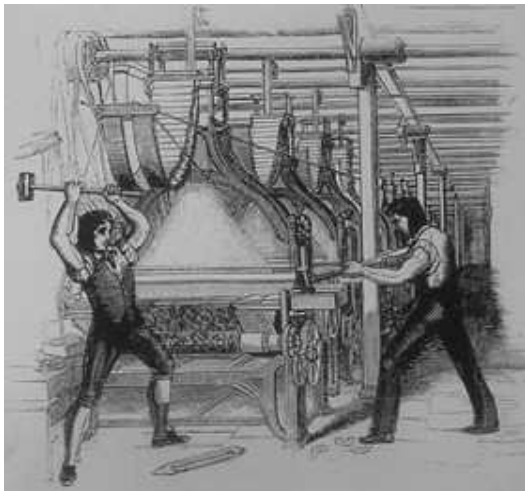
- Domestication du feu : - 400 000 ans
 - Cuisson de la nourriture → santé, longévité
 - Chauffage → convivialité
 - Eclairage → art, culture, religion
 - Développement des arts, outils et armes
- Apprivoiser la force animale : - 10 000 ans (Néolithique)
 - Essor de l'agriculture: accroissement de la productivité
 - Mobilité → voyages, communication, atout militaire stratégique
- Utilisation des forces naturelles
 - Moulins à vent (Hollande, Espagne)
 - Aubes à eau



Energie et Développement (2)

- Charbon et Vapeur : la révolution industrielle en l'Europe (XIX^{ème})

Difficile transition: ex. des Luddites

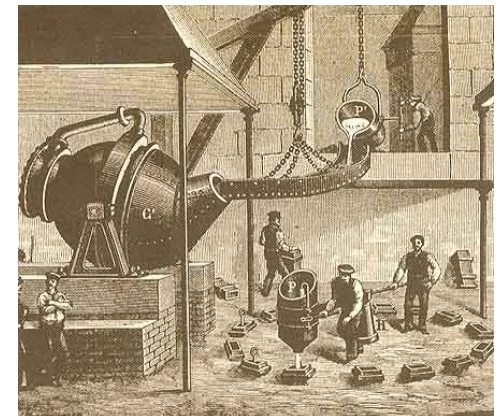


La machine à vapeur
(1784, Watt)

Pollution urbaine



Développement des
industries (textile, acier...)



Energie et Développement (3)

- La civilisation du pétrole : XX^{ème} siècle

« L'or noir »

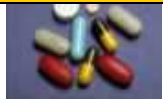


Détergents

Adhésifs



Médicaments



Plastiques

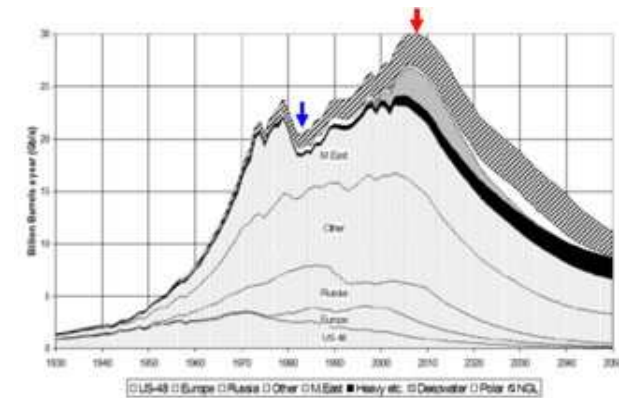
Nylon et fibres synthétiques



Cosmétiques



Des ressources concentrées

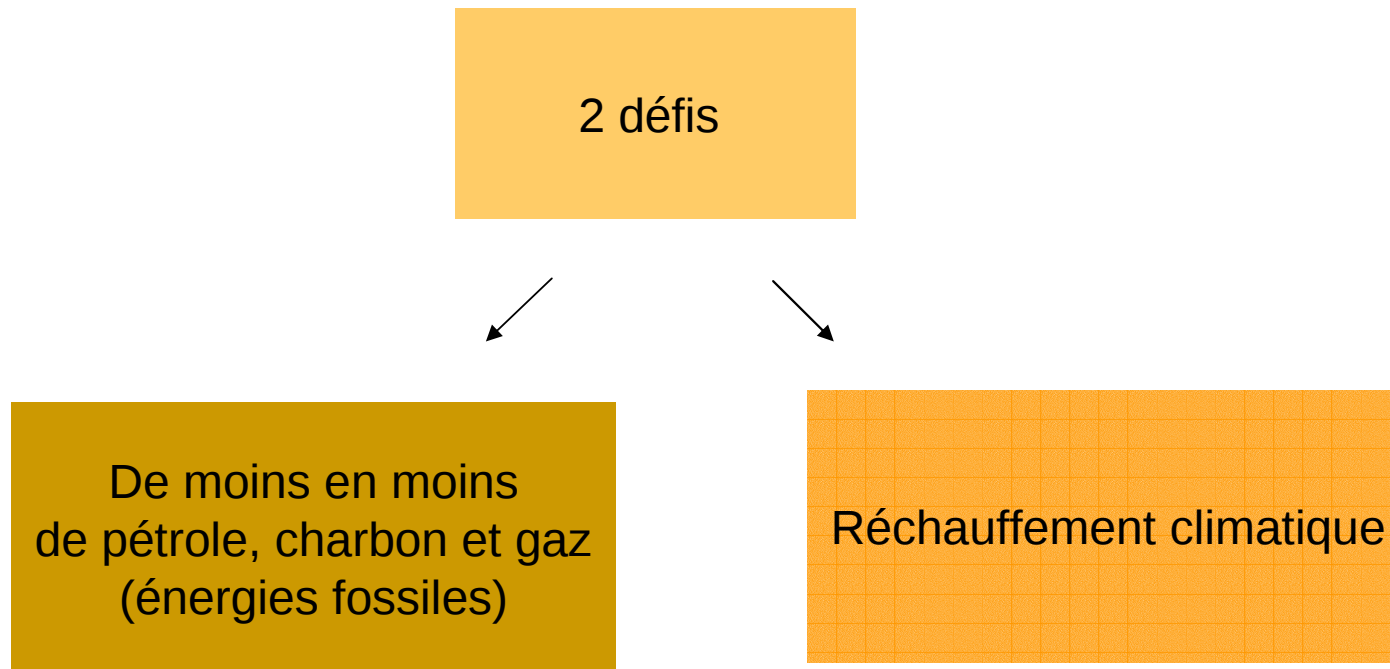


Des ressources limitées



Impacts environnementaux ...
locaux et mondiaux

L'énergie aujourd'hui



Rareté croissante des énergies fossiles



Effet de serre et réchauffement climatique



LES EXPERTS SONT FORMELS :
LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE
EST EN MARCHE

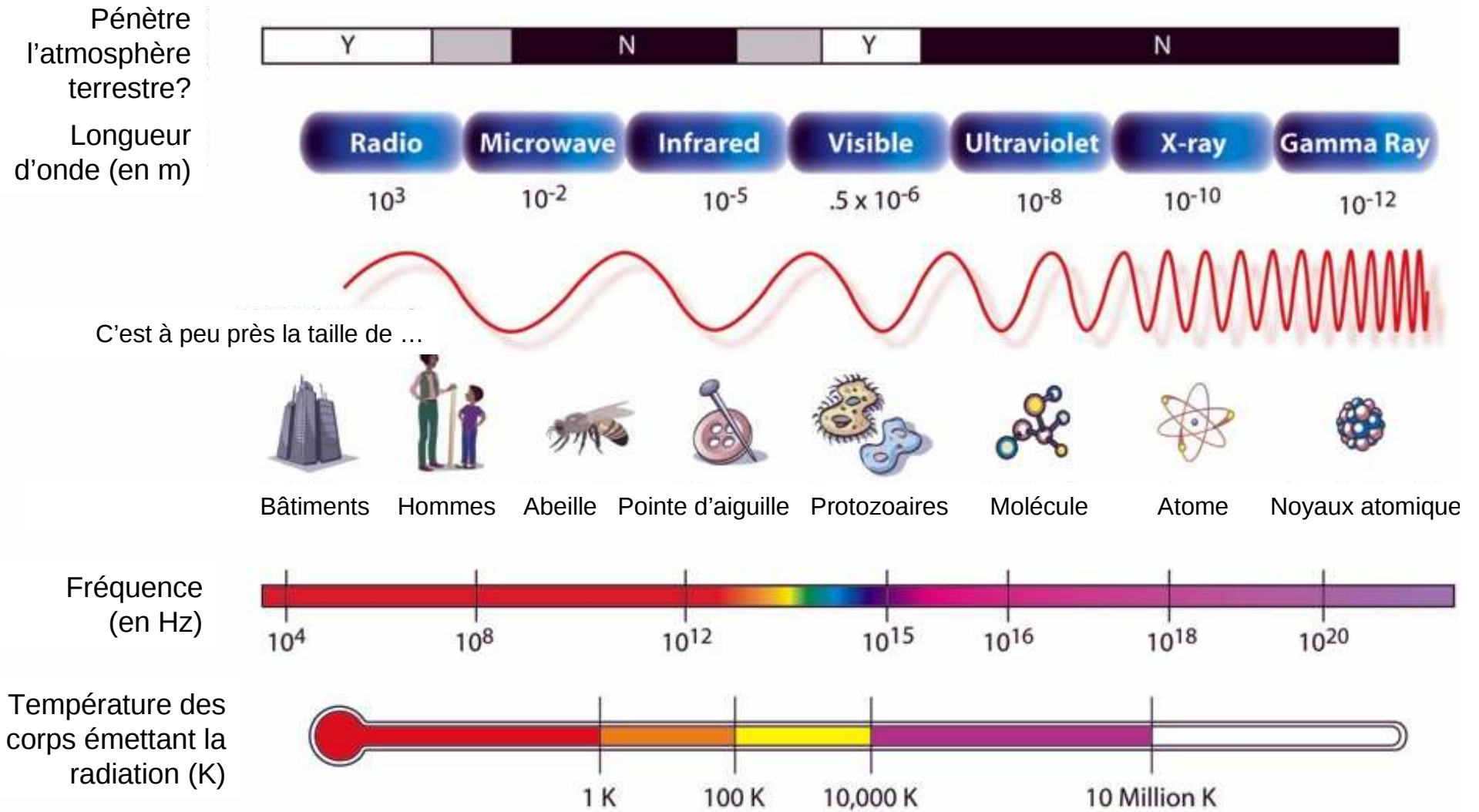


Radiation des Corps Noirs

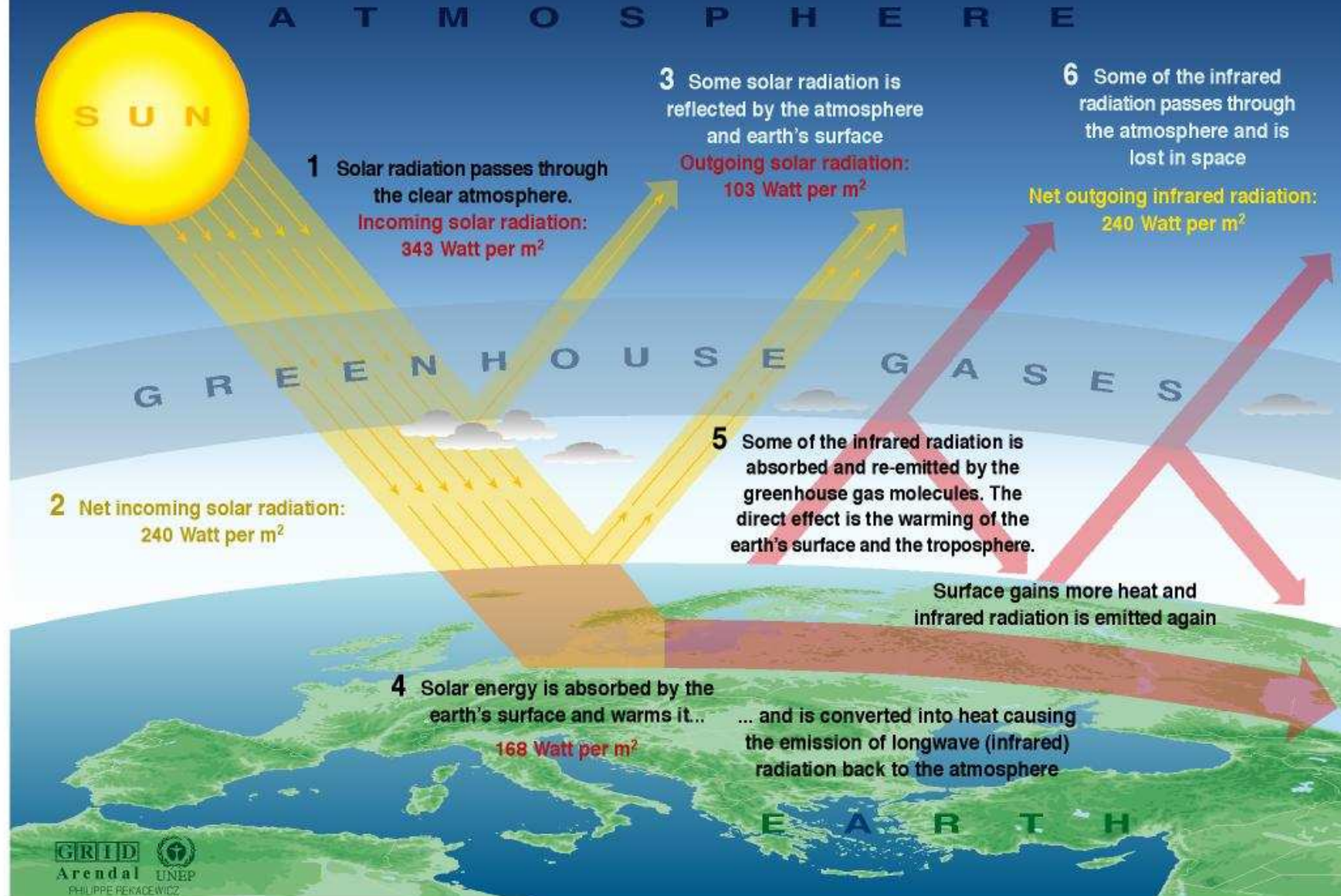
- La lumière peut être visible, mais la plupart du temps, elle ne l'est pas
 - Rayons gamma, X ou ultra-violet (UV)
 - Lumière visible
 - Infra-rouge (IR), micro-ondes, ondes radio
- La lumière est caractérisée par l'**énergie** qu'elle transporte. Elle est inversement proportionnelle à sa **longueur d'onde**.
- Les corps chauds émettent des radiations
 - le Soleil
 - une barre de fer chauffée à rouge
 - un four
 - le corps humain !

$$T\lambda_{\max} = 2.898... \times 10^6 \text{ nm K.}$$

Le spectre électromagnétique



L'effet de serre

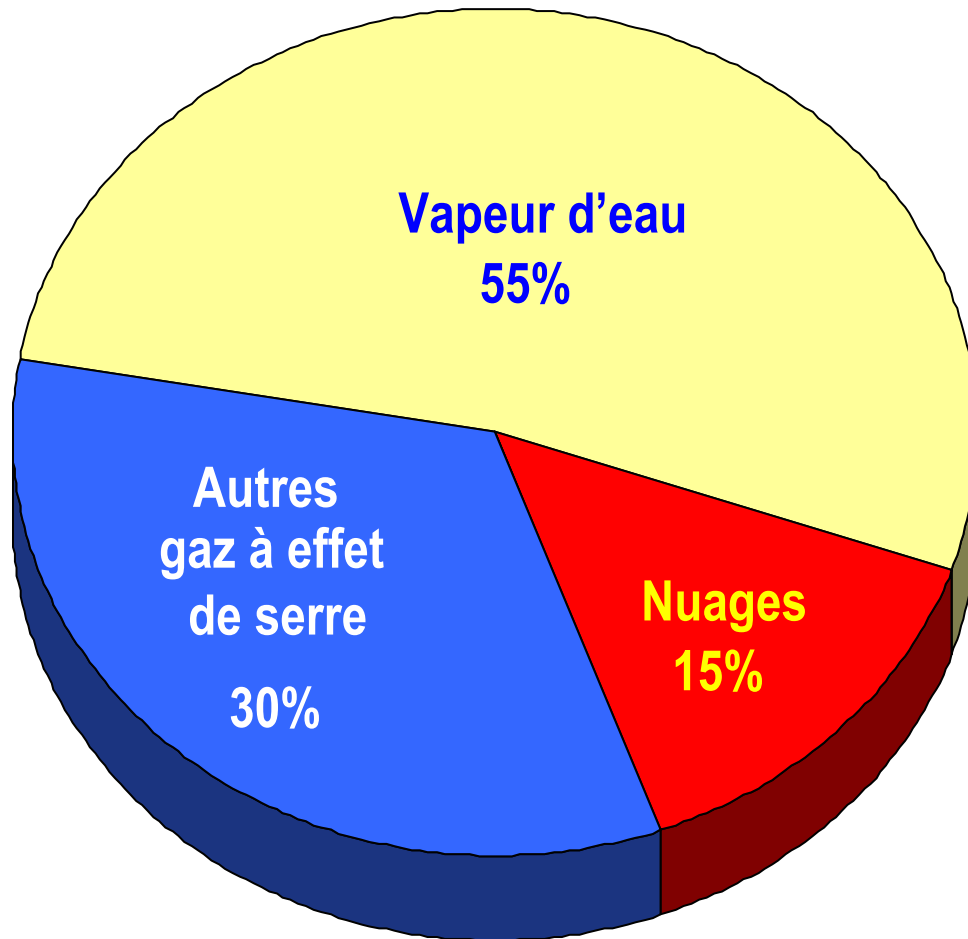


Sources: Okanagan university college in Canada, Department of geography, University of Oxford, school of geography; United States Environmental Protection Agency (EPA), Washington; Climate change 1995, The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge university press, 1996.

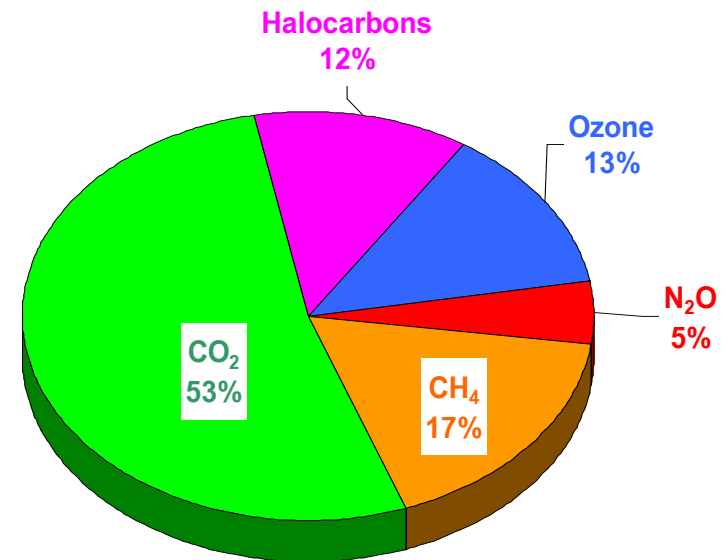
Gaz à effet de serre et pouvoir d'échauffement

GES	Temps de vie (années)	PEG (20 ans)	PEG (50 ans)	PEG (100 ans)
CO ₂ (dioxyde de carbone)	150	1	1	1
CH ₄ (méthane)	12	62	23	7
N ₂ O (oxyde nitreux)	114	275	296	156
CFC-11	45	6 300	4 600	1 600
CFC-12	100	10 200	10 600	5 200
HCFC-22	12	4 800	1 700	540
HFC-134a	14	3 300	1 300	400
CF ₄	50 000	3 900	5 700	8 900
SF ₆	3 200	15 100	22 200	32 400

Contribution à l'effet de serre



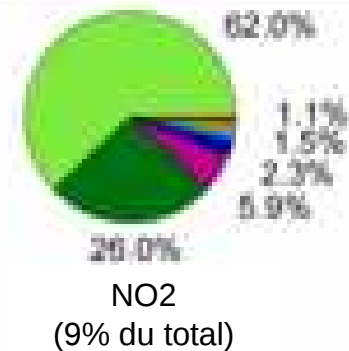
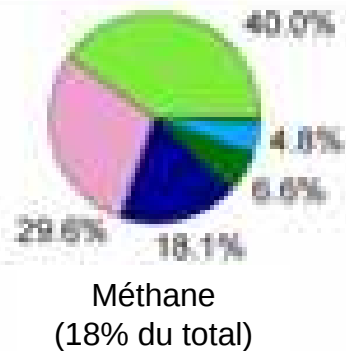
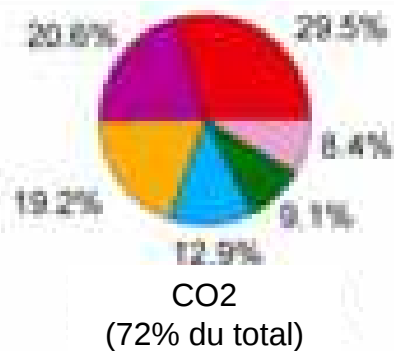
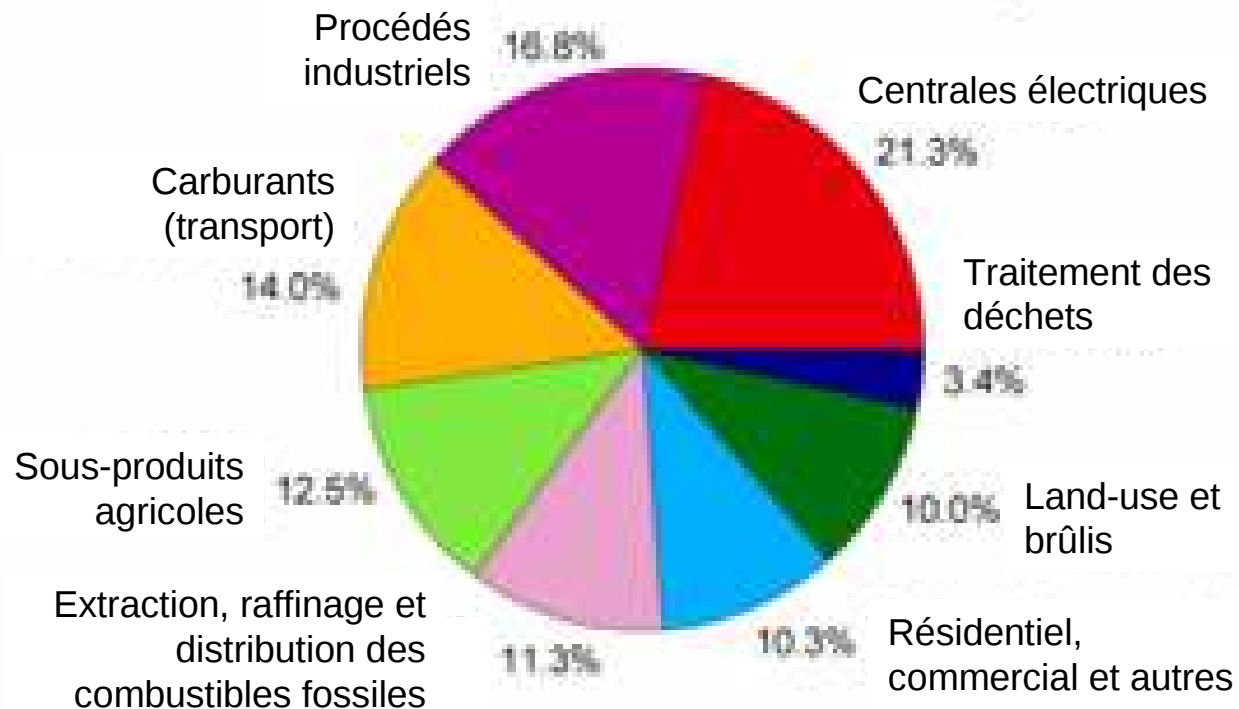
Natural
(155 W/m²)



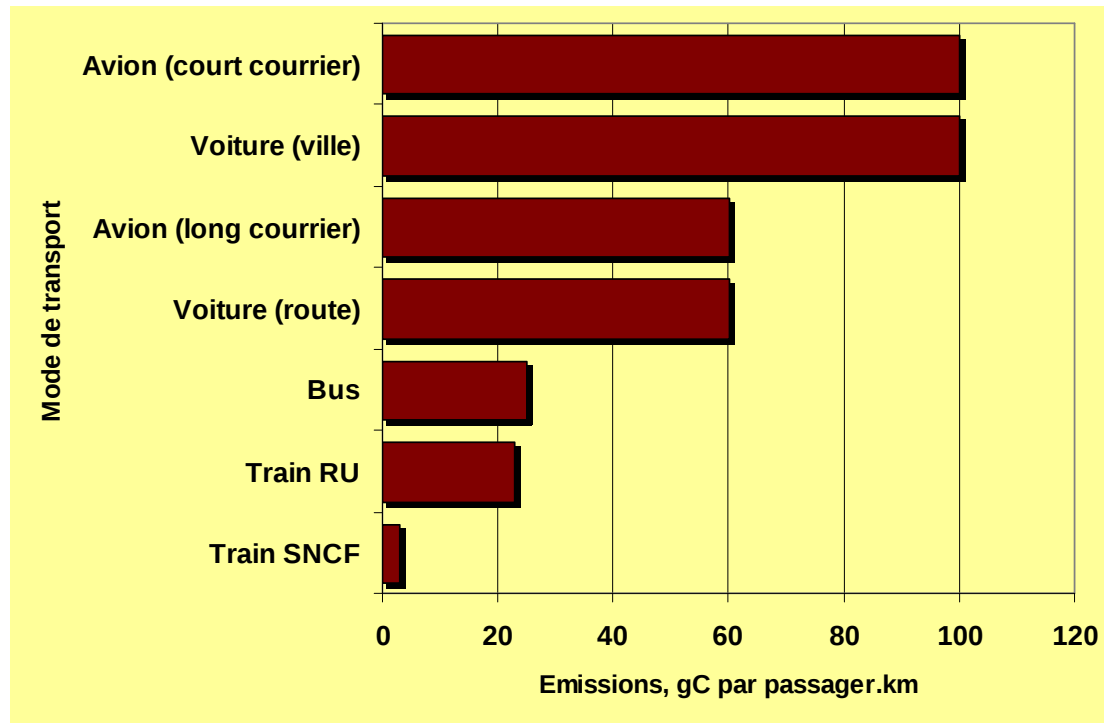
Additionnal
(2.8 W/m²)

D'où viennent-ils?

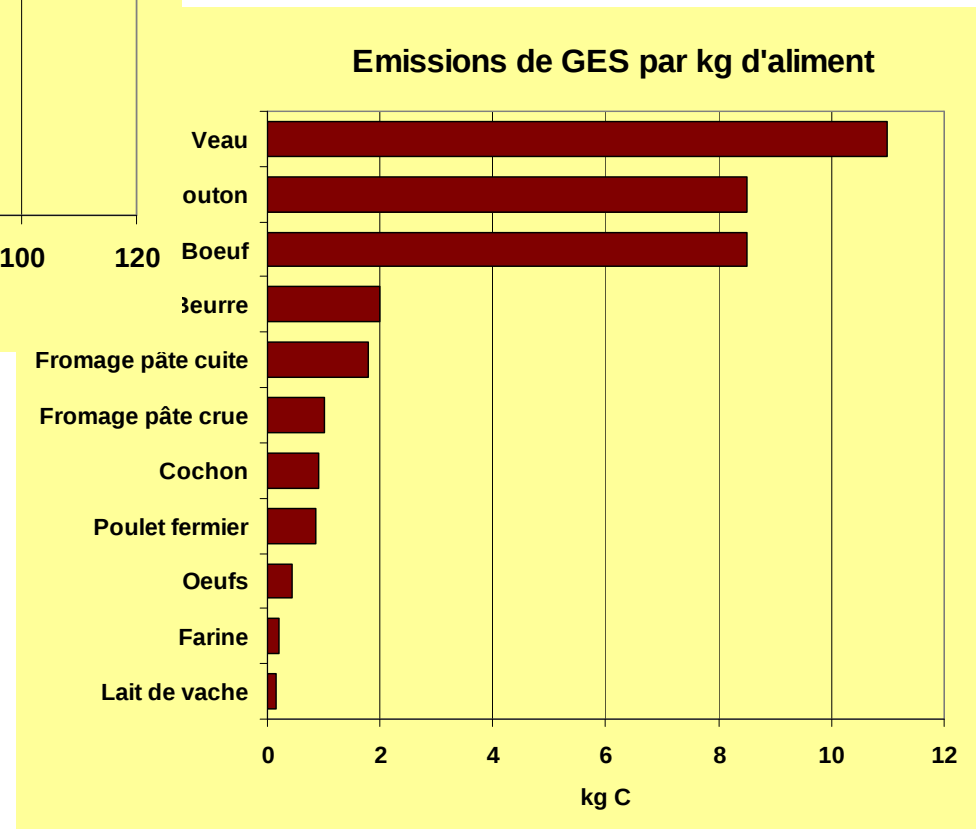
Emissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité



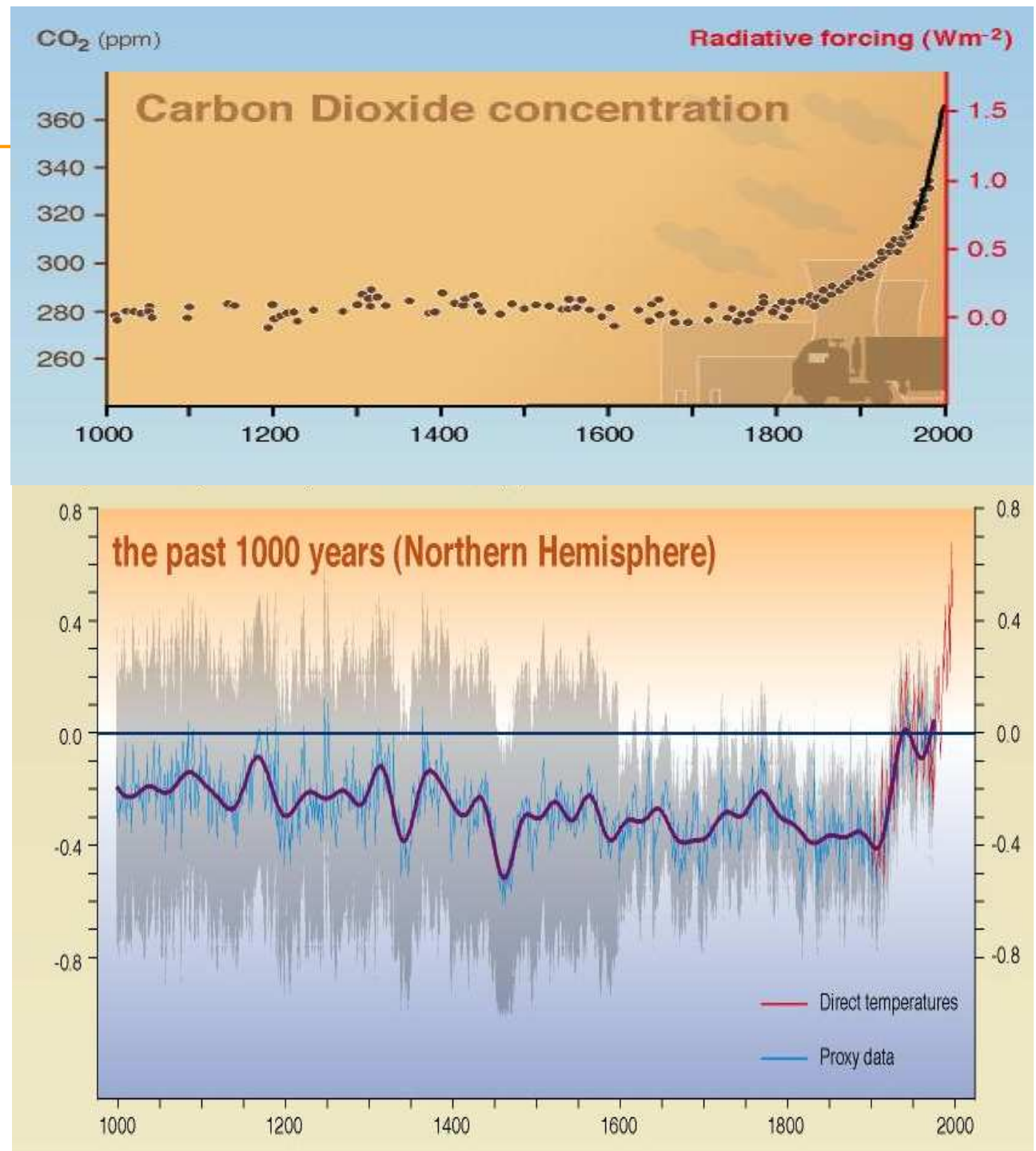
Emissions de tous les jours



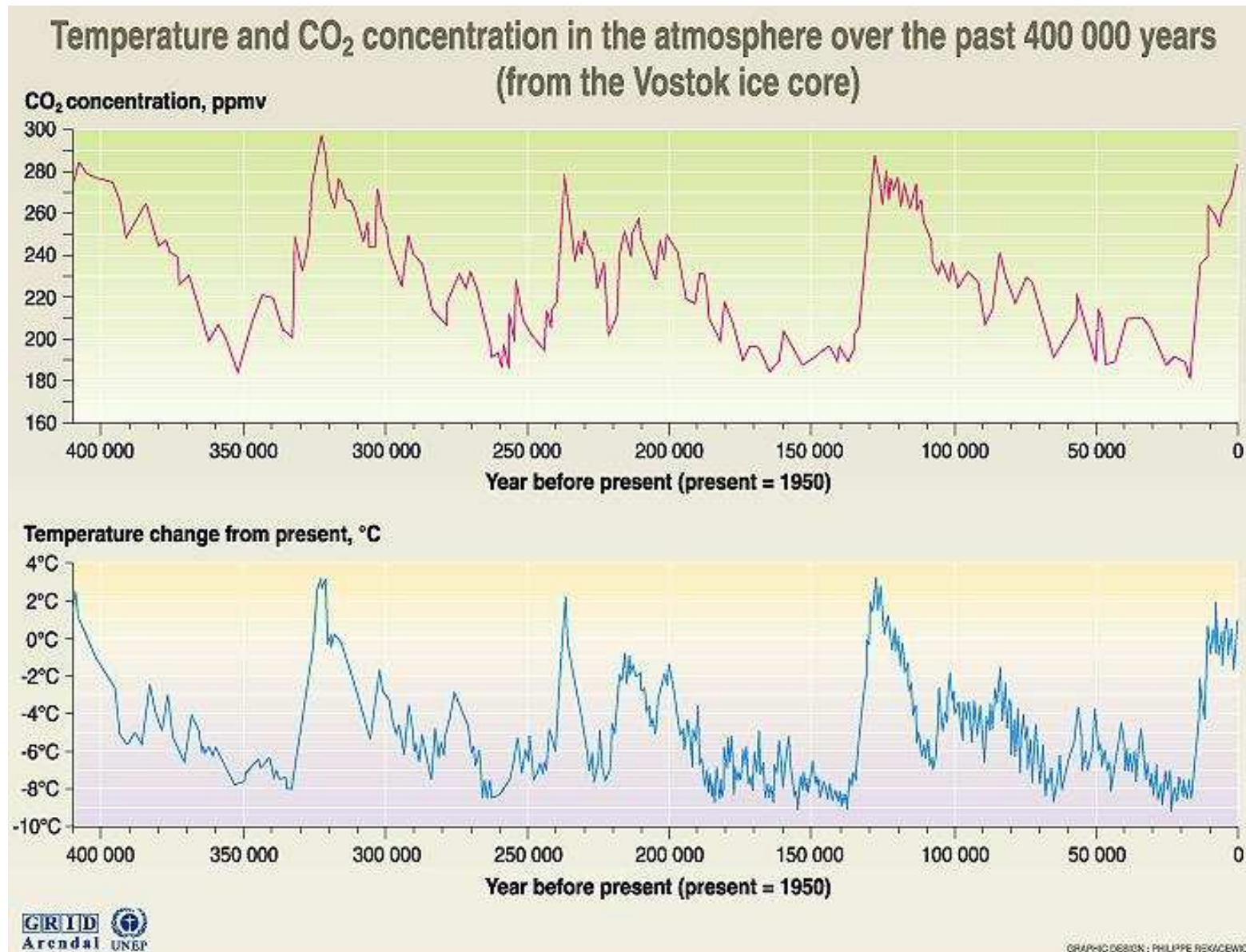
Jancovici, 2002



Coupable !



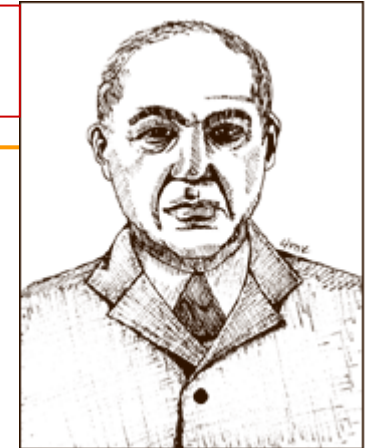
Lien entre température et CO₂



Source: J.R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, Nature 399 (3June), pp 429-436, 1999.

L'évolution au cours du quaternaire s'explique par des mécanismes lents

Milankovitch

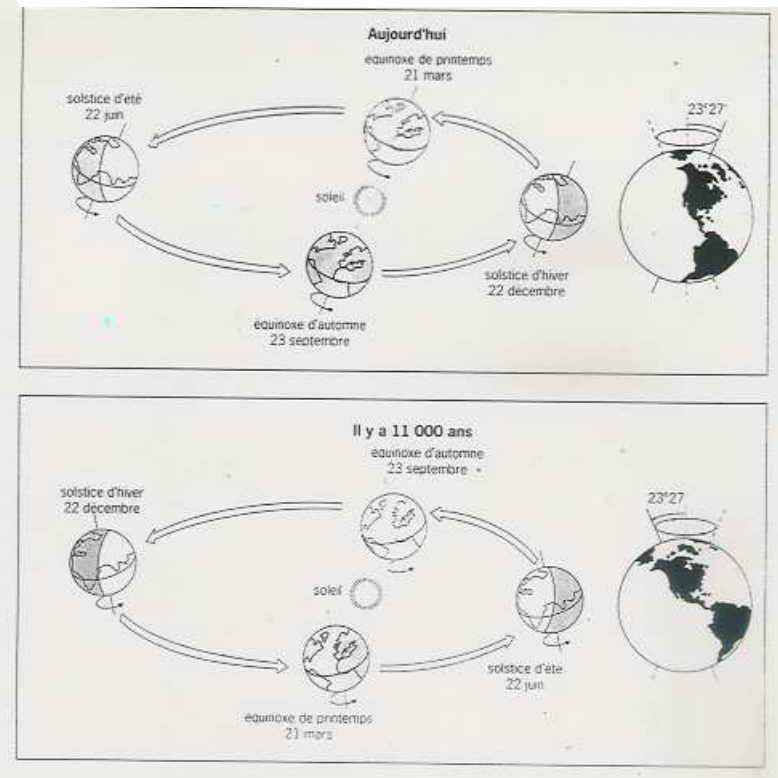
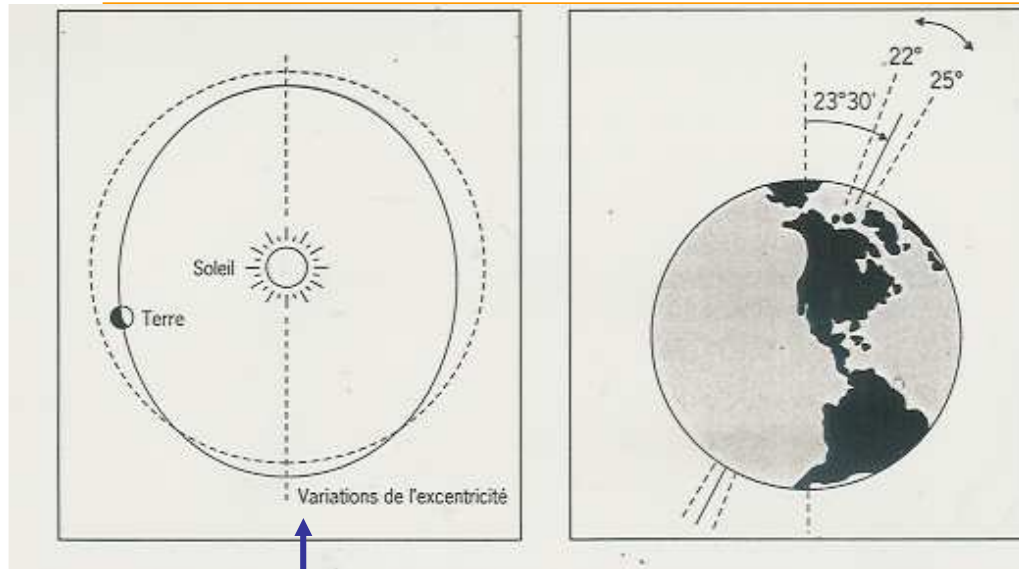


Obliquité:
~ 40 000 ans

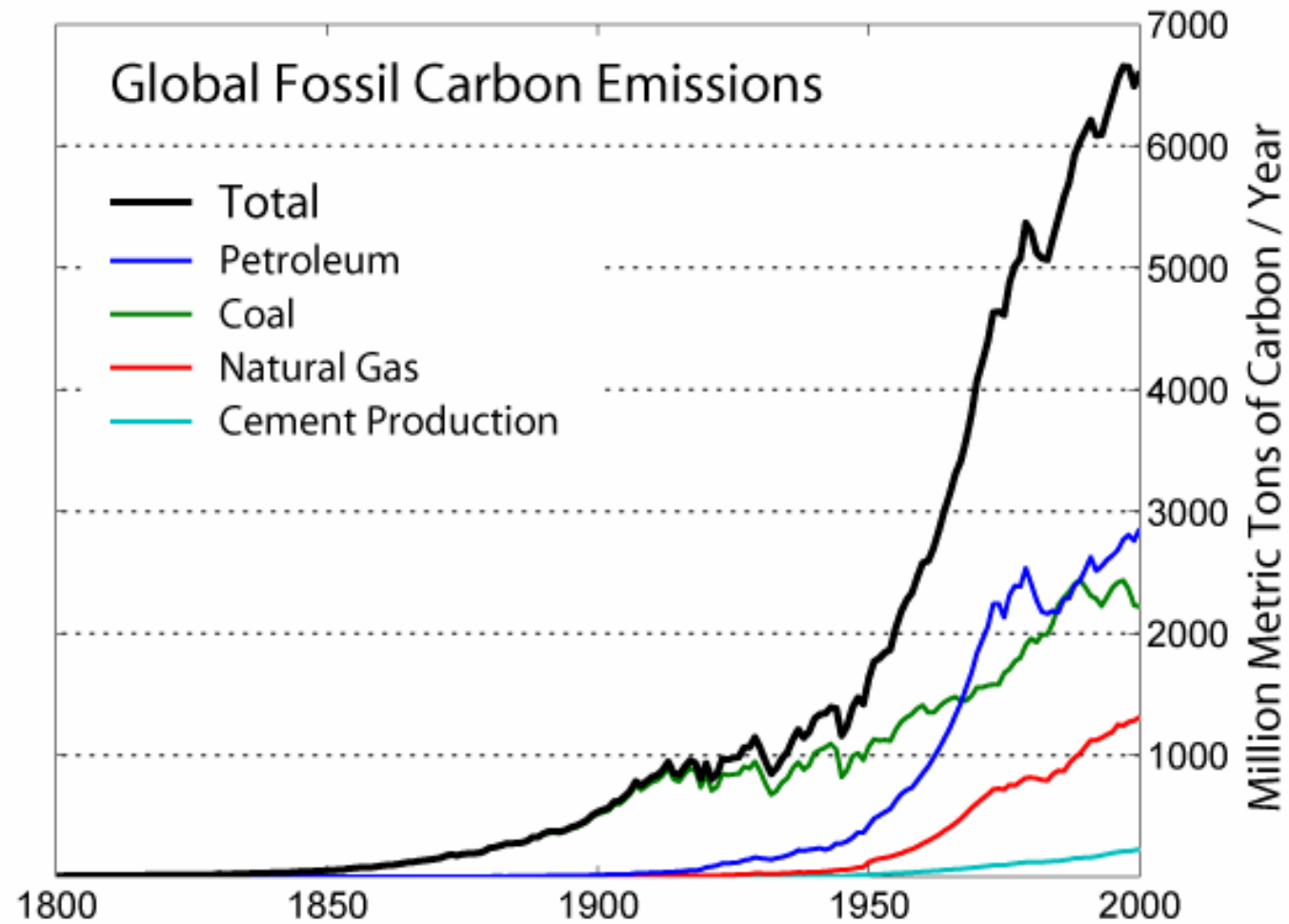
Excentricité:
~ 100 000 ans

Précession des
équinoxes:
~ 21 000 ans

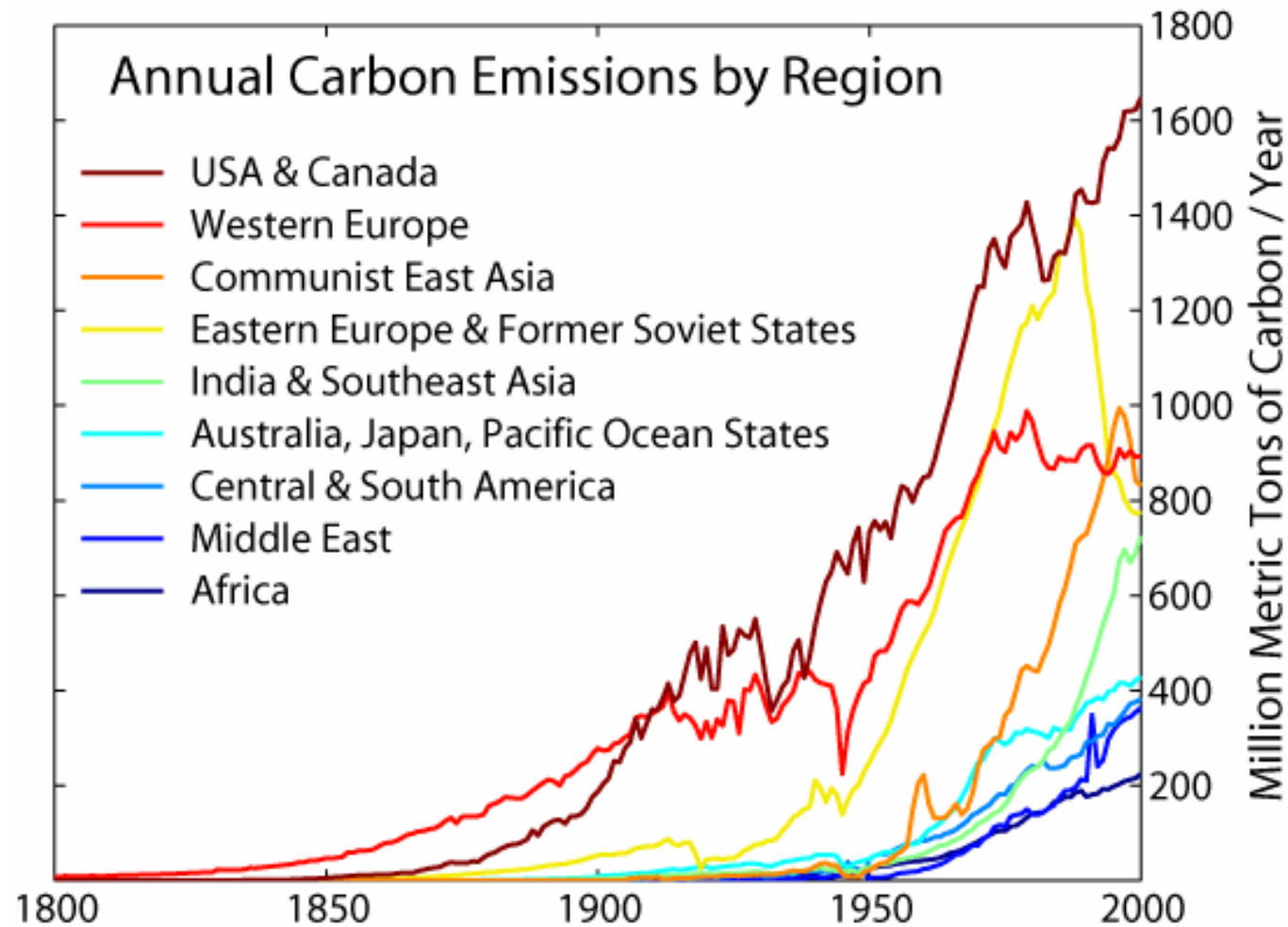
Illustrations de S. Joussaume (éditions du CNRS, 1993)
Source : H. Le Treut, présentation ENPC 2006



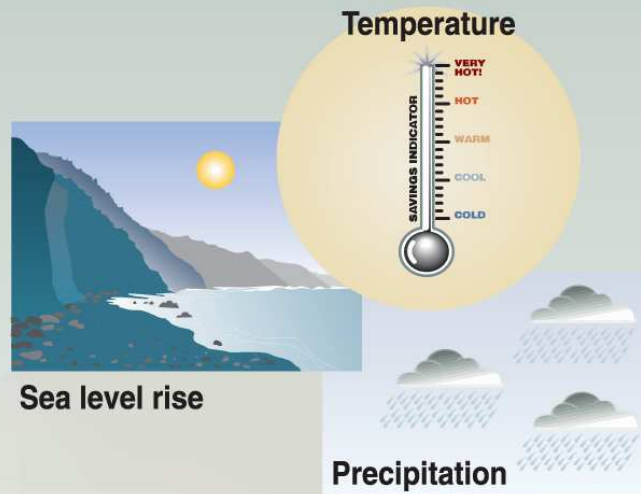
Emissions de carbone fossile



Des différences régionales mais une tendance alarmante



Potential climate changes impact



Impacts on...

Health



Weather-related mortality
Infectious diseases
Air-quality respiratory illnesses

Agriculture



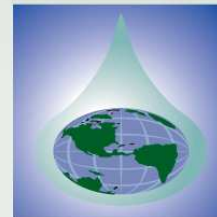
Crop yields
Irrigation demands

Forest



Forest composition
Geographic range of forest
Forest health and productivity

Water resources



Water supply
Water quality
Competition for water

coastal areas



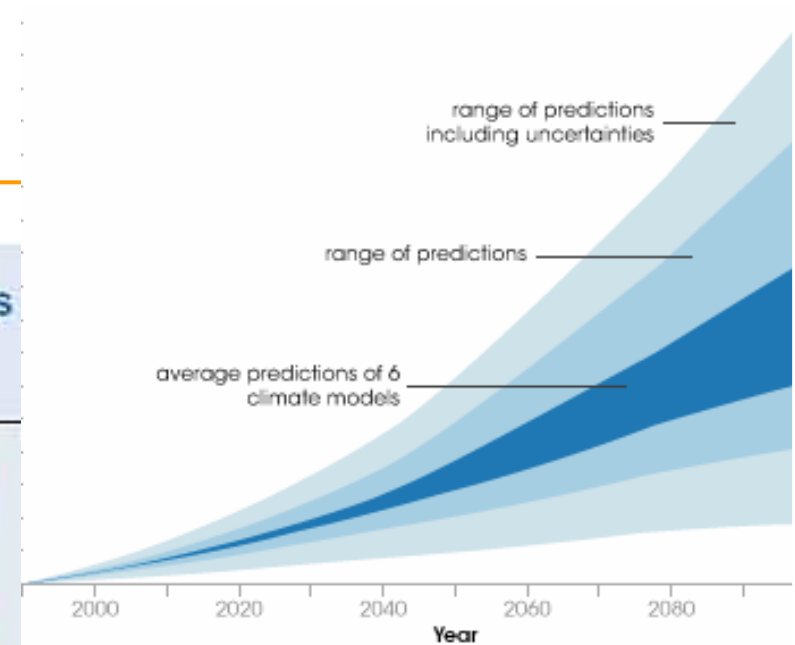
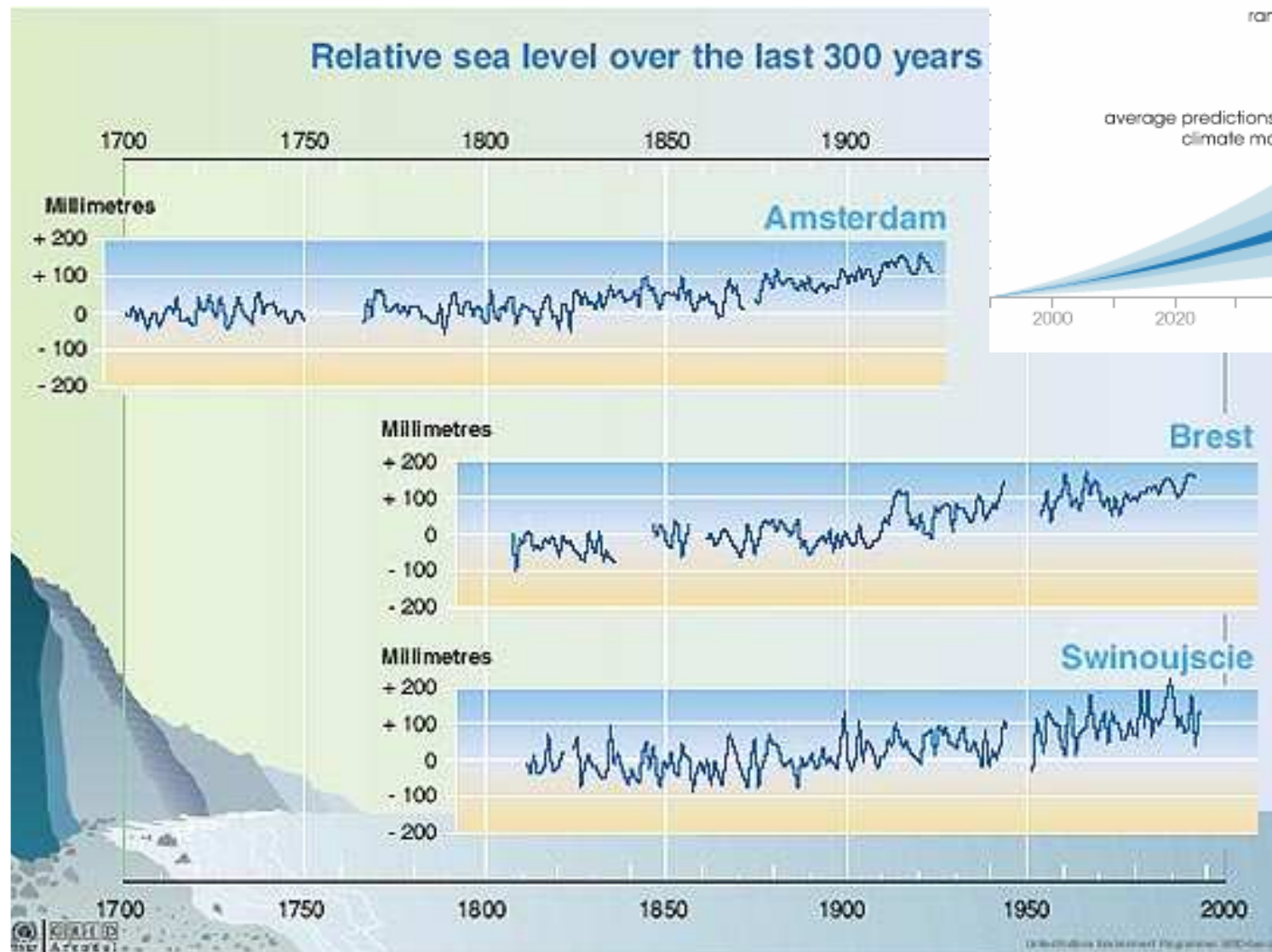
Erosion of beaches
Inundation of coastal lands
additional costs to protect coastal communities

Species and natural areas

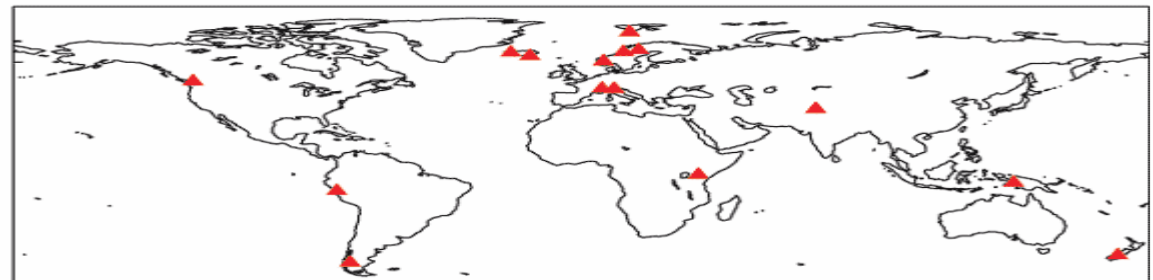
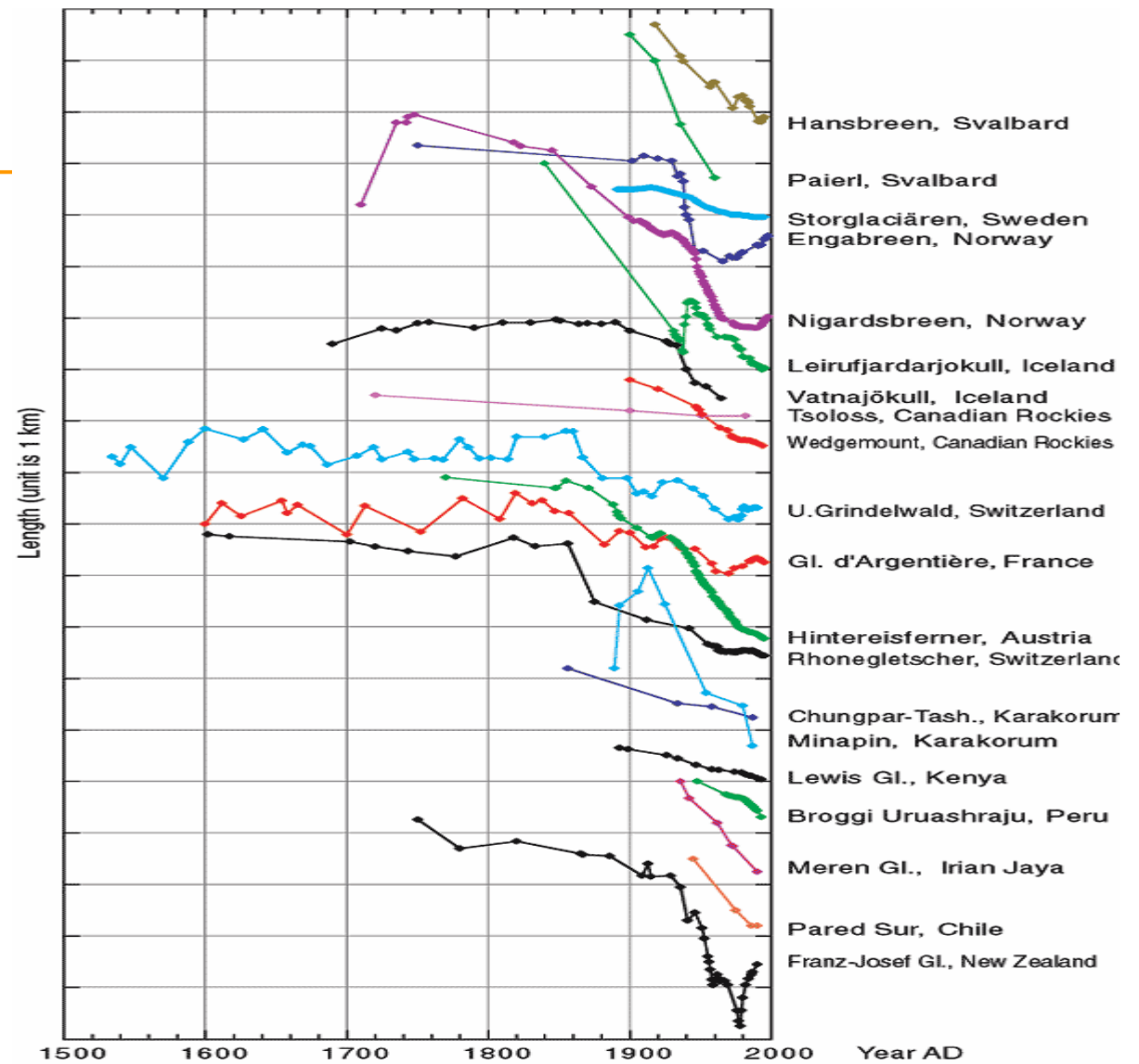


Loss of habitat and species
Cryosphere: diminishing glaciers

Hausse du niveau de la mer



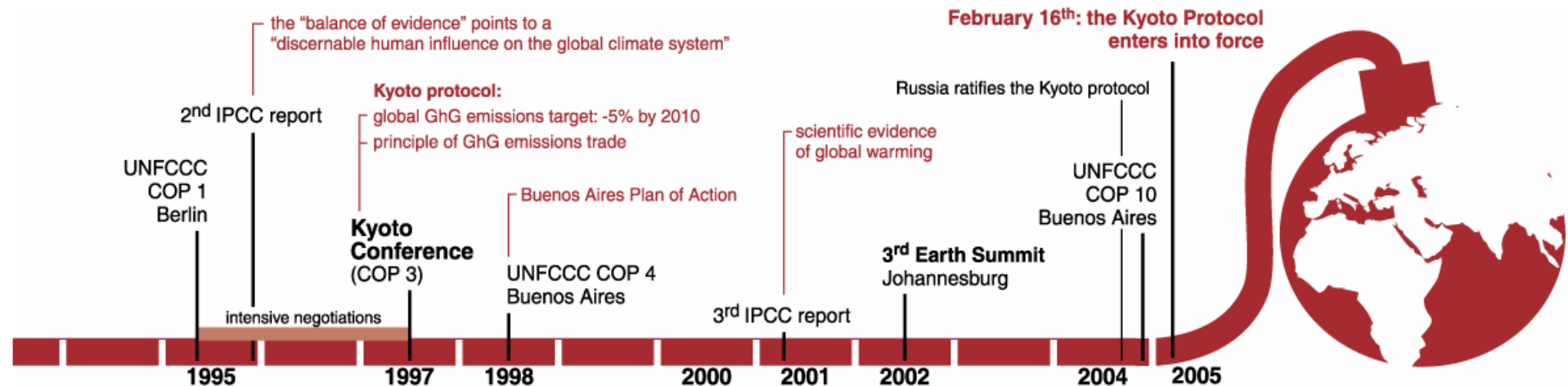
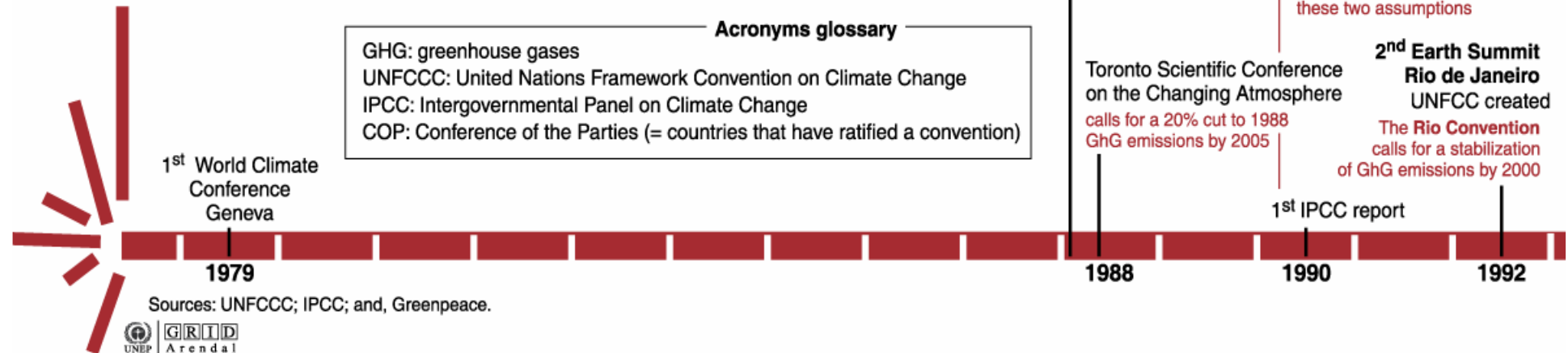
Fonte des glaces

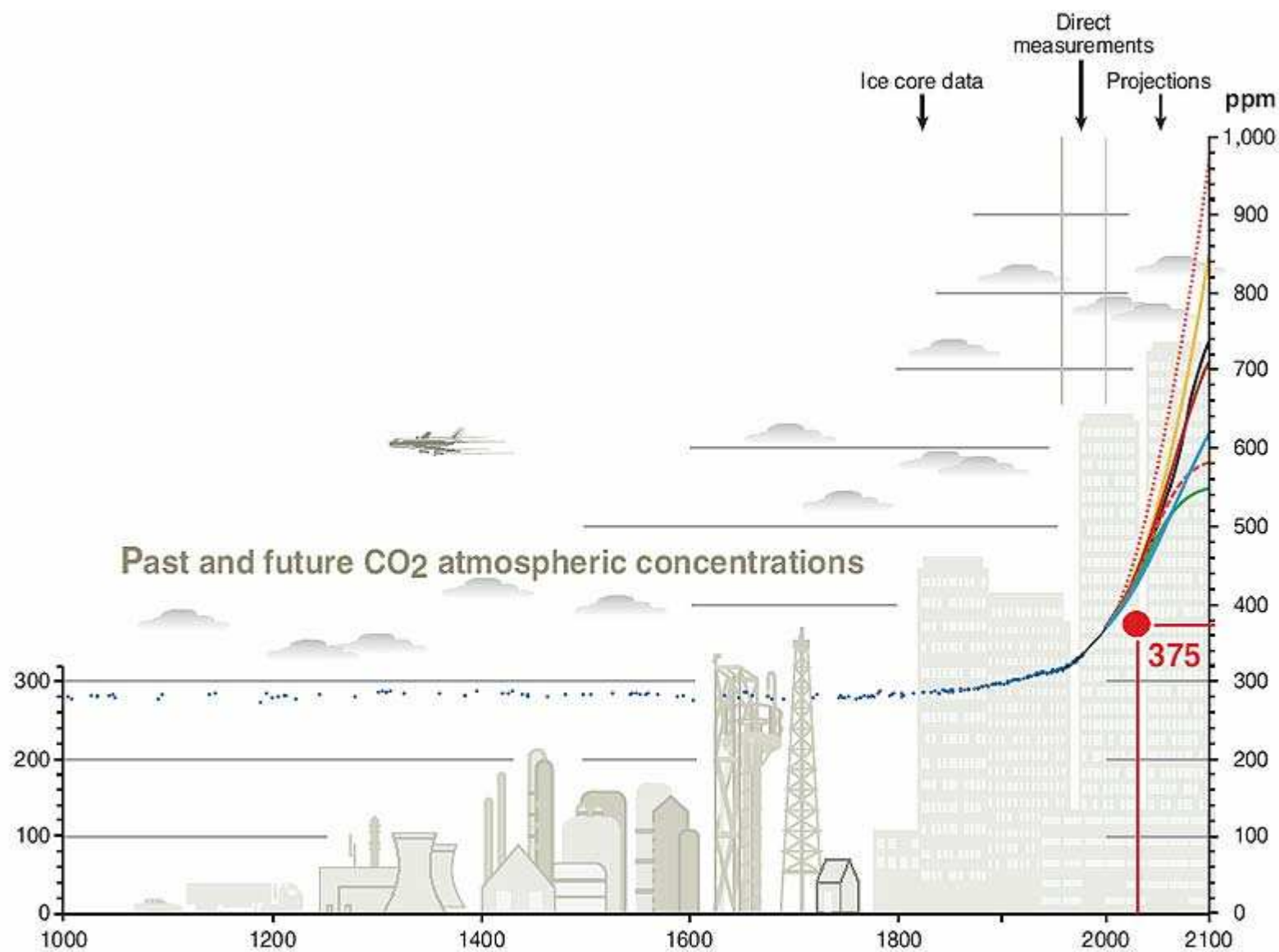


Mobilisation Internationale

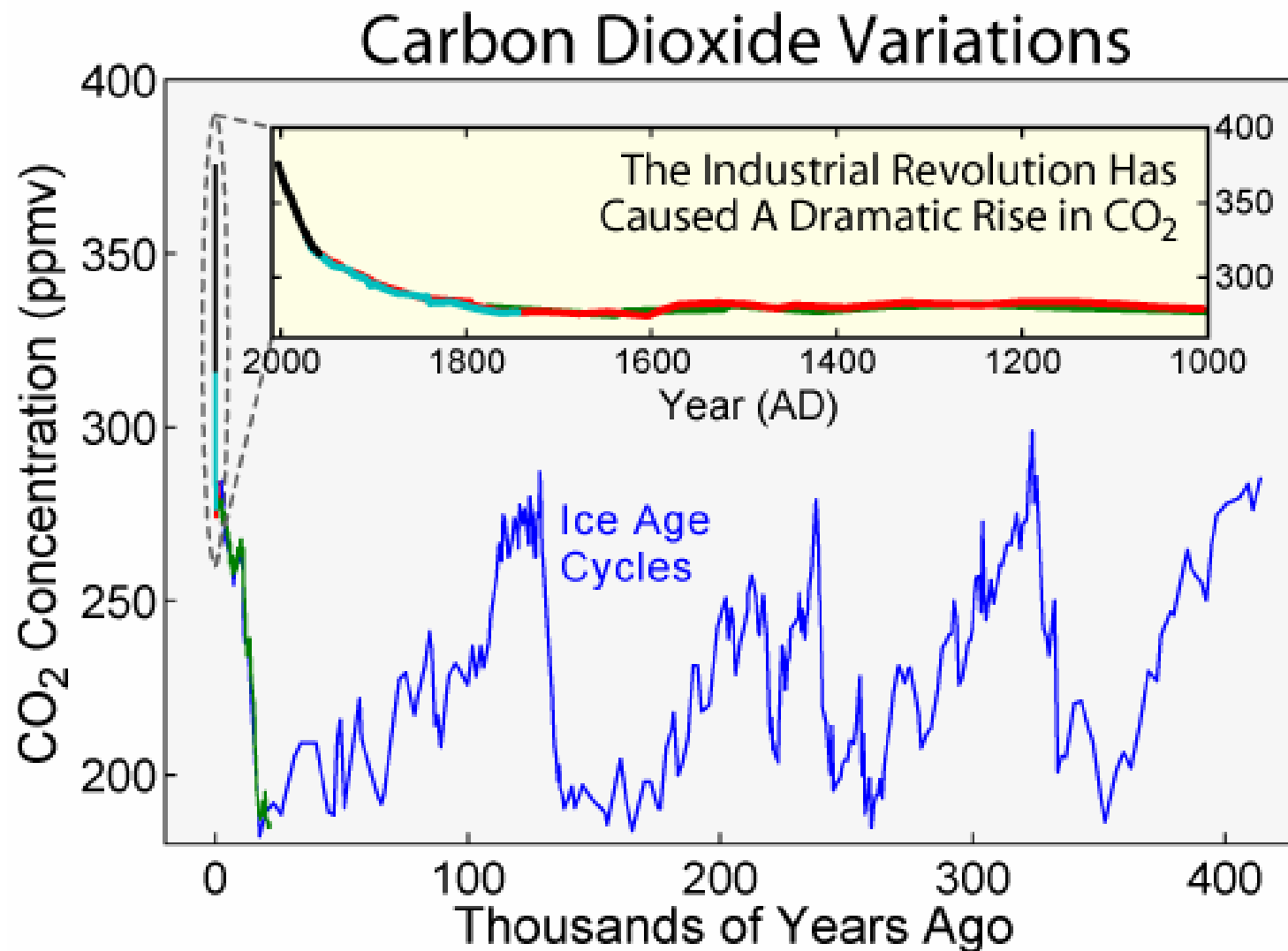
Back in time:

- 50 years ago, already... The World Conservation Union Meeting in Copenhagen, 1954
- 1st Earth Summit Stockholm, 1972



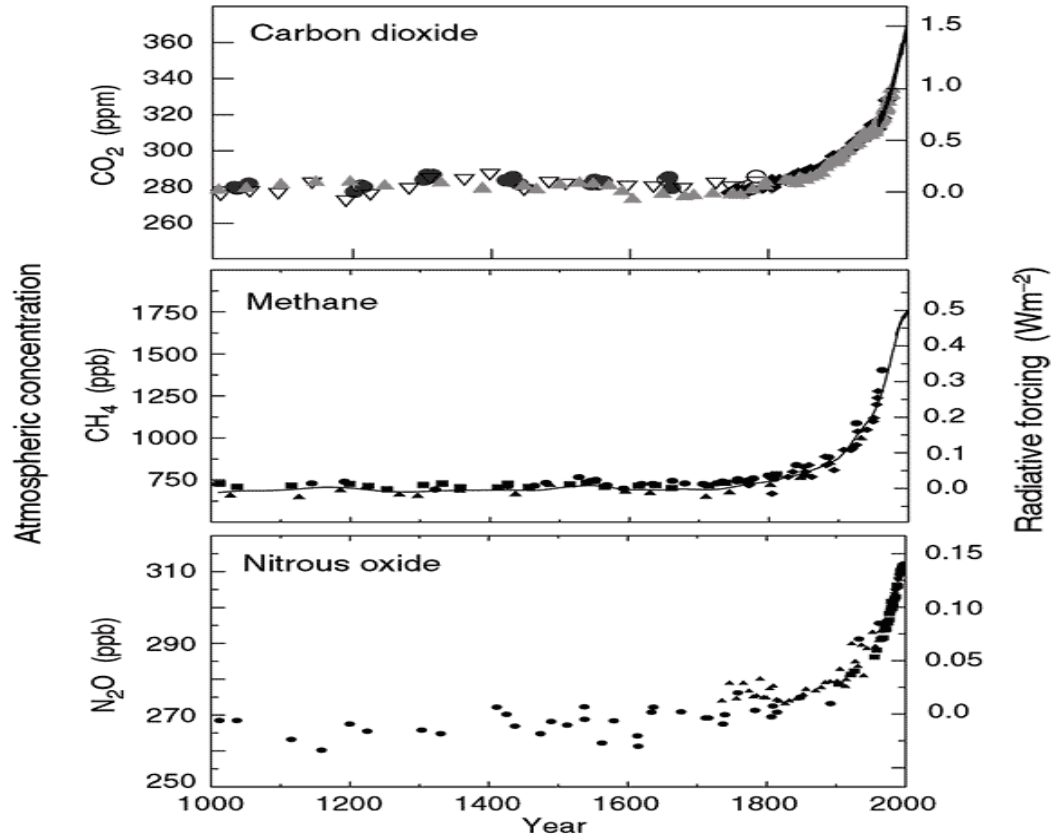


Emissions d'origine humaine et leurs effets

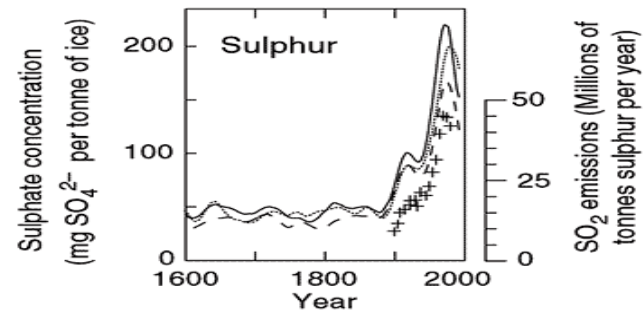


Indicators of the human influence on the atmosphere during the Industrial Era

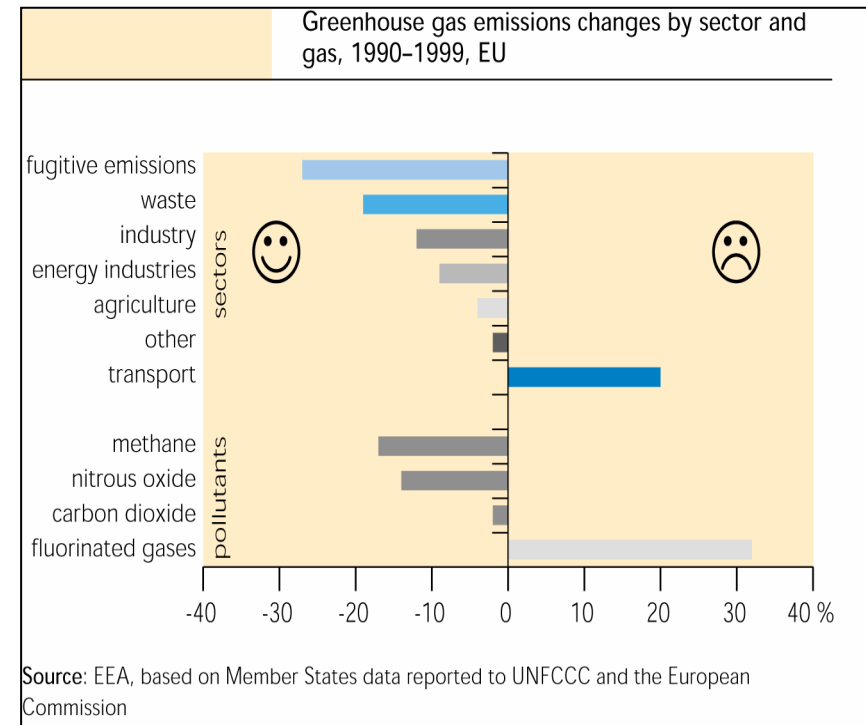
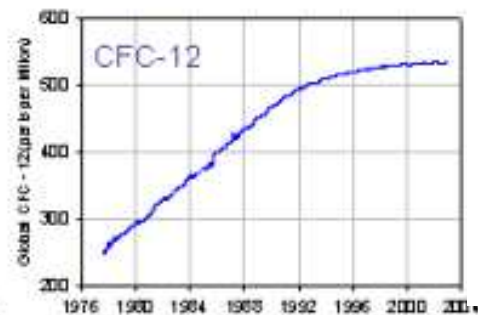
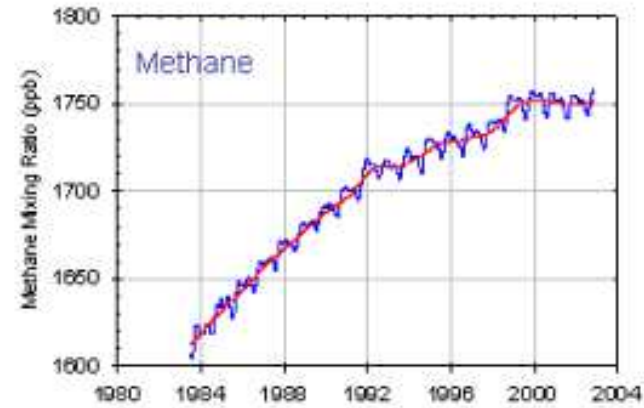
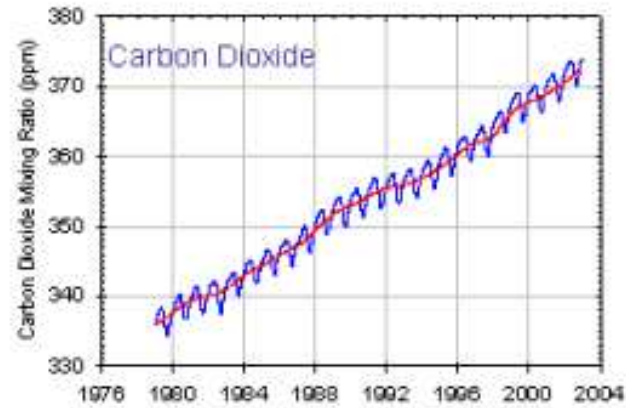
(a) Global atmospheric concentrations of three well mixed greenhouse gases

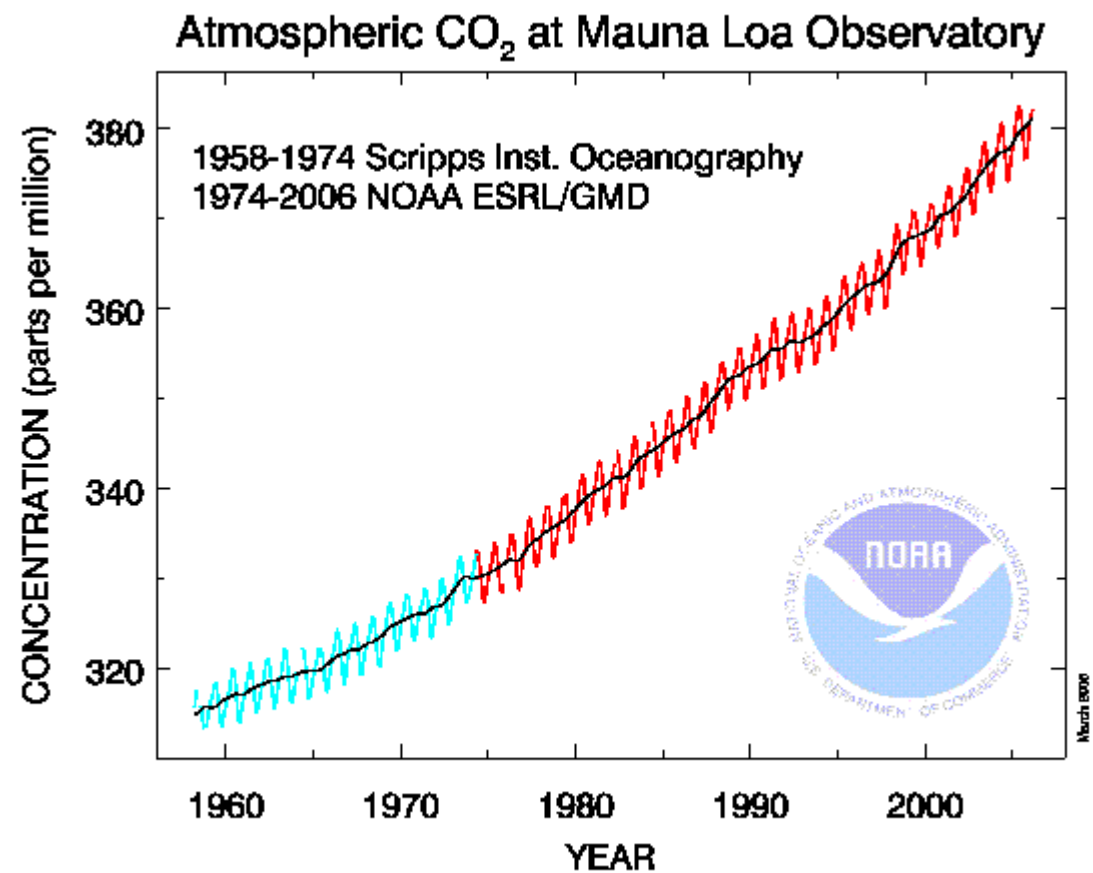


(b) Sulphate aerosols deposited in Greenland ice



Tendances: à la hausse !





Où en est la planète

- 1987: Rapport « Notre Avenir Commun »
 - Commission Brundtland
 - Définition du concept de Développement Durable
- 1997: Protocole de Kyoto
 - Réduire les émissions de gaz à effet de serre (dont CO₂, méthane, N₂O, CFC...)
 - Rq: les émissions de CO₂ augmentent 35% plus vite que prévu en 2000
- 10 et 20 ans après: sortie de deux rapports clés (ONU)
 - **GIEC :**
 - L'homme est responsable du réchauffement climatique (certitude): + 0,74°C depuis 1906
 - rôle particulier de la production/conso énergétique
 - Prévvision de ΔT entre 1,1 et 6,4°C
 - intervalle de confiance accrue pour ΔT entre **1,8** et **4°C**
 - Conséquences envisagées: sécheresses, inondations, migrations...
 - **GEO-4 :**
 - Un appel urgent à l'action
 - Empreinte humaine: **21,9** ha/pers Capacité biologique terrestre: **15,7** ha/pers
 - Points de non-retour dans la dégradation de l'environnement: 6ème extinction en cours.
 - Crise **environnementale**, crise de **développement** et crise de **l'énergie** ne font qu'une

Commentaires

- GEO-4: <http://www.unep.org/geo/geo4/media/>
- Résumé en français sur http://www.unep.org/geo/geo4/media/media_briefs/french/FR-Media_Briefs_GEO-4_Global_Web.pdf
- Extraits :
- Taux d'extinction d'espèces 100 fois supérieur à ce qui est indiqué par les fossiles
- les températures moyennes mondiales ont augmenté d'environ 0,74°C depuis 1906.
- Le monde a radicalement changé depuis 1987, au niveau social, économique et politique. La population a augmenté de 34%, le commerce est pratiquement multiplié par 3 et le revenu moyen par habitant a augmenté d'environ 40%.

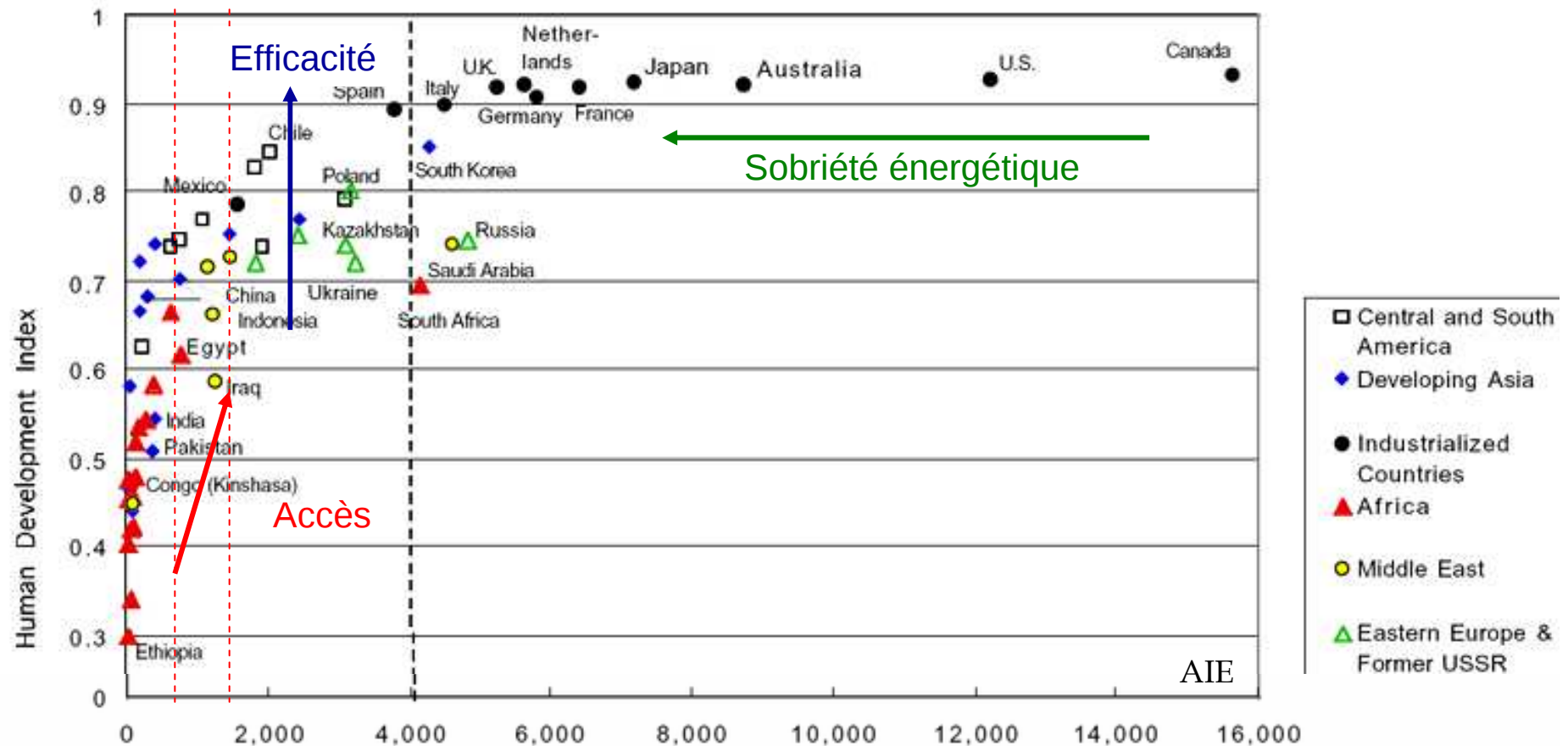
Comment réduire les émissions énergétiques?

Nous avons besoin d'énergie pour :

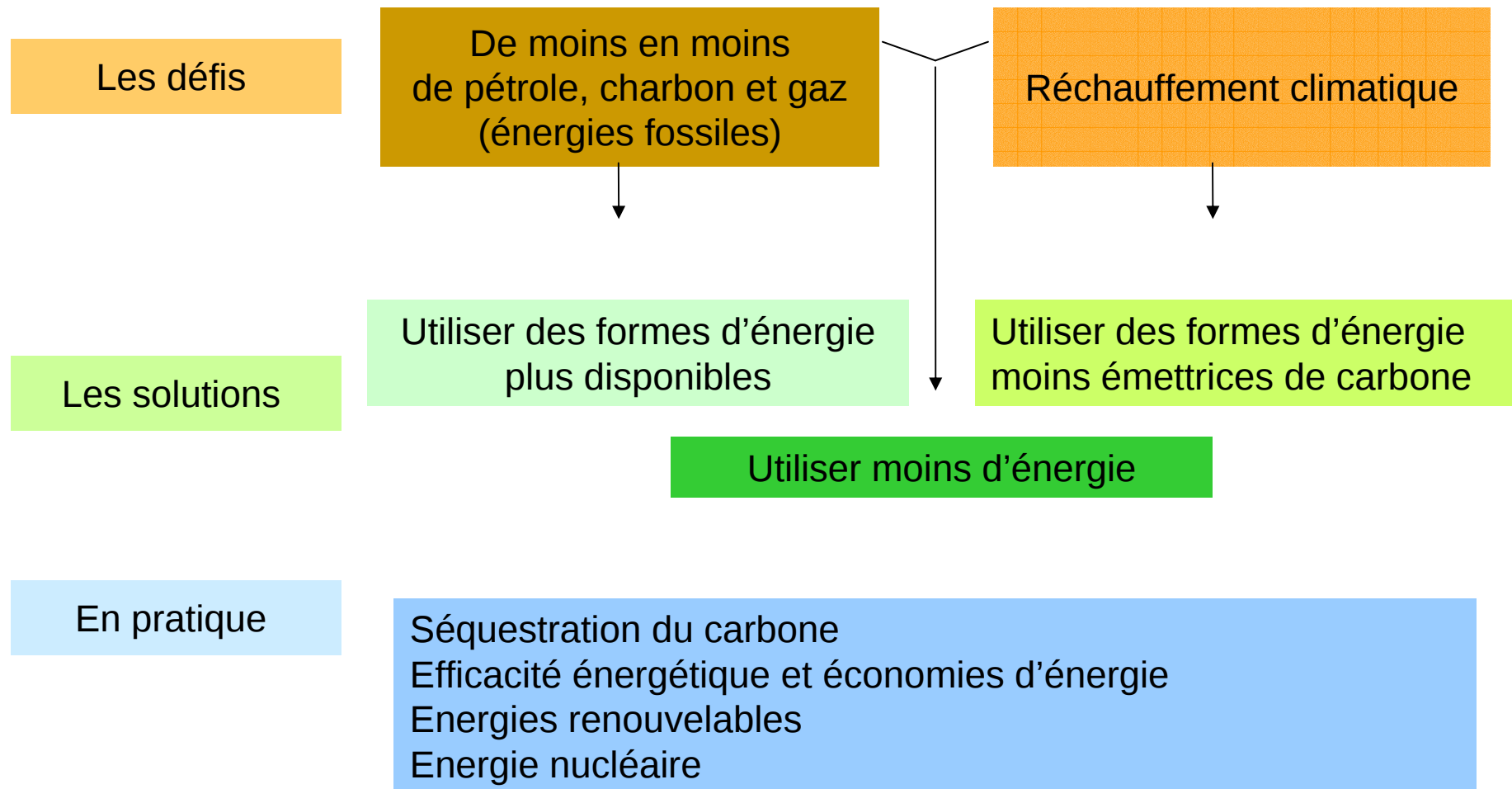
- Accéder aux services énergétiques
- Assurer à chacun un bon niveau de vie

Mais le processus actuel n'est pas durable :

- Pollution
- Tensions sur les ressources
- Réchauffement climatique

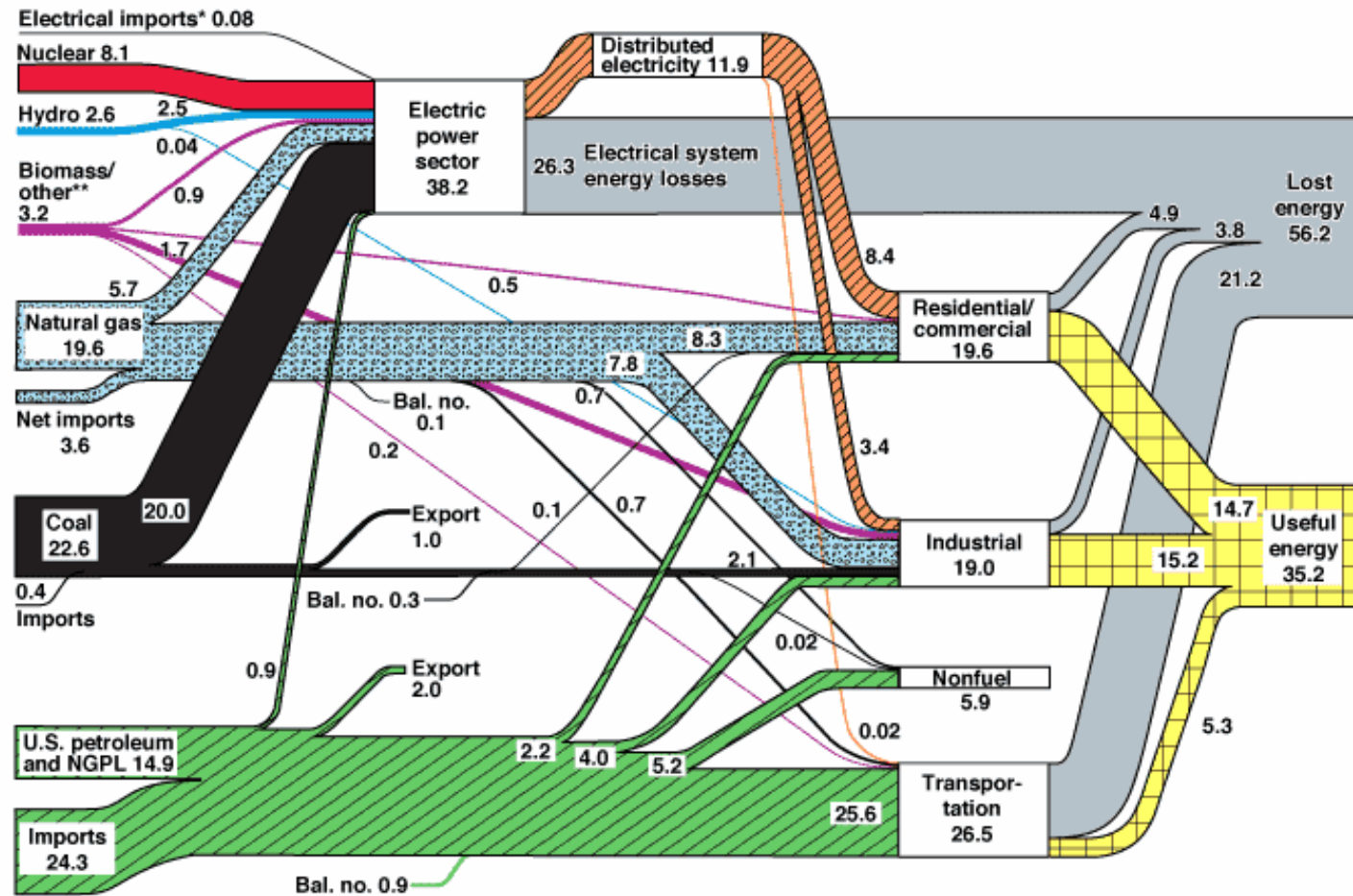


$\frac{3}{4}$ des émissions humaines de CO₂ viennent de la combustion d'énergies fossiles



A lire de droite à gauche !

U.S. Energy Flow Trends – 2002 Net Primary Resource Consumption ~97 Quads



Source: Production and end-use data from Energy Information Administration, *Annual Energy Review 2002*.

*Net fossil-fuel electrical imports.

**Biomass/other includes wood, waste, alcohol, geothermal, solar, and wind.

June 2004
Lawrence Livermore
National Laboratory
<http://eed.llnl.gov/flow>

Energies renouvelables

■ Energie solaire

- Conversion photovoltaïque → électricité
- Conversion thermique → chaleur
- Du solaire thermique à l'électricité?

■ Mais aussi :

- Energie du vent (éoliennes) → électricité
- Energie hydraulique → électricité
- Energie des vagues (houlomotrice) → électricité
- Biomasse (agroénergies)
 - Bois et déchets végétaux → chaleur et électricité
 - Méthanisation des déchets organiques (biogaz) → chaleur et électricité
 - Agrocarburants (éthanol et biodiesel) → chaleur (transport)

■ Energies renouvelables non solaires

- Géothermie
- Energie des marées et des courants

■ **Attention** à ne pas confondre source d'énergie et vecteur d'énergie !

- Hydrogène et électricité sont des vecteurs d'énergie



De quoi allons nous discuter :

- L'énergie aujourd'hui dans le monde: quels défis
- L'énergie nucléaire
 - Introduction
 - Rappels sur la radioactivité
 - La fission nucléaire
 - Récupérer l'énergie du noyau: le boulot du réacteur
 - Le casse-tête des déchets
 - Quelques réacteurs pour demain

NOTE: les planches de cette seconde partie sont tirées du cours de Michel Gonin et Claire Lecointe 'Energie et Environnement', qui traite entre autres d'énergie nucléaire, à l'Ecole Polytechnique

I. Une énergie dense mais pas miracle

Les chiffres

Fission d'1 g d'U235 → 2 tep;

Fusion d'1 g de D + 1,5 g de T → 20 tep

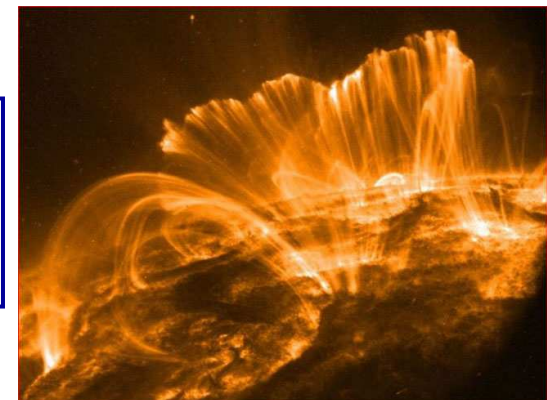
La Fission

- **A:** Faibles émissions CO₂, Grandes réserves de combustible dans pays politiquement stables, Source d'énergie stable
- **I:** Sécurité, Déchets, Prolifération, Soutien public défaillant



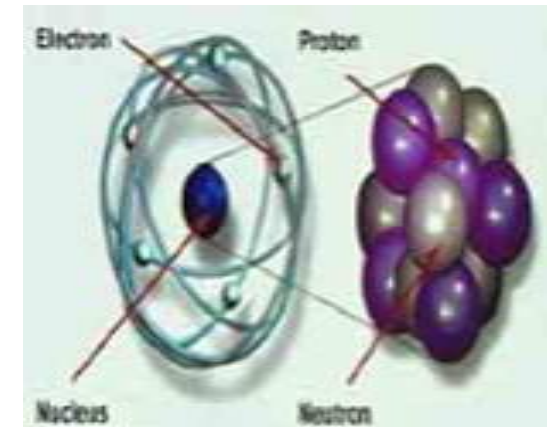
La Fusion: inertielle et thermonucléaire

- **A:** Disponibilité carburant (40 mg D/l mer, T à partir de Li), Densité énergétique, pas d'HAVL
- **I:** Coûts et incertitudes du développement technologique (notam. matériaux), Fin de vie des centrales

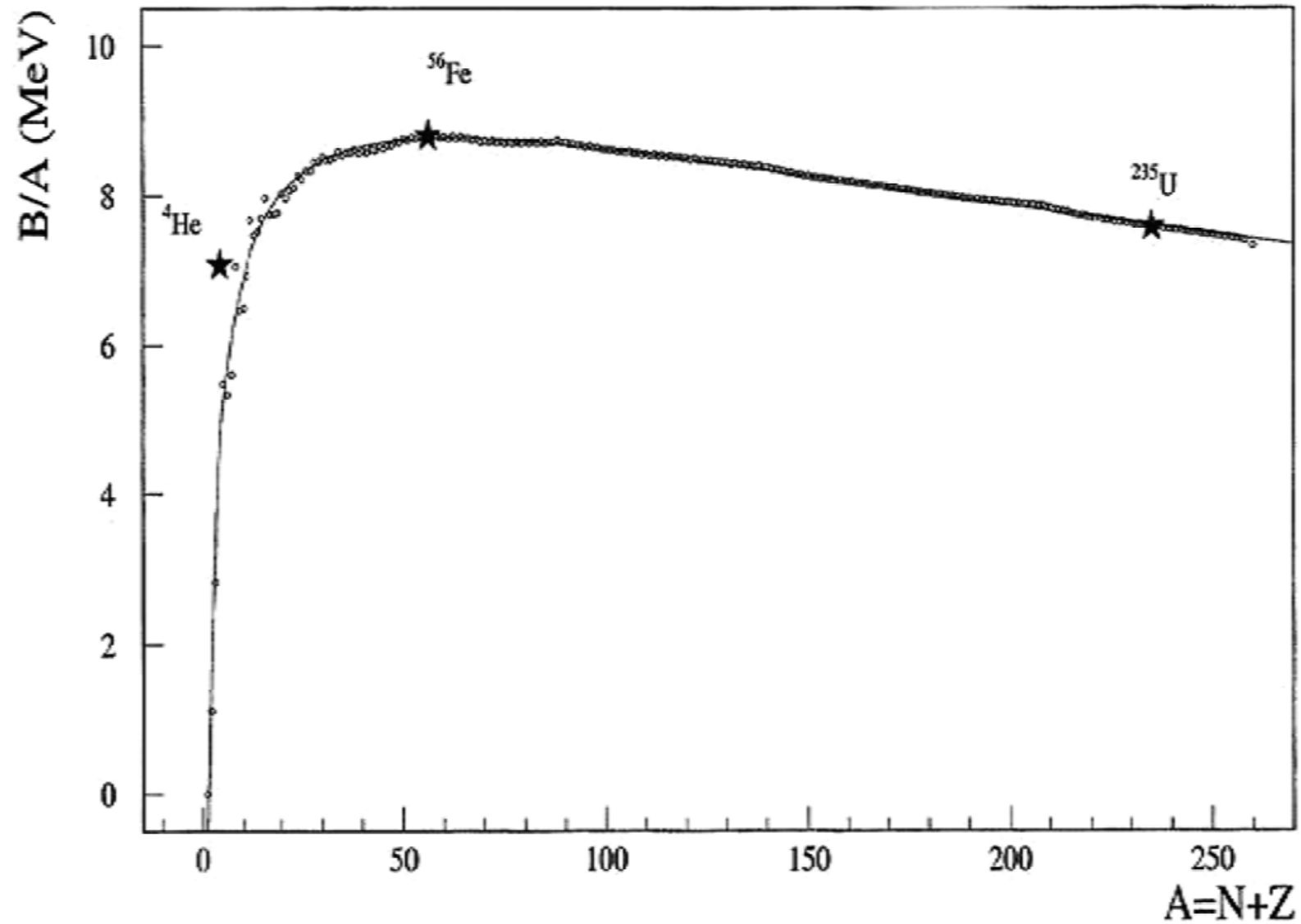


II. Rappels sur la radioactivité: une affaire de noyaux

- Les atomes sont composés d'un **noyau** autour duquel gravitent Z électrons
 - Le noyau est composé de **nucléons** de deux sortes:
 - z **protons** à charge positive
 - N **neutrons**, sans charge
 - La cohésion du noyau est assurée par des **forces nucléaires fortes**
 - Il faut lutter contre la répulsion électrostatique des protons !
 - Les atomes sont caractérisés par
 - Leur nombre de protons Z
 - Leur nombre de masse $A = N + Z$
- les **isotopes** ont même Z (mêmes propriétés chimiques)
mais des N et donc des A différents
(différentes propriétés physiques)
exemples: C12, C14; U235, U238



Energie de liaison des nucléons



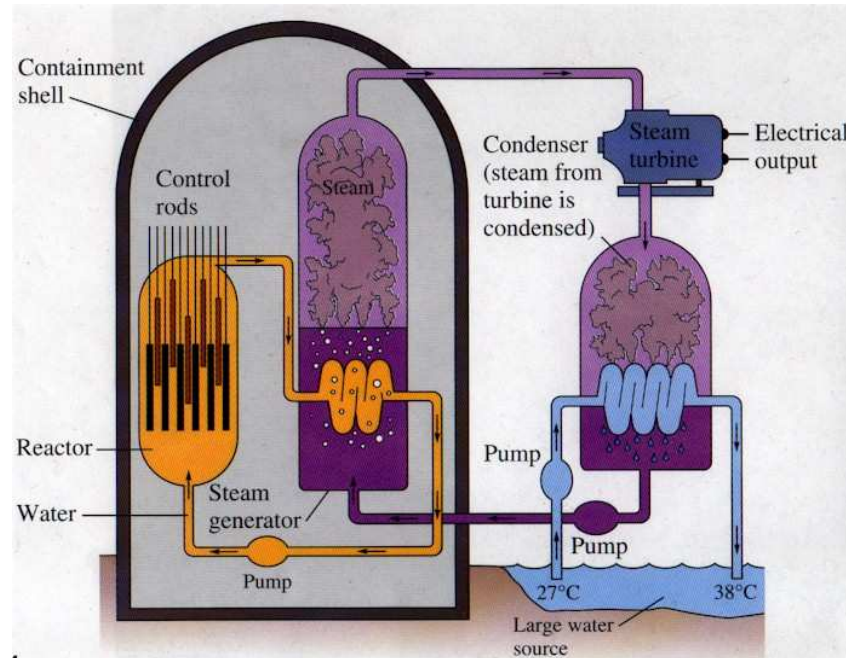
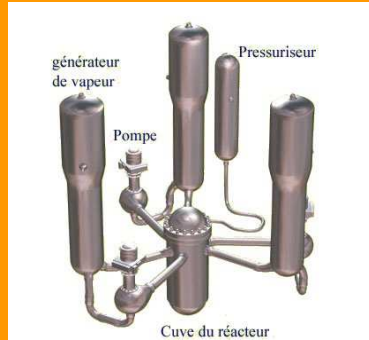
III et IV

Voir par exemple Cours de Michel Gonin (Ecole Polytechnique) pour les détails

IV. Les centrales nucléaires: une machine à chaleur

Circuit primaire

- Modération de la vitesse des neutrons
- Evacuation de la chaleur de réaction



Circuit secondaire

- Entraînement de turbines par la vapeur
- Générateurs de vapeur : 20 m de hauteur !
- 3 300 tubes en U

Circuit tertiaire

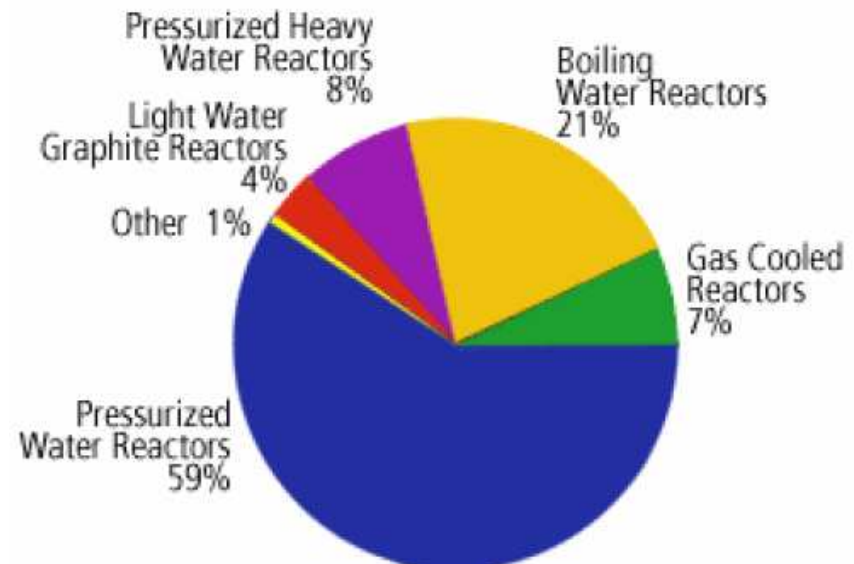
- Système de refroidissement
- Environ 50 000 tubes
- Flux importants pour limiter la hausse de température à 10°C
- Tours de refroidissement : elles permettent de réduire de 20 à 30 fois les besoins en eau



Différentes filières de réacteurs

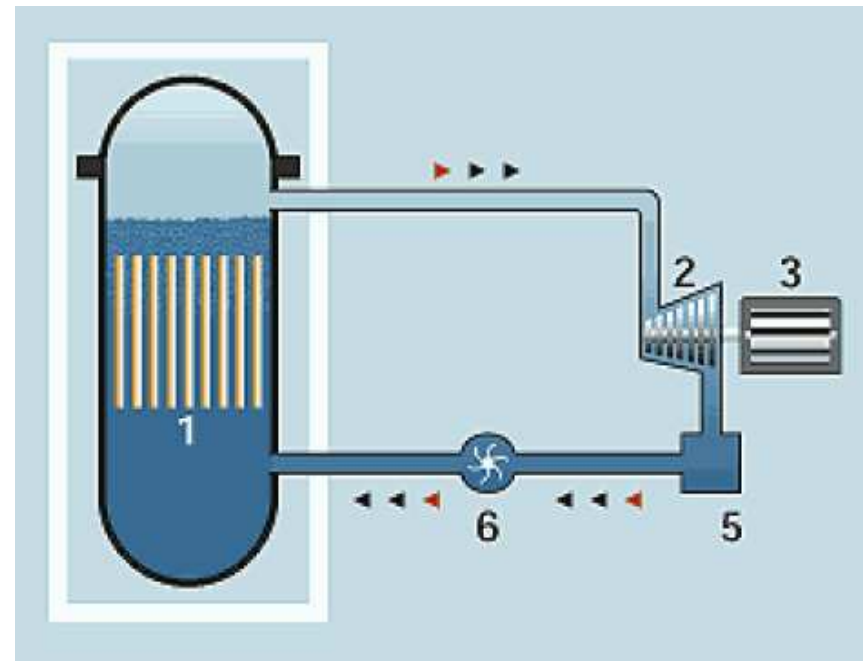
- Une filière c'est
 - Un combustible
 - Un modérateur
 - Un fluide caloporteur

Reactor Types in Use Worldwide, January 2003



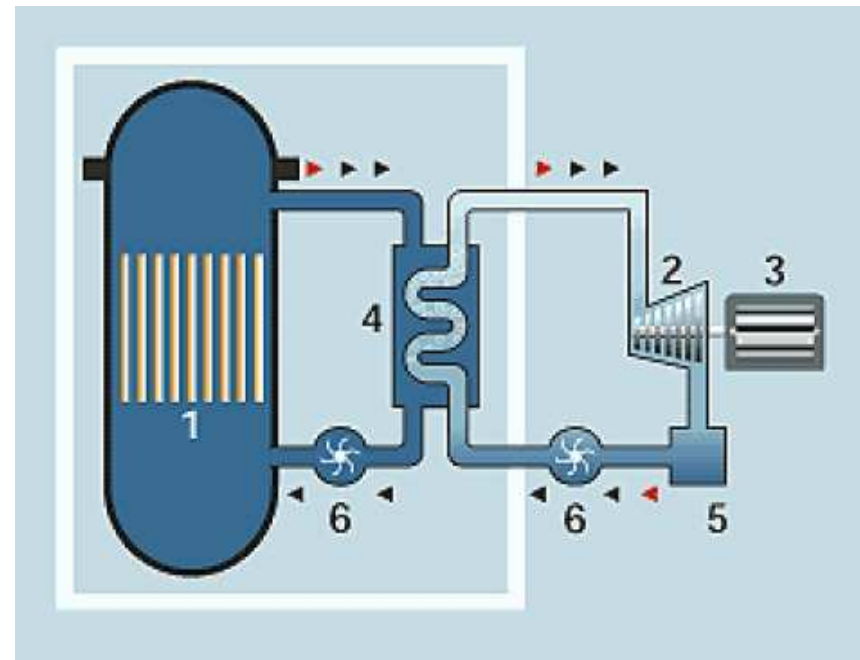
Réacteurs à eau bouillante

- Combustible: Uranium enrichi
- Modérateur: eau
- Caloporteur: eau



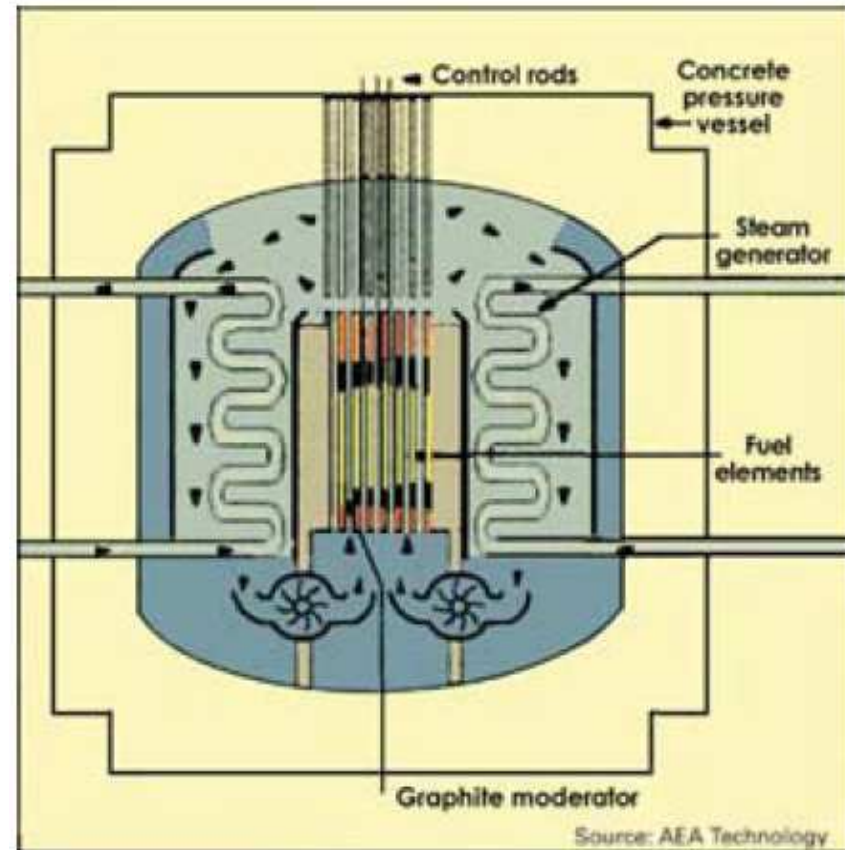
Réacteur à eau pressurisée

- Combustible: Uranium enrichi
- Modérateur: eau
- Caloporteur: eau



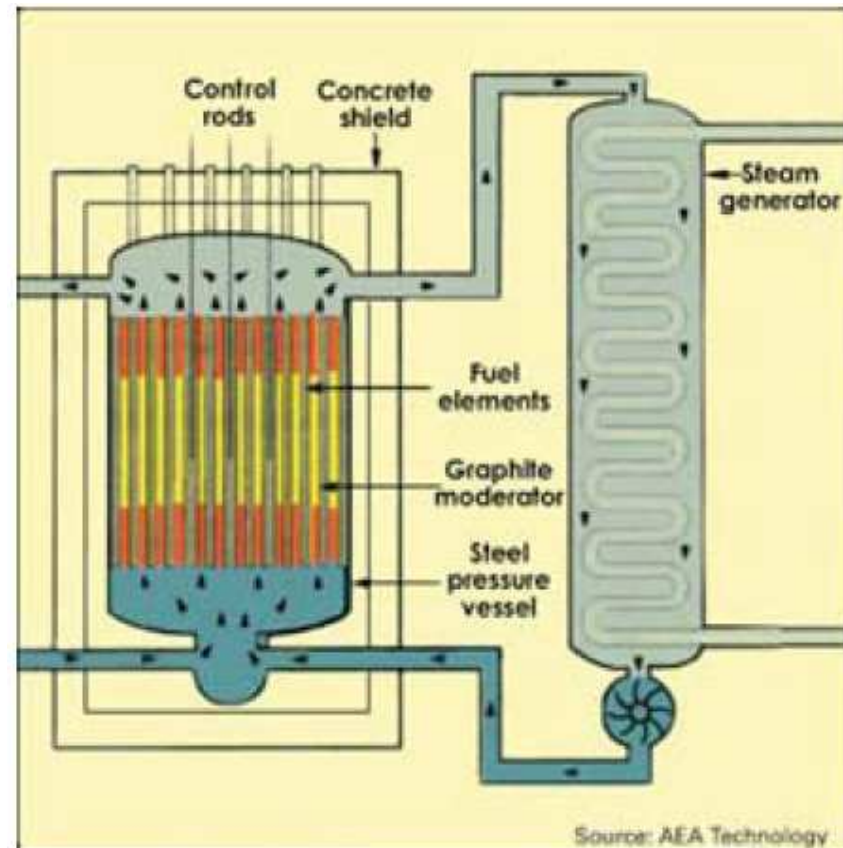
Réacteurs graphite-gaz

- Combustible: Uranium enrichi
- Modérateur: graphite
- Caloporteur: gaz



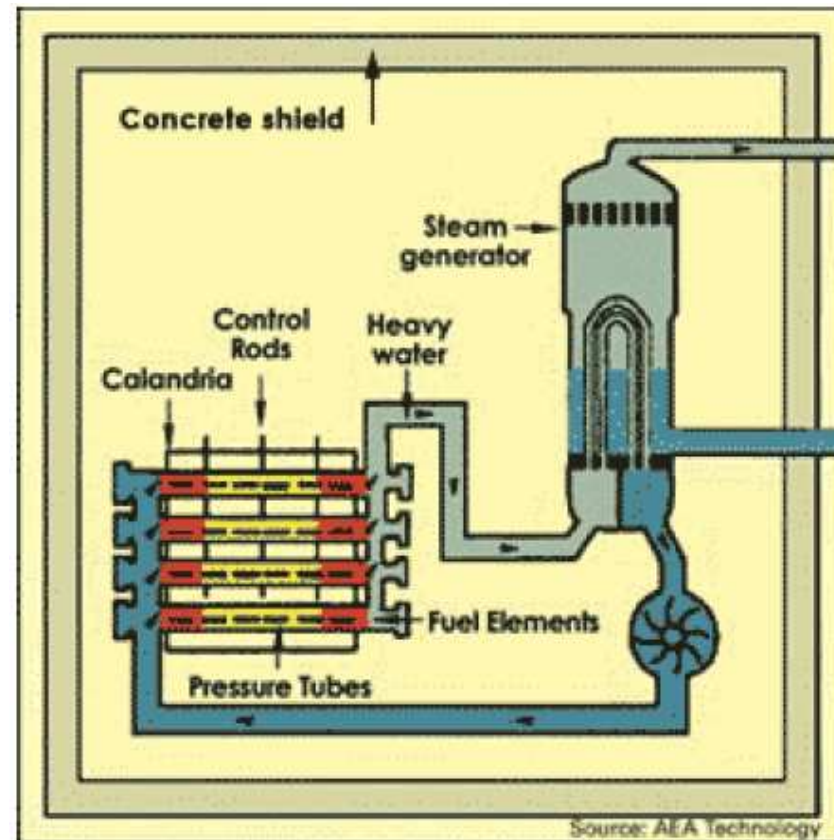
Les RBMK (ex Union Soviétique)

- Combustible: Uranium enrichi
- Modérateur: graphite
- Caloporteur: eau



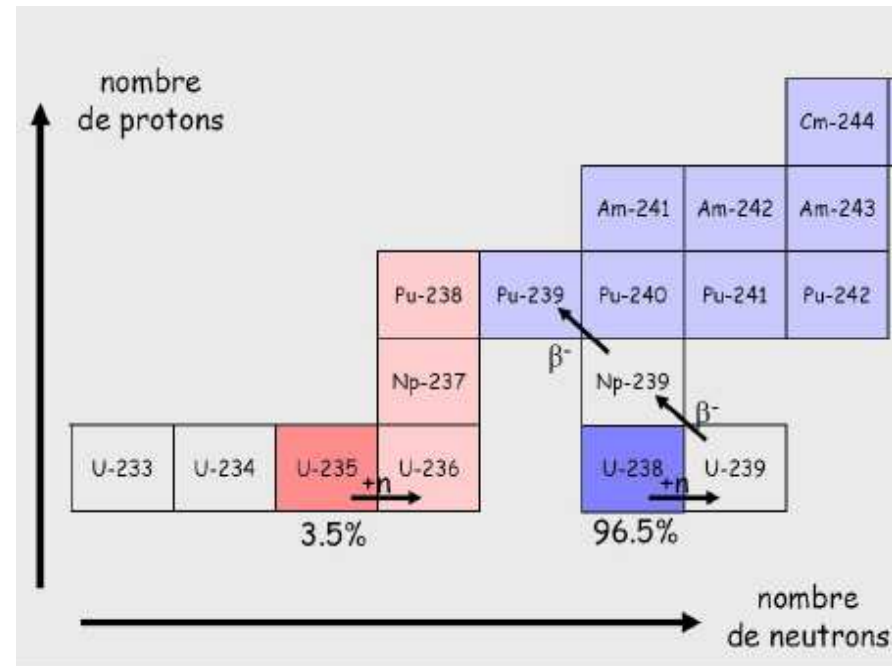
Les CANDU (Canadian Depleted Uranium reactor)

- Combustible: Uranium très légèrement enrichi
- Modérateur: eau lourde
- Caloporteur: eau lourde

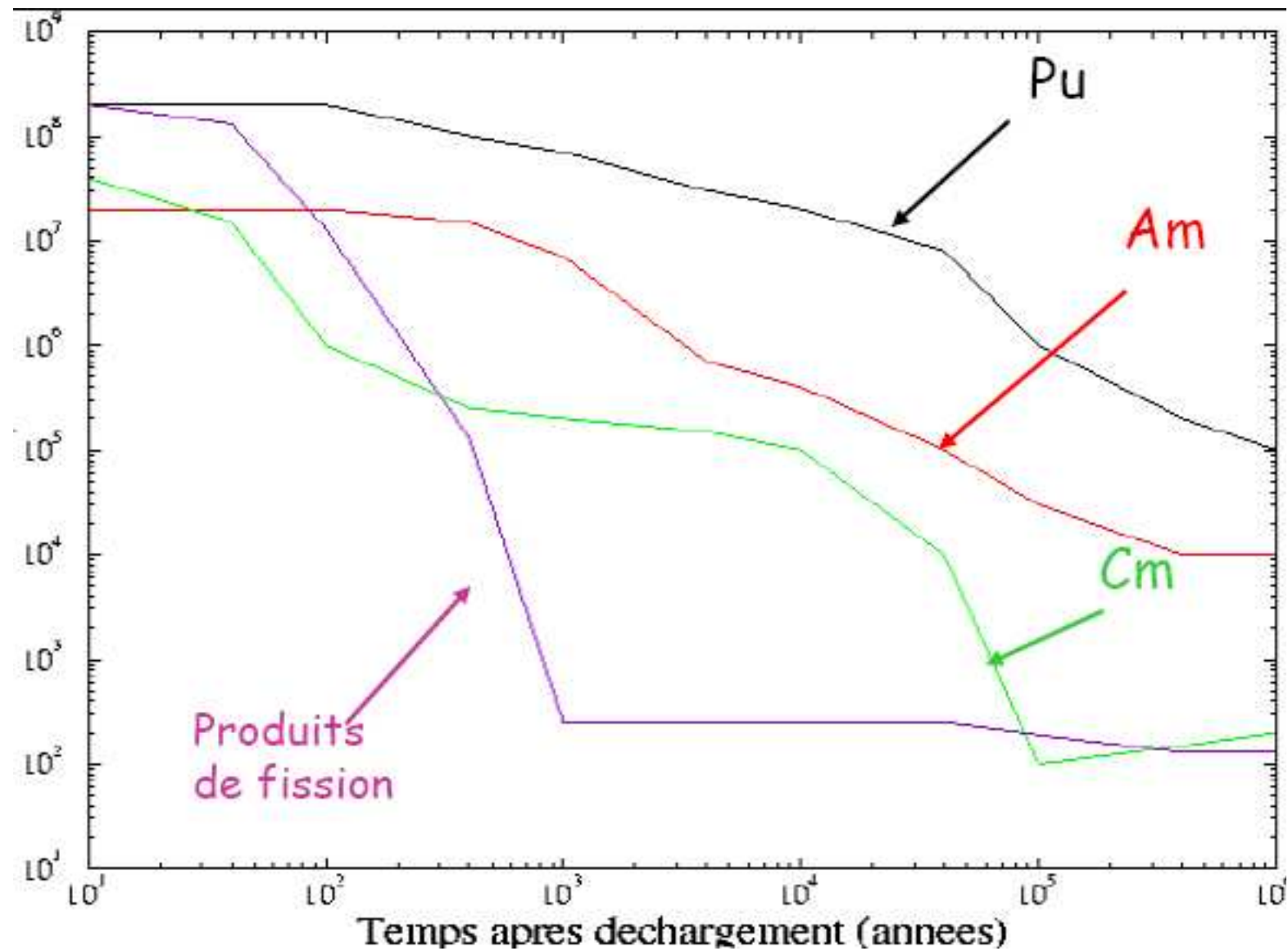


V. Le casse-tête des déchets

- Produits de fission
- Trans-uranides
- Deux dimensions:
 - Durée de vie (courte ou longue)
 - Activité (faible ou importante)



Radiotoxicité des déchets (en Sv/TWhe)

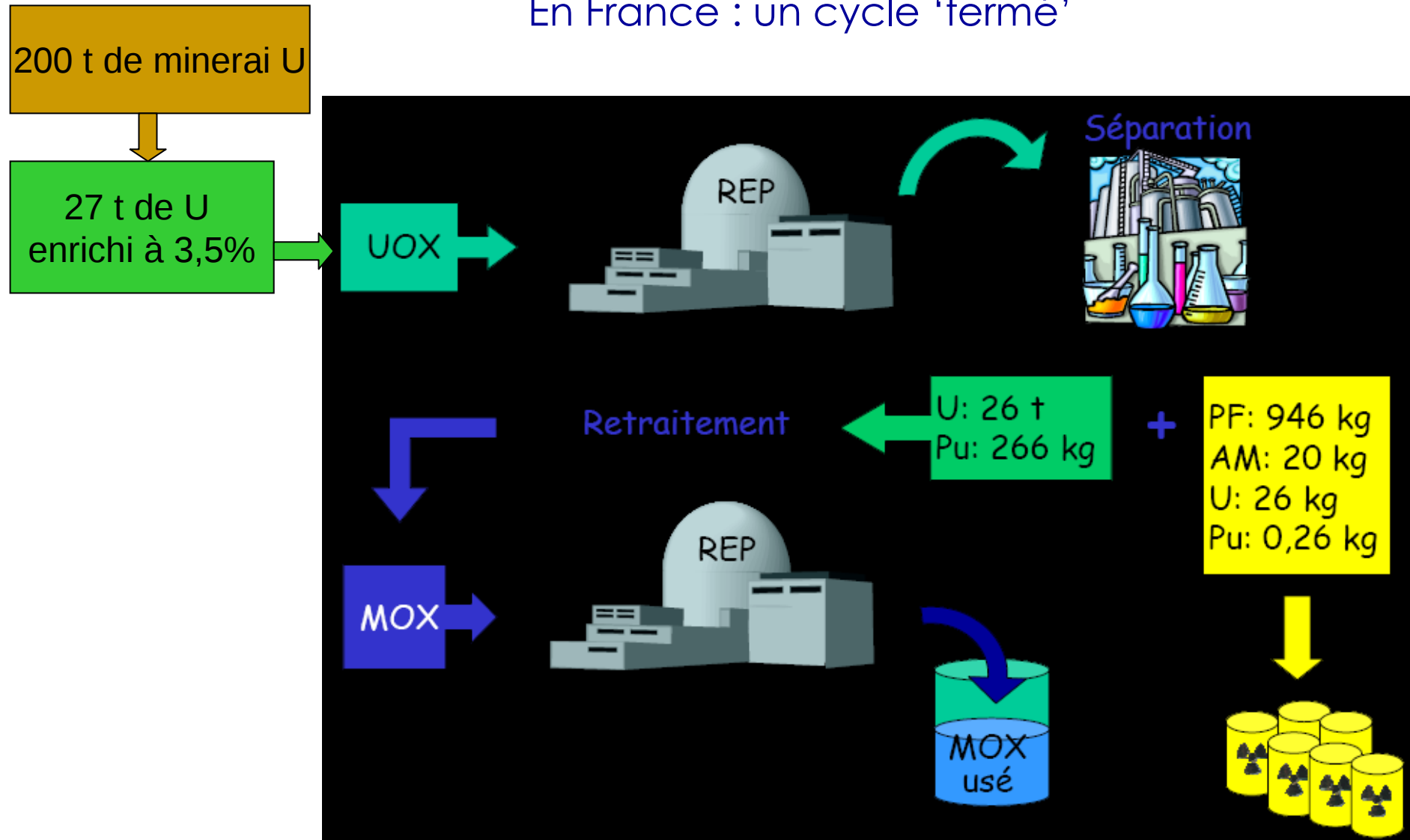


En France: la loi Bataille (1991)

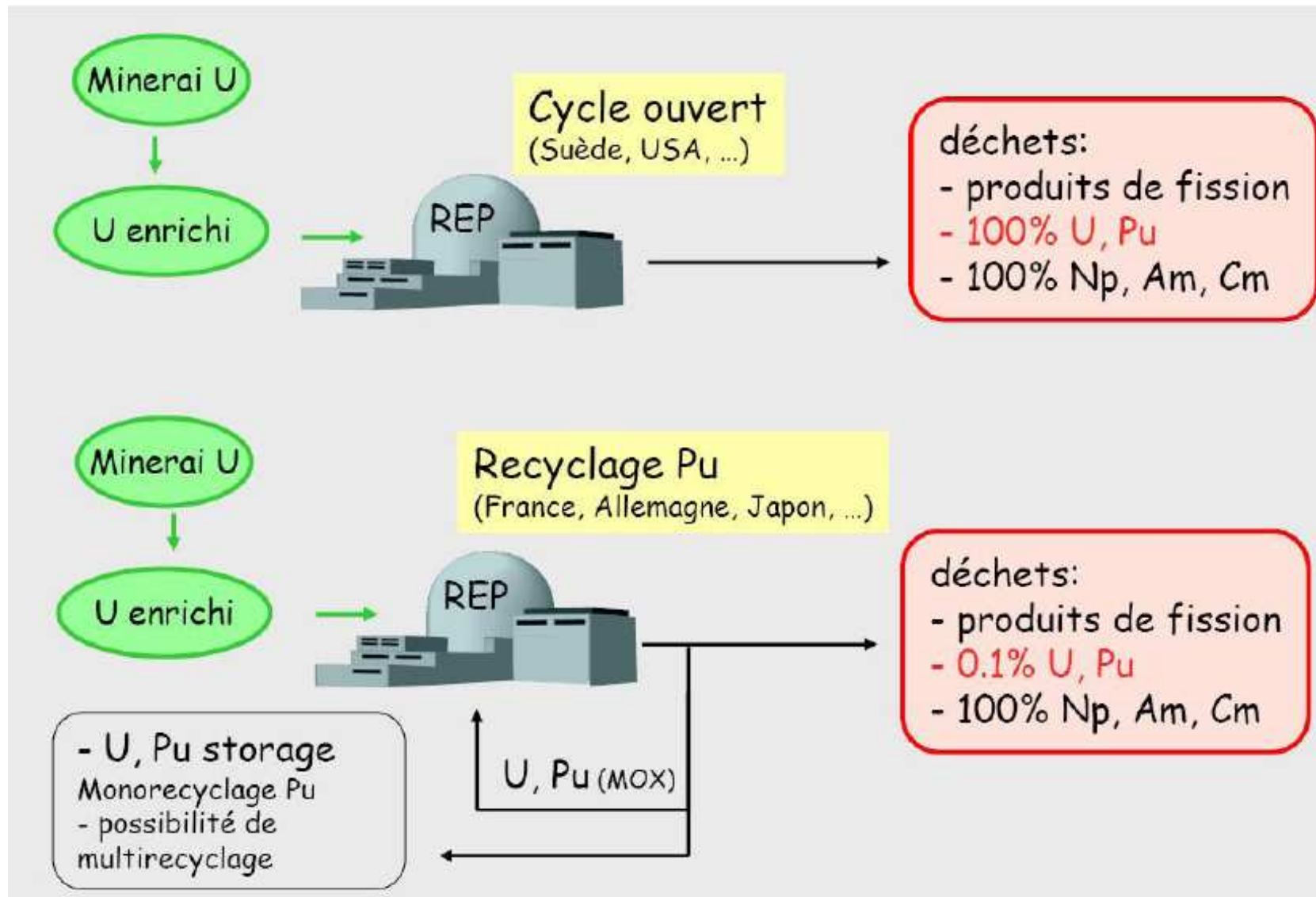
- Trois filières à l'étude
 - Séparation puis transmutation
 - Entreposage longue durée
 - Stockage définitif en milieu géologique

Bilan annuel du fonctionnement d'un REP d'1 GWe

En France : un cycle 'fermé'



'cycle ouvert' ou 'cycle fermé'



VI. Quelques réacteurs pour demain

- Le Forum Génération IV: <http://www.gen-4.org/>
- D'autres exemples?
 - Un projet futuriste: l'amplificateur d'énergie PEACE

Maîtriser la foudre de Thor! (1/2)

Pourquoi

Sécurité, Déchets, Prolifération → nouveau combustible

Comment

$\text{Th232} + n \rightarrow \text{U233}$

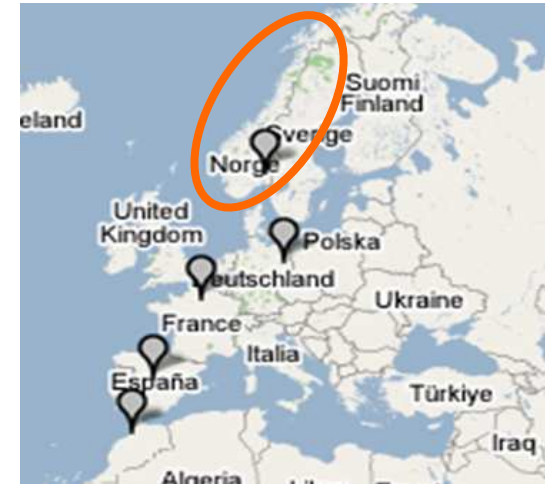
Coupler un réacteur **sous-critique** thorium
à une source extérieure de neutrons
(**accélérateur de proton + source de spallation**)

Bilan

- Réserves de thorium importantes (Inde, Norvège)
- Contrôle extérieur de la réaction : **sûreté renforcée**
- Nombre de masse plus bas : plus faible probabilité de produire des éléments HAVL
 - **Moins de déchets radioactifs**
 - **Réduction du risque de prolifération**
- Spectre rapide → brûler les déchets des centrales classiques : **réduction du volume actuel de déchets rad.**

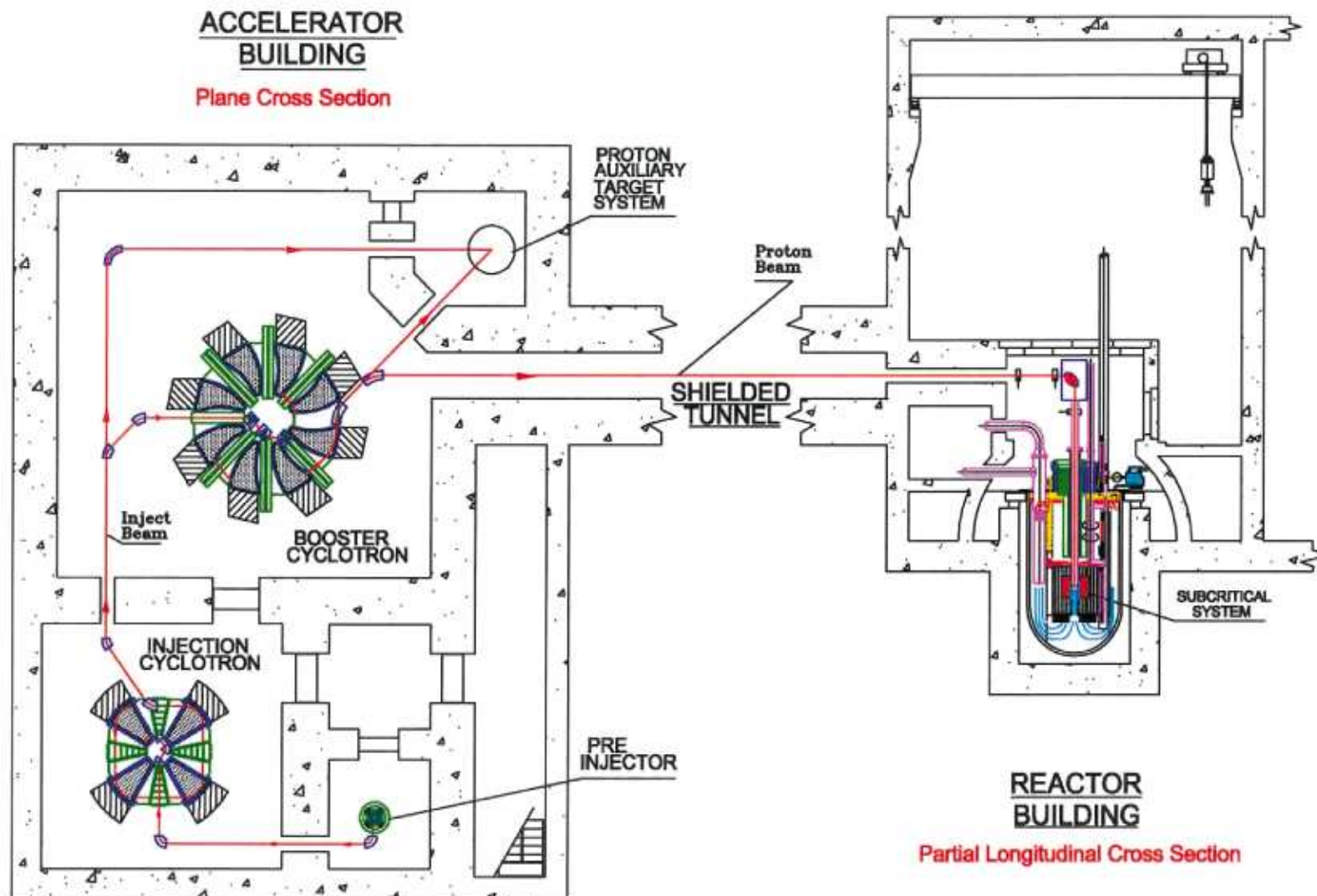
Il faut ...

Un prototype, sur le modèle de coopération international d'ITER?

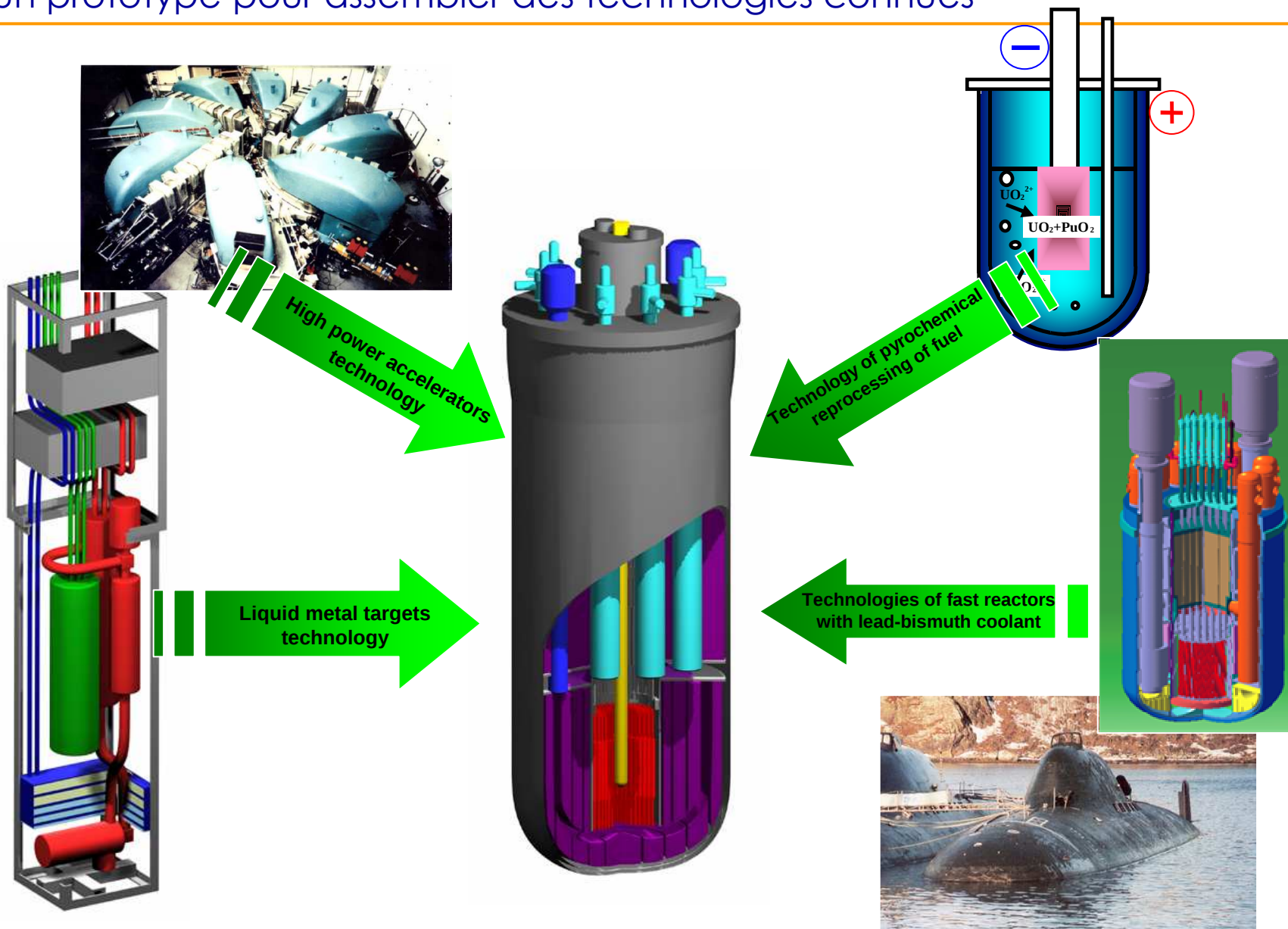


Prof. Egil Lillestol, UBergen

Maîtriser la foudre de Thor! (2/2)

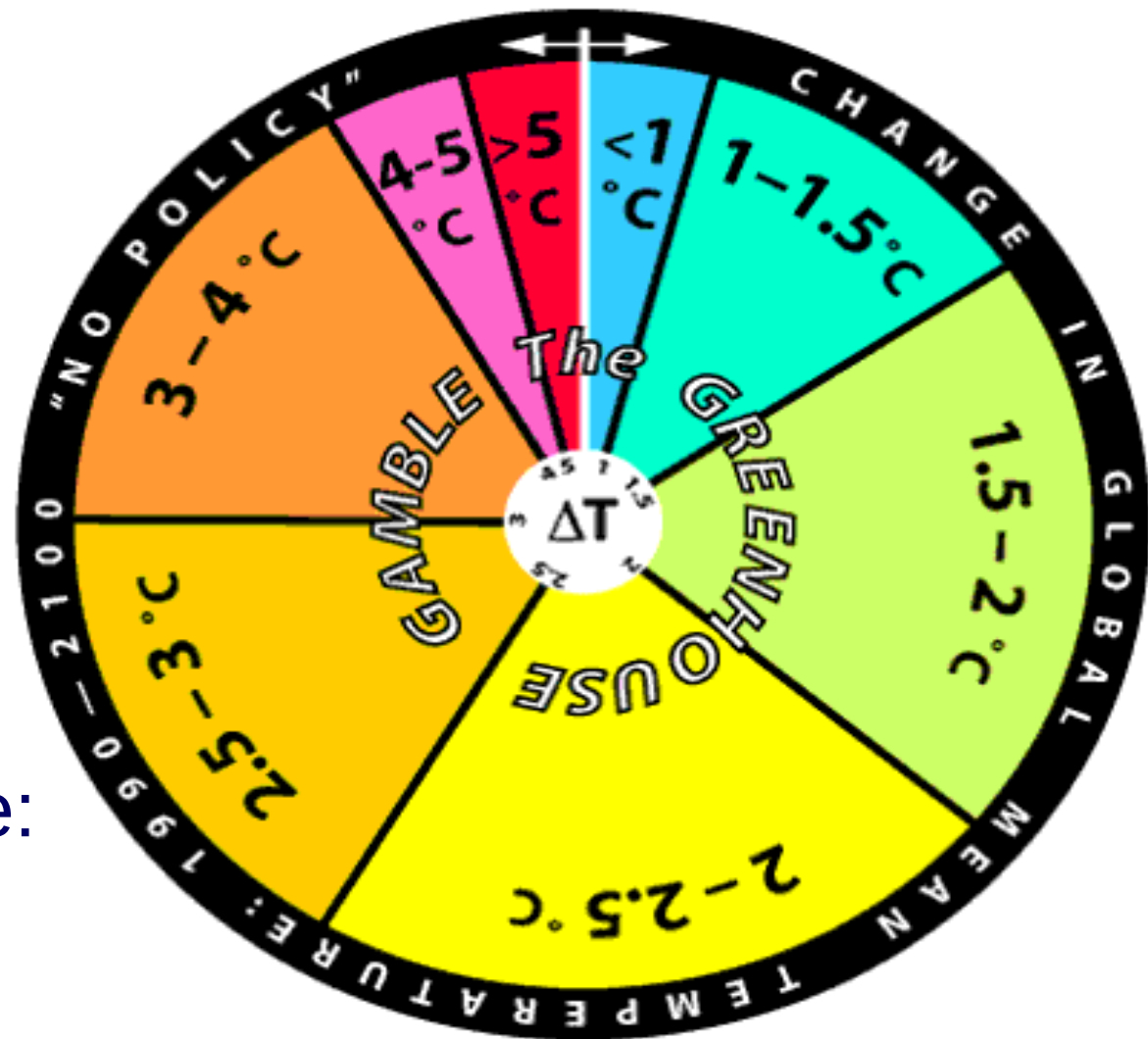


Un prototype pour assembler des technologies connues



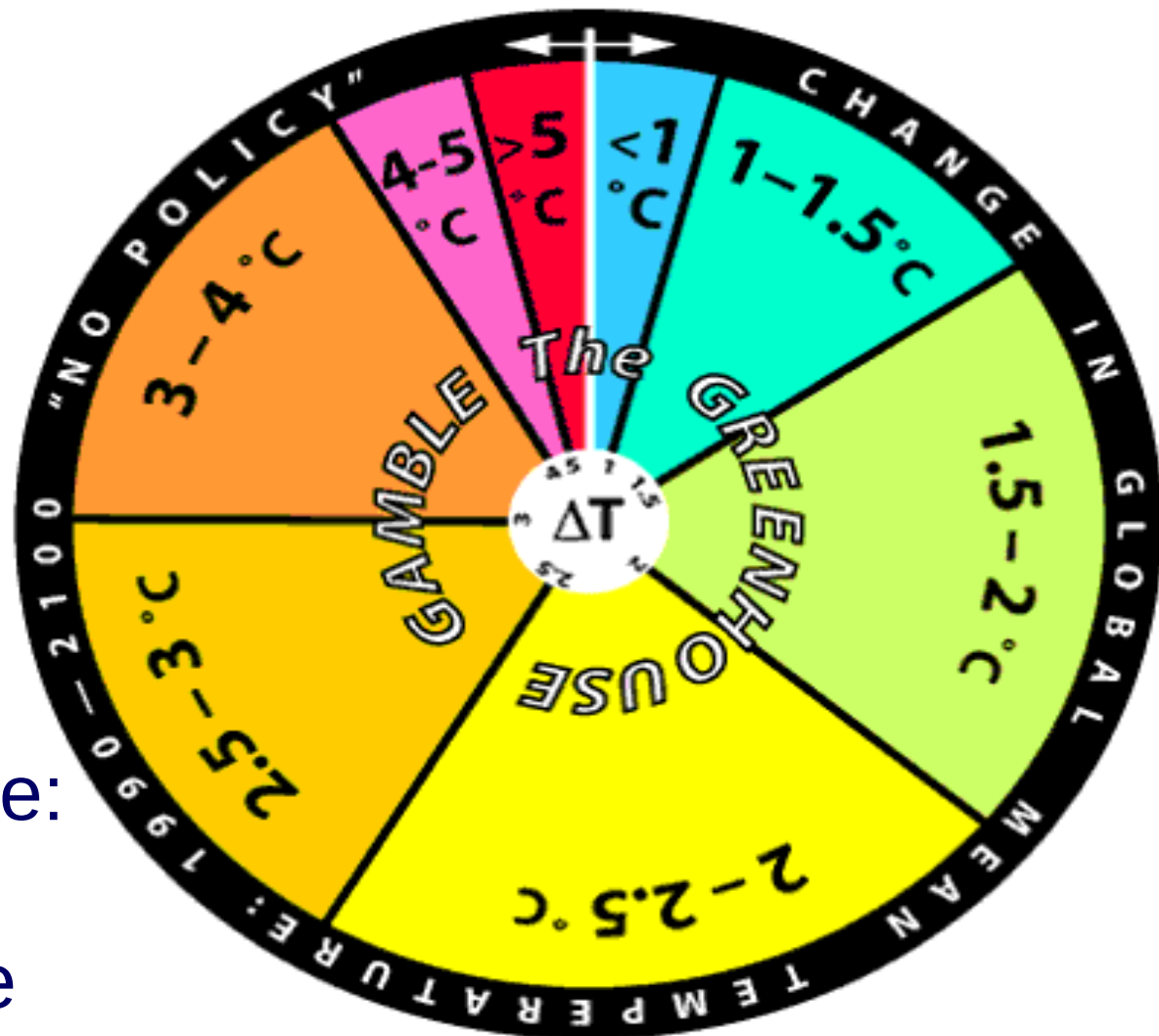
Questions ?

Quel niveau de risque ?



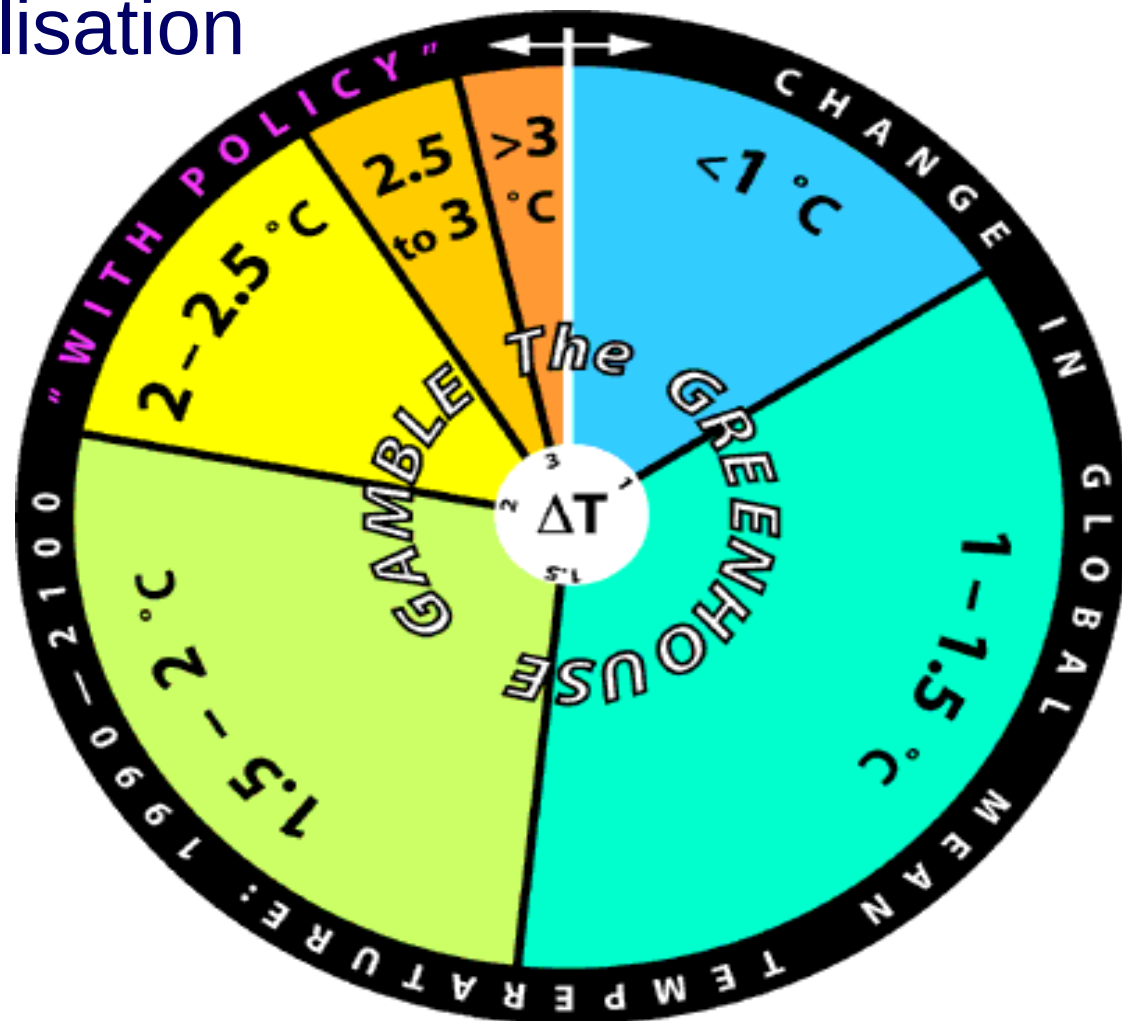
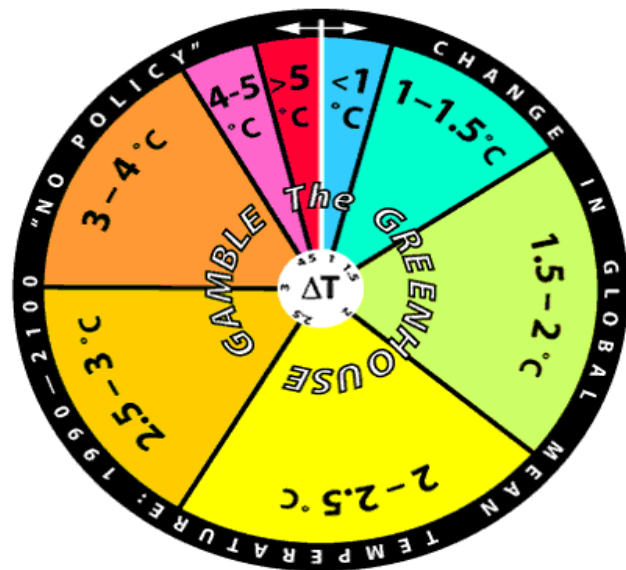
Expérience fictive:
 ΔT en 2100, pas
d'action publique

Quel niveau de risque ?



Expérience fictive:
 ΔT en 2100, pas
d'action publique

Que gagne-t'on dans un
scénario de stabilisation
à 550 ppm?



Des pistes d'actions : à nous de jouer...

La vie quotidienne

Transports

Achats (achat éclairés, signature CO₂, catalogues de produits verts)

ex: <http://www.community.officedepot.com/environment.asp>

ex: "une bouteille d'eau, remplie à 1/3 de pétrole"

Focus sur l'énergie utile

Réduire la demande

Amélioration des rendements d'utilisation

... avant le recours à des sources renouvelables

Au boulot

Activités sur le site de votre entreprise

tri sélectif, potager bio/AMAP, partenariat avec l'administration pour penser DD ...

Campus verts et préparation à influencer le monde professionnel

exemple de la sustainability pledge du MIT

<http://sustainability.mit.edu/Pledge>

Activités de communication

- et si on voyait ce qu'on émettait?

Univ. Tuft: <http://www.one.revver.com/watch/247328/>

- ... et ce qu'on consommait? (ex: affichage de la conso élec)

- aider à l'action : **empowerment** (responsabilisation)

* des idées pour chacun: <http://www.newdream.org/>;

* la « low carbon diet » : <http://empowermentinstitute.net/lcd/index.html>

* la Star Ac des économies d'énergie : <http://www.energysmackdown.com/> !

... avec Prométhée?

Prométhée, une association loi de 1901

Objectif: faire mieux connaître les technologies de l'énergie

Nous avons besoin d'aide !

- Pérennisation du kit pédagogique
 - Évaluation
 - Refonte du contenu
 - Développement d'une plateforme interactive
 - Contacts institutionnels
(insertion dans le programme scolaire)
- Valorisation du matériel photo & vidéo
 - Montage de films
 - Expositions photo
- Ton action au sein de Prométhée?



www.promethee-energie.org

promethee.mail@gmail.com