

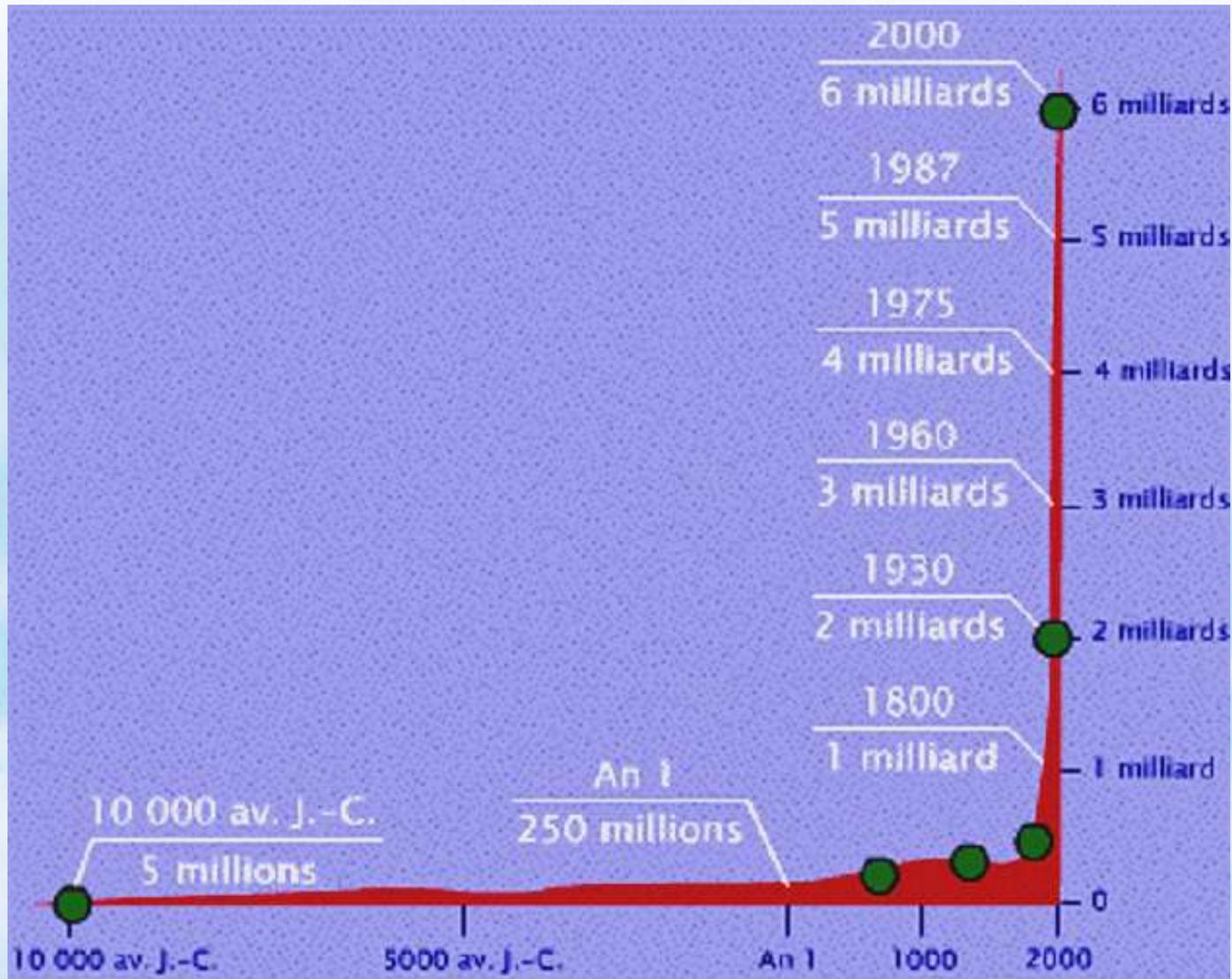
Climat et énergie : deux défis pour le XXI^e siècle

Jean-Marc Jancovici

Toutes les énergies ont accompagné le parcours de *Erectus* à *Industrialis*

- -500.000 ans : domestication du feu
- L'antiquité : toutes les renouvelables ont été utilisées ! Bois, vent, soleil, hydraulique, traction animale...
- Le pétrole est connu des Summériens (-3.000 av. JC environ), bien avant Drake et son premier forage (1859 à Tittusville)
- Le charbon est exploité dans la Chine antique 1000 ans avant notre ère
- Ce qui caractérise l'ère « moderne », ce n'est pas l'utilisation de sources « nouvelles » (sauf le nucléaire), mais le changement d'ordre de grandeur dans l'usage

Un premier changement d'ordre de grandeur : la population

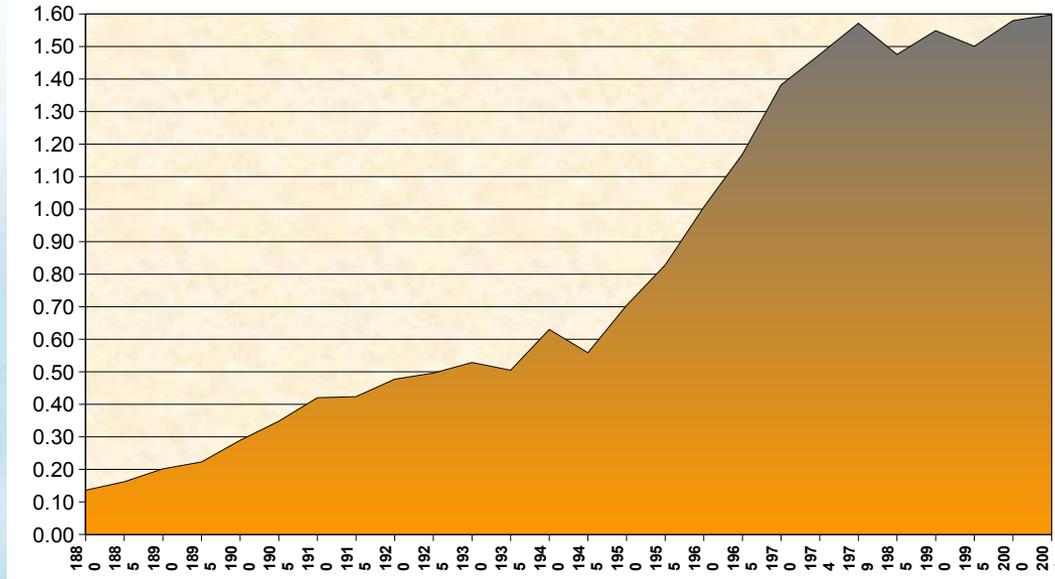


Évolution démographique depuis le néolithique (découverte de l'agriculture). Source : Musée de l'Homme

Un deuxième changement d'ordre de grandeur...

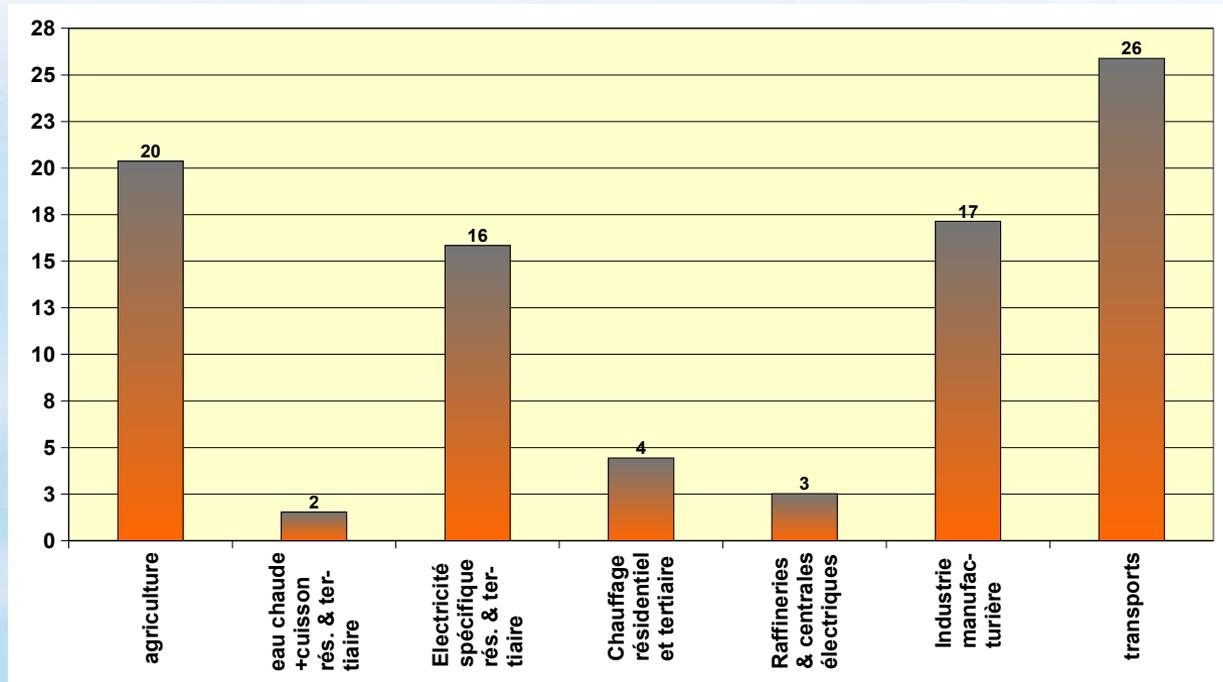
**Conso.
d'énergie
hors
biomasse
en tep par
habitant**

**Sources
diverses**



La consommation de chaque terrien moderne représente la nourriture de 10 à 20 esclaves ; si nous prenons le rendement de la machine humaine en compte c'est une centaine d'«équivalent esclave» dont dispose chaque Français

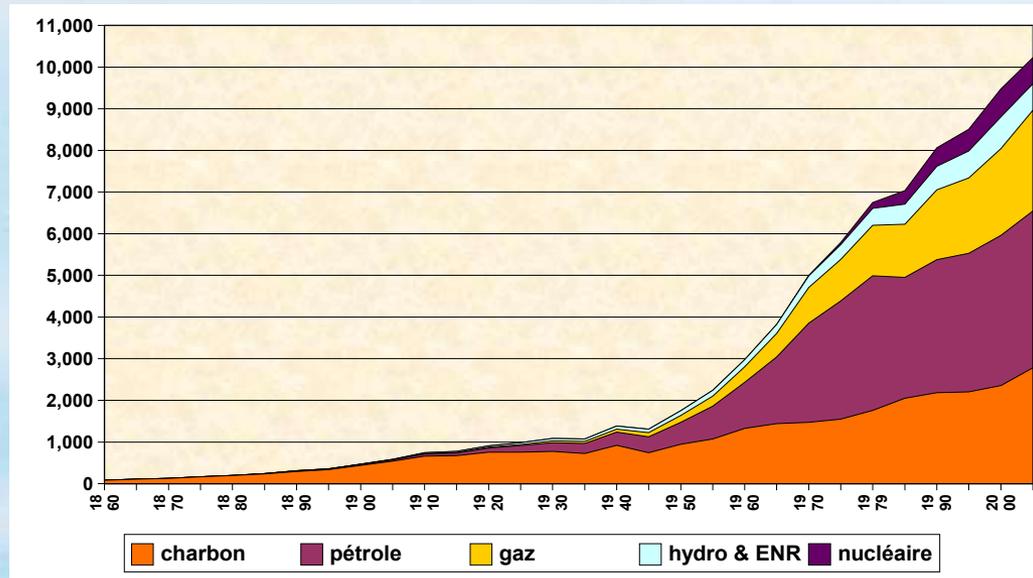
Tous les occidentaux sont des esclavagistes !



« Equivalent esclave » de chaque poste de consommation d'énergie : chaque Français dispose aujourd'hui de l'équivalent de 100 esclaves à sa disposition en permanence. Vous avez dit modeste !?!

Consommation totale d'énergie commerciale de l'humanité

en Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole). Source Schilling & al + Observatoire énergie + AIE



Depuis que l'homme a découvert les combustibles fossiles, la consommation de l'humanité n'a cessé d'augmenter. Chaque nouvelle source d'énergie est venue se surajouter aux autres et connaît sa propre évolution exponentielle : aucune substitution ne se constate au niveau mondial. **Un Américain consomme 4 fois plus de charbon qu'un Chinois.**

L'effet de serre est de l'histoire très ancienne

1824 : Joseph Fourier, physicien français, publie "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires", où il expose que la température du sol est augmentée par le rôle de l'atmosphère

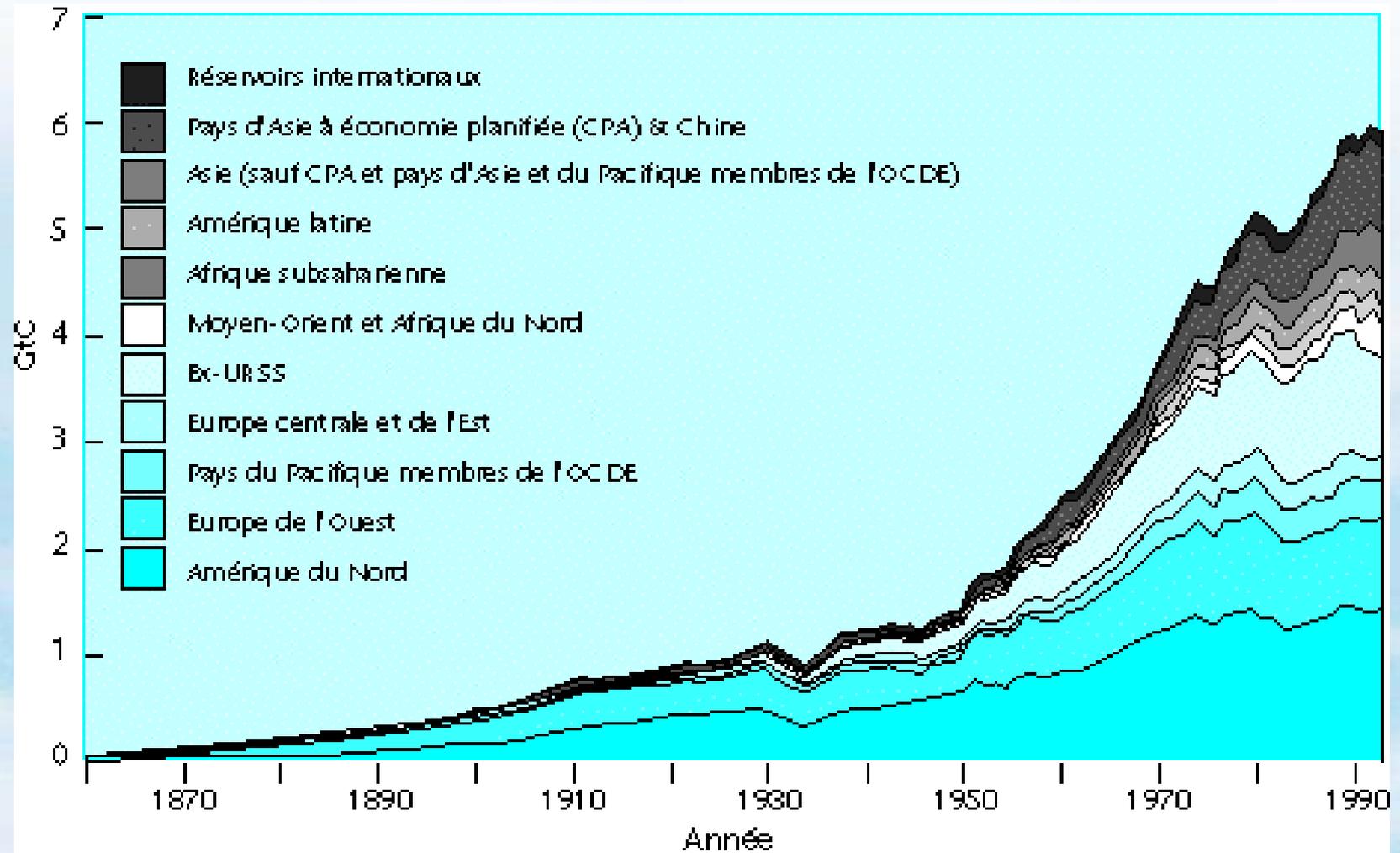
1838 : Claude Pouillet, physicien français, attribue l'effet de serre naturel à la vapeur d'eau et au gaz carbonique. Il conclut que toute variation de la quantité de vapeur d'eau, comme de CO₂, devrait se traduire par un changement climatique

1896 : Svante Arrhenius, chimiste Suédois (Prix Nobel 1903) prédit que l'utilisation intensive des combustibles fossiles engendrera un réchauffement climatique. Il donne un ordre de grandeur : 4°C en plus pour un doublement du CO₂ dans l'air.

1920 : Lewis Fry Richardson, un physicien anglais, tente une première expérience de modélisation du climat à partir des seules équations de la physique (sans ordinateur !).

1950 : Le premier ordinateur (l'ENIAC) est utilisé pour expérimenter le premier modèle numérique de prédiction météorologique

Emissions de CO₂ provenant de combustibles fossiles



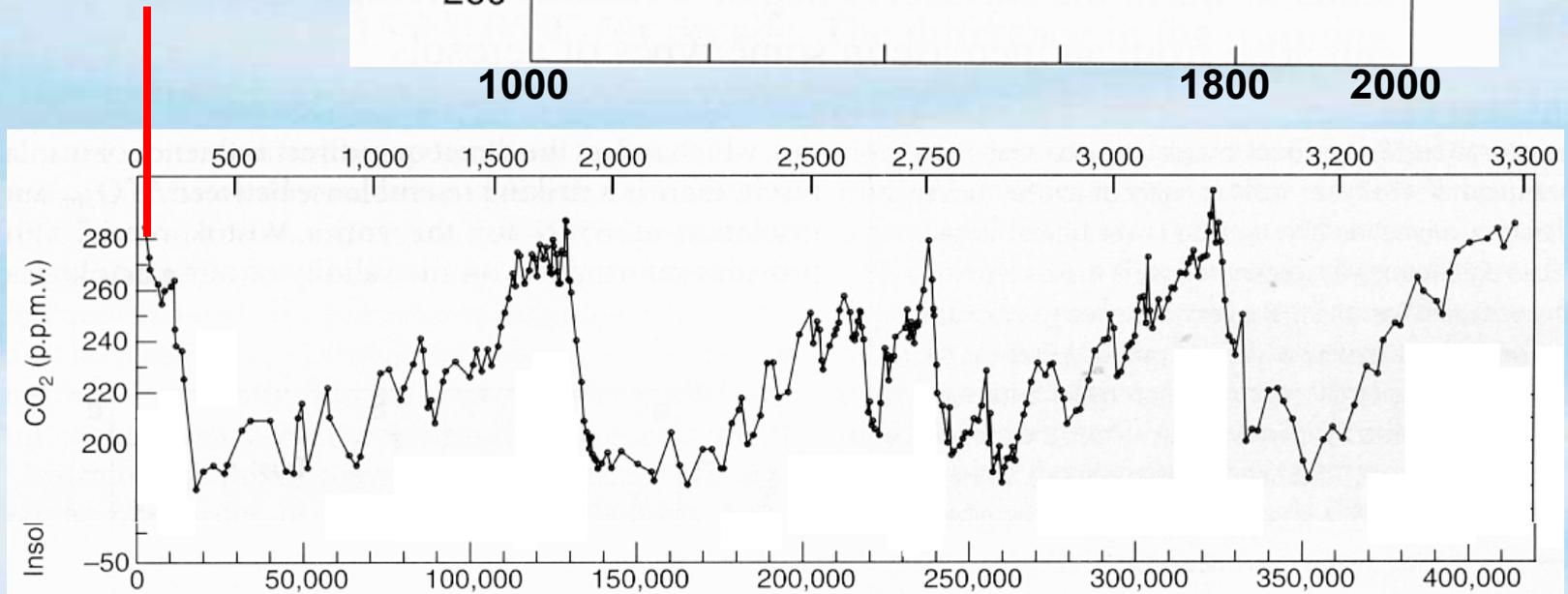
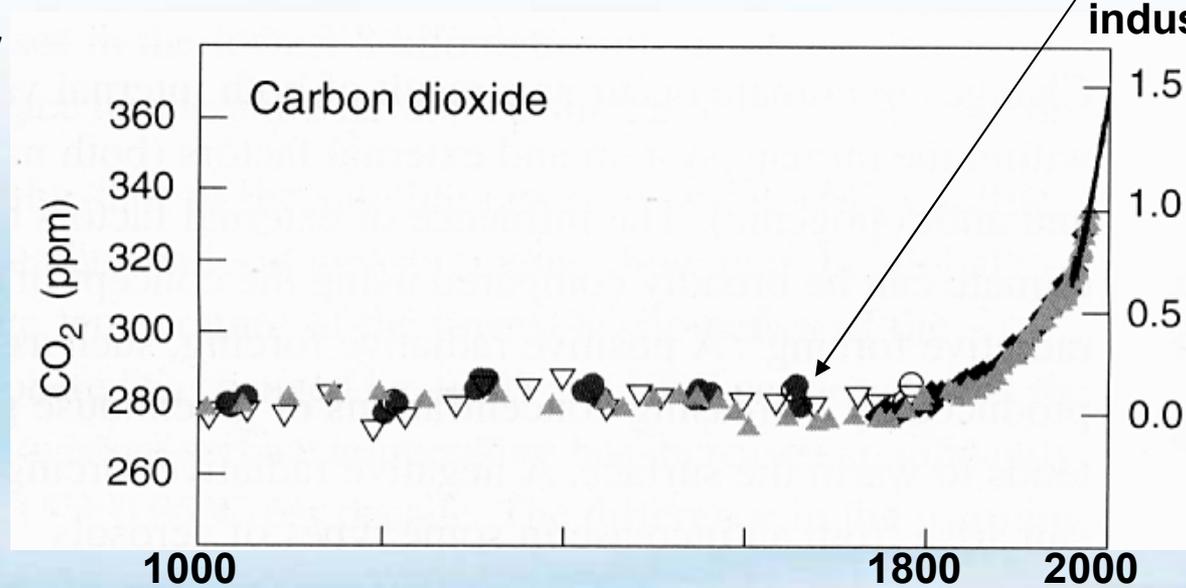
Les émissions de CO₂ provenant de combustibles fossiles ont été multipliées par plus de 4 depuis 1950. Climate Change 1995, GIEC

Tout ce CO₂ se retrouve dans l'air, et....une partie y reste

Début de la
révolution
industrielle

Concentration sur
les 1.000
dernières années.

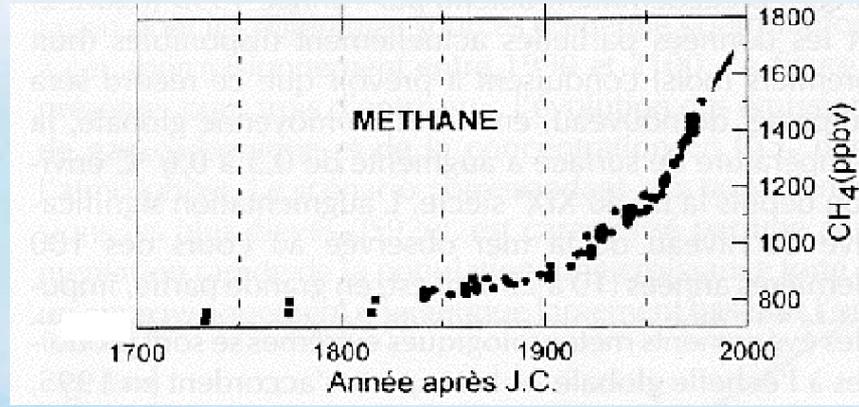
Source :Climate
Change 2001, the
scientific Basis,
GIEC



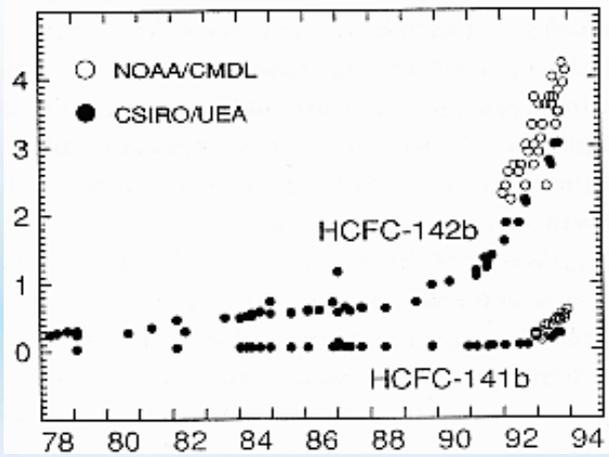
Concentration atmosphérique de CO₂ sur les 400.000 dernières années. Source : Petit & al, Nature, 1999

Les autres gaz s'accumulent aussi pour partie dans l'atmosphère

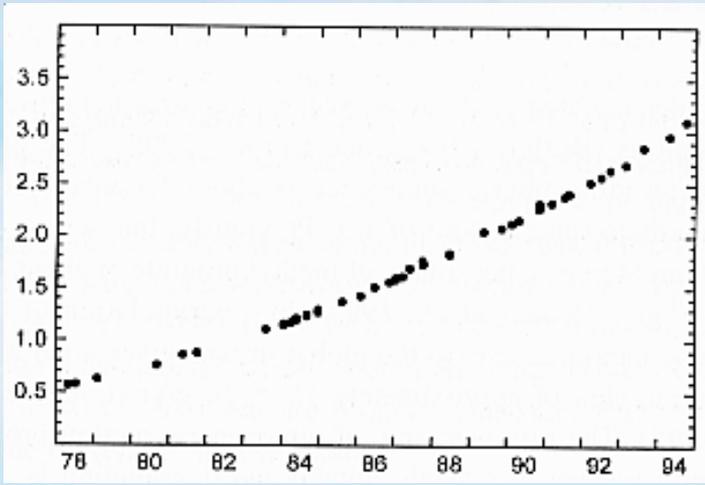
Concentrations dans l'air de divers gaz à effet de serre. GIEC, 2001



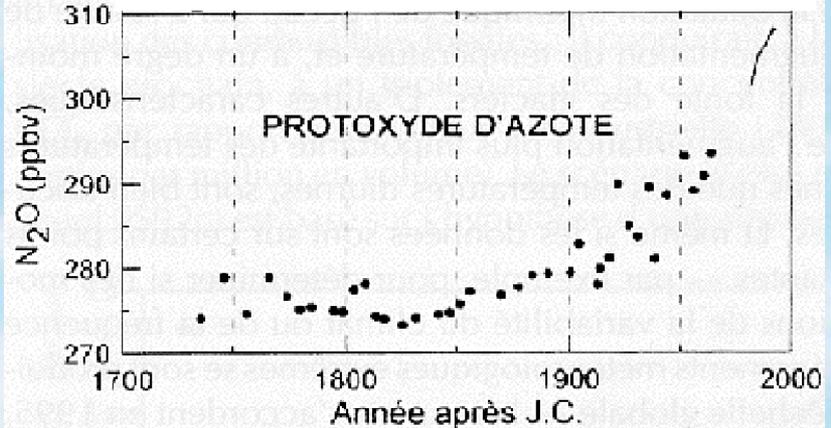
Méthane (CH₄)



Deux exemples d'HFC (substituts des CFC)



Hexafluorure de soufre (SF₆)



Protoxyde d'azote (N₂O)



Il y a aussi de l'effet de serre « ailleurs » !

Planets and atmospheres

Mars

Thin atmosphere

(Almost all CO₂ in ground)

Average temperature : - 50°C



Earth

0,03% of CO₂ in the atmosphere

Average temperature : + 15°C



Venus

Thick atmosphere

containing 96% of CO₂

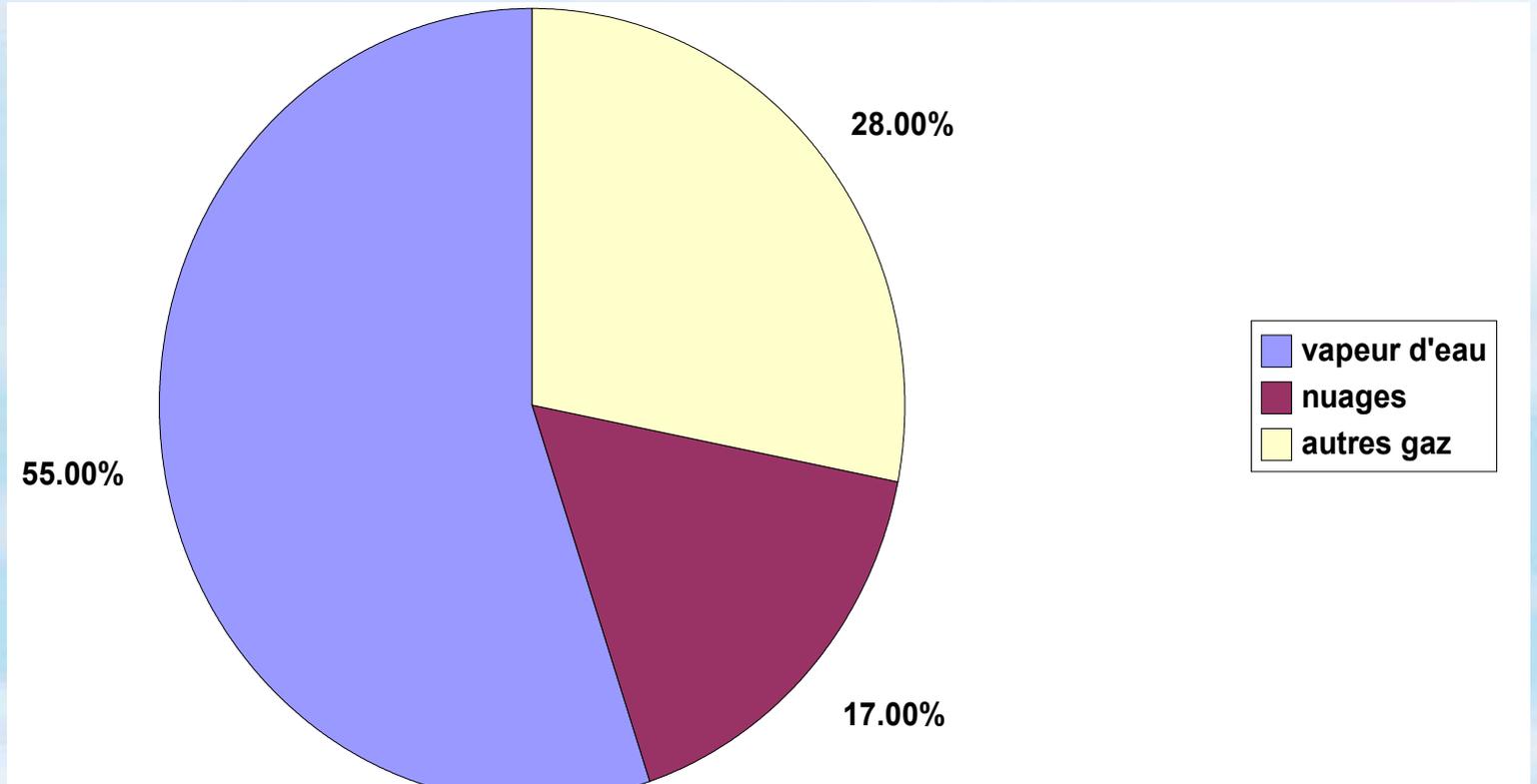
Average temperature : + 420°C



GRID
Arendal UNIZ

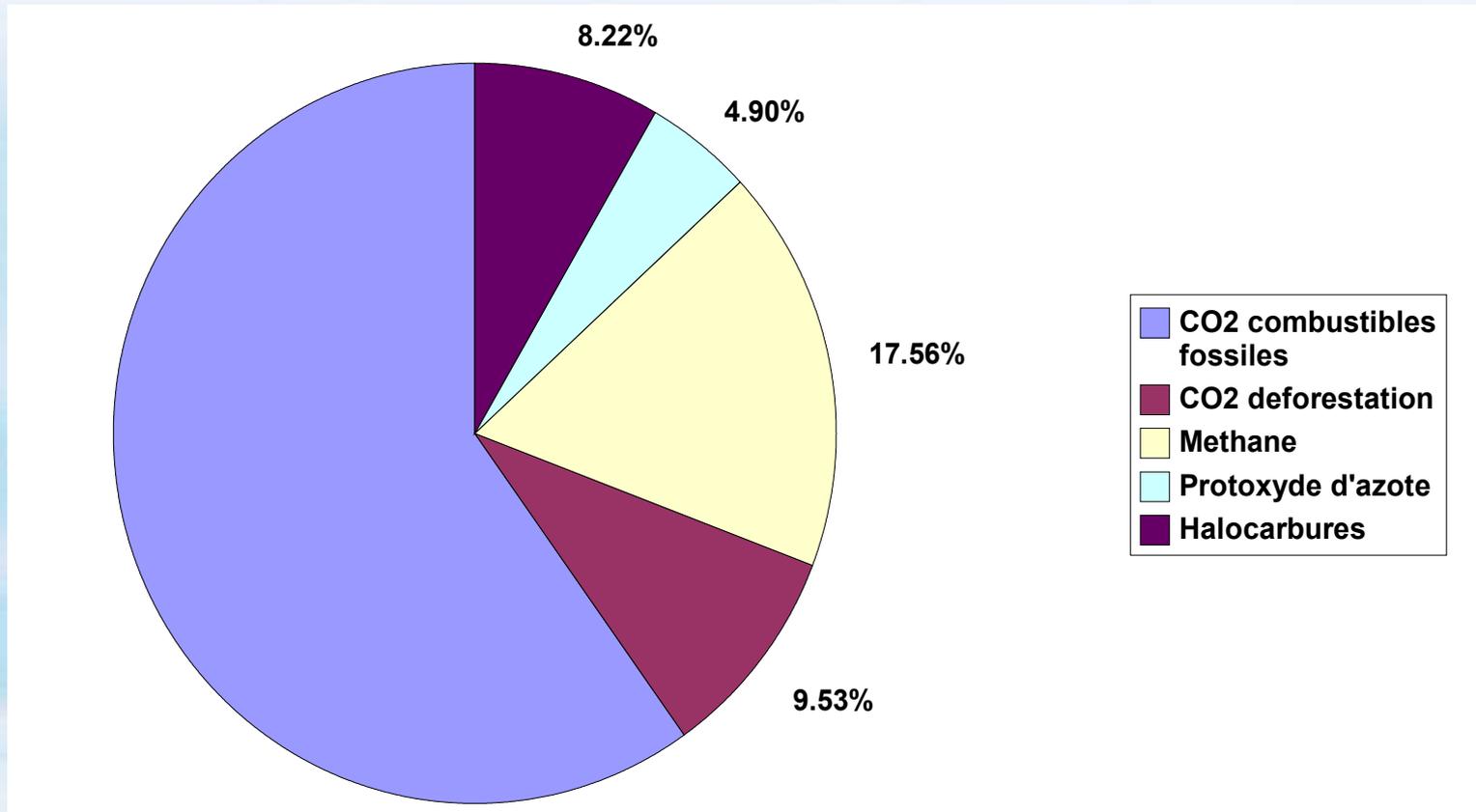
GRAPHIC DESIGN : PHILIPPE REKACIEWICZ

Origine de l'effet de serre « naturel »



Émissions anthropiques principales de gaz à effet de serre

En pourcentage, hors ozone



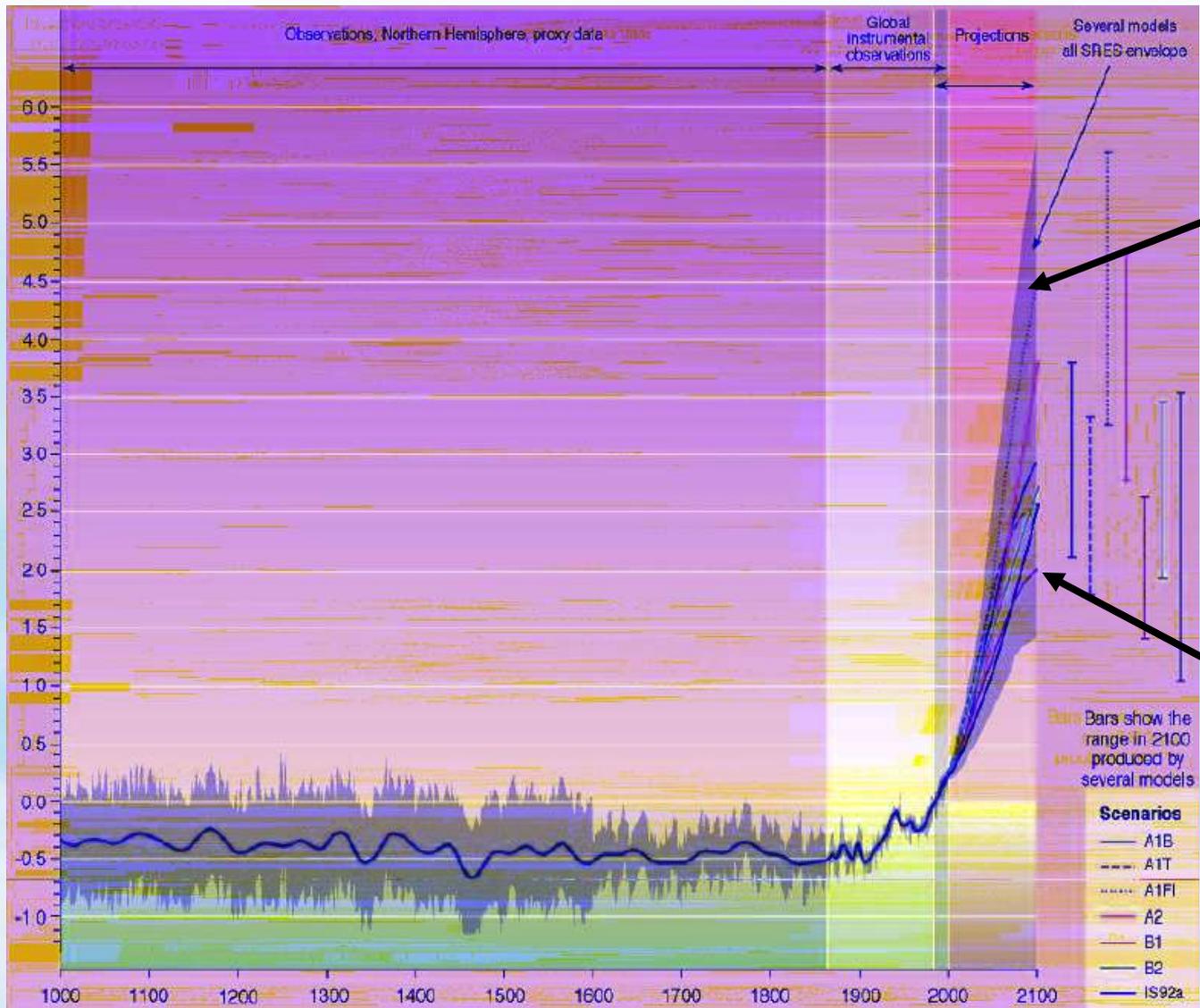
Plus de 50 % des gaz à effet de serre sont issus de la combustion des hydrocarbures

L'augmentation de l'effet de serre nous engage pour une durée géologique

Gaz	Durée de résidence approximative dans la troposphère
CO₂	100 ans
N₂O	120 ans
CH₄	10 ans
Halocarbures	quelques semaines à 50.000 ans

La durée de résidence désigne le temps que met à s'évacuer un petit surplus mis dans l'atmosphère par nos soins. Une large partie du CO₂ que nous émettons aujourd'hui même sera encore présent au-dessus de la tête de nos descendants, dans plusieurs siècles.

Je mets mes scénarios d'émission dans les modèles : quel résultat ?



10 milliards de terriens évoluent vers les émissions d'un Polonais de l'an 2000

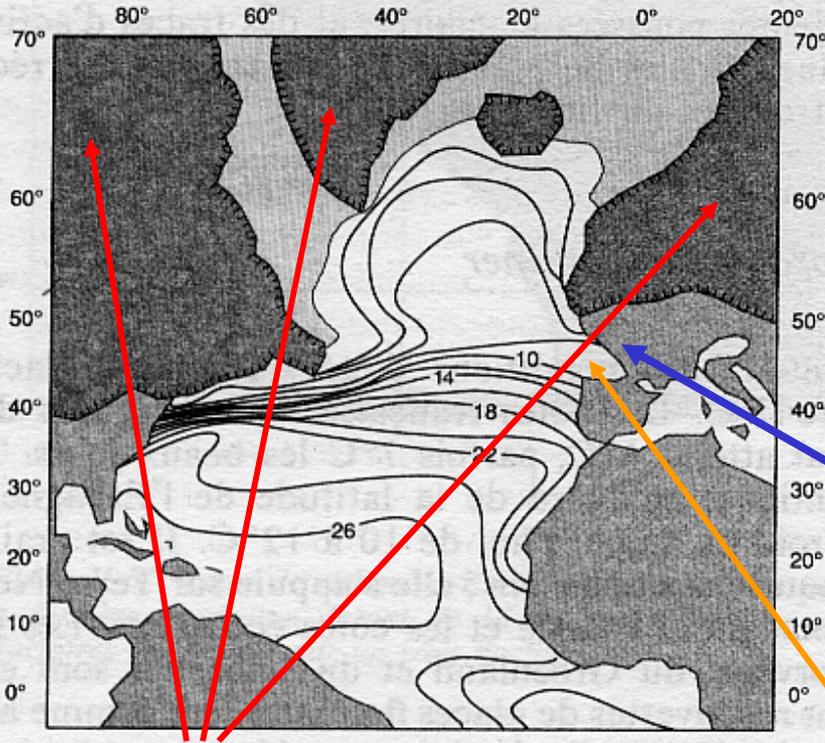
Les émissions mondiales restent constantes

Évolution de la température moyenne de l'air au niveau du sol, selon les scénarii, et mise en perspective avec le passé. Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

Quelques degrés en plus, c'est un changement d'ère climatique

Depuis le dernier maximum glaciaire, **la moyenne planétaire n'a augmenté «que» de 5°C**, mais notre planète a considérablement changé.

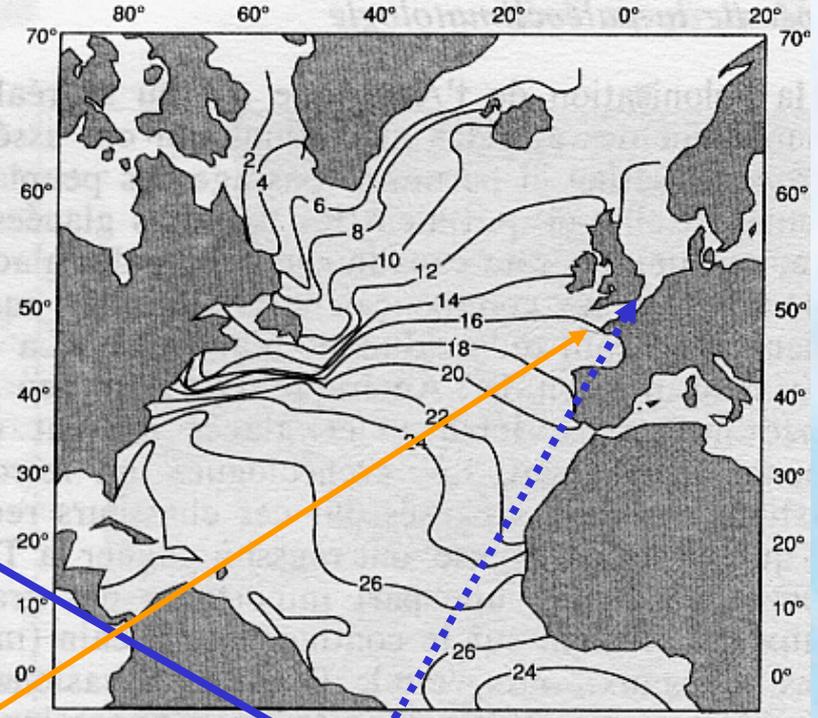
Il y a 20.000 ans



Période glaciaire : d'immenses glaciers, épais de plusieurs km, recouvrent l'Amérique et l'Europe du nord. Le sol de la France est gelé en permanence, et inapte aux cultures

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

Aujourd'hui



Période glaciaire : on passe à pied sec de France en Angleterre : la mer est plus basse de 120 mètres !

-> Quelques degrés de hausse, ce sera une modification radicale du monde actuel

Quels seront les impacts du changement climatique ?

Avec une amplitude qui dépendra de nos émissions :

Impacts sur les écosystèmes (affaiblissements, disparitions, déplacements)

Augmentation du niveau des océans

Impacts sur les courants marins et donc sur les climats régionaux

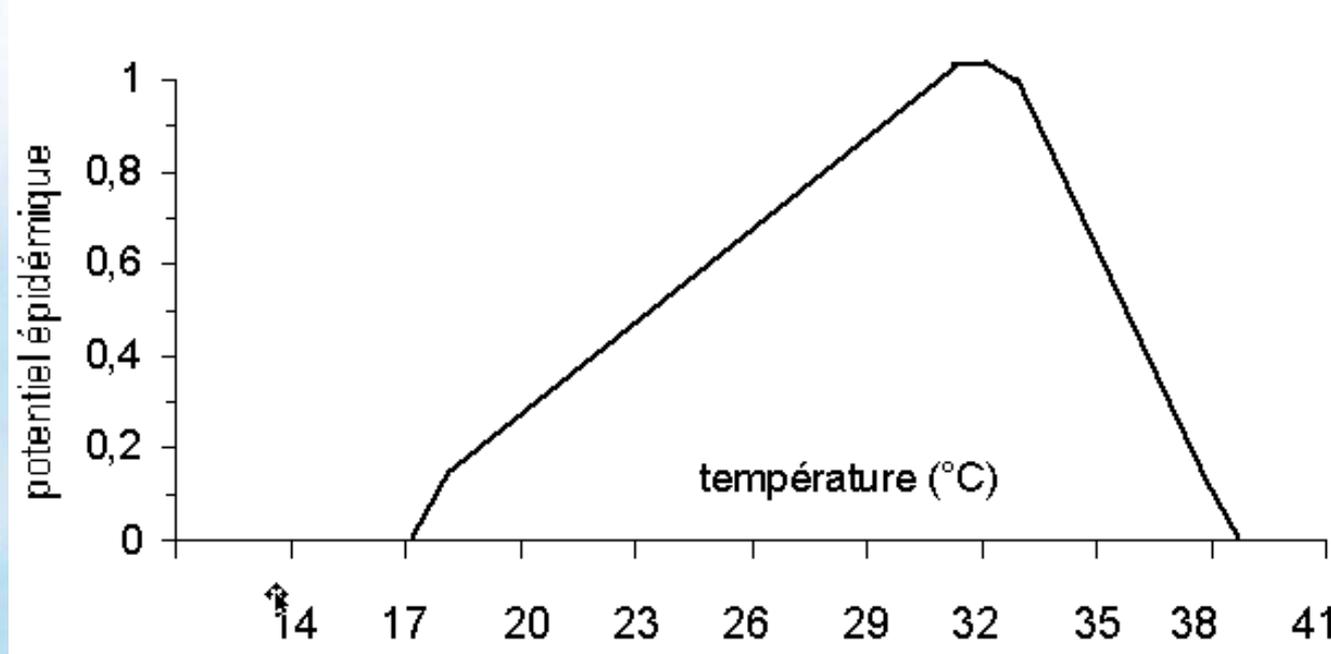
Modification des phénomènes extrêmes (dont pics de chaleur, précipitations intenses, sécheresses, etc)

Augmentation du « trou d'ozone »

Impacts directs sur la santé humaine (déplacement des zones endémiques pour les maladies, conséquences des phénomènes brusques, etc).

Et nous ne ferons jamais le tour de toutes les mauvaises surprises possibles à l'avance, puisque la situation est inédite

Impacts sur la santé

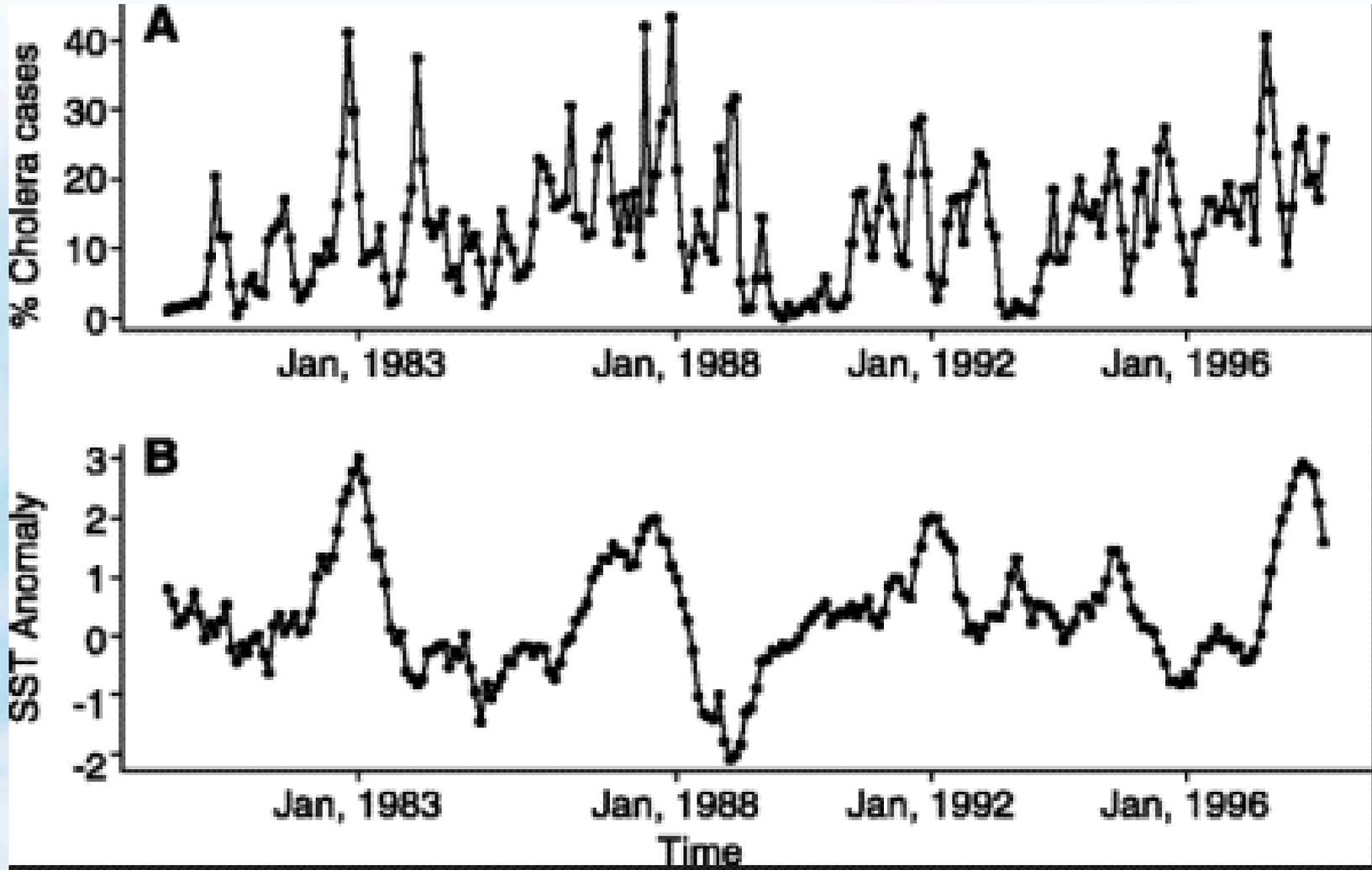


Potentiel épidémique du paludisme en fonction de la température. J.-P. Besançon, La jaune et La Rouge, 2000

La chaleur est généralement favorable aux micro-organismes, ce qui s'applique aussi à ceux qui sont pathogènes. Les risques évoqués concernent :

- **L'augmentation des zones concernées par les maladies à vecteurs (paludisme, fièvre jaune, dengue, fièvre de la vallée du Rift...) aussi bien dans la population que pour les animaux sauvages ou domestiques (Lucilie bouchère, maladie de la langue bleue, etc),**
- **la remontée vers le Nord de pathologies des plantes et animaux**
- **Augmentation de la virulence des micro-organismes pathogènes en général ?**

Impacts sur la santé

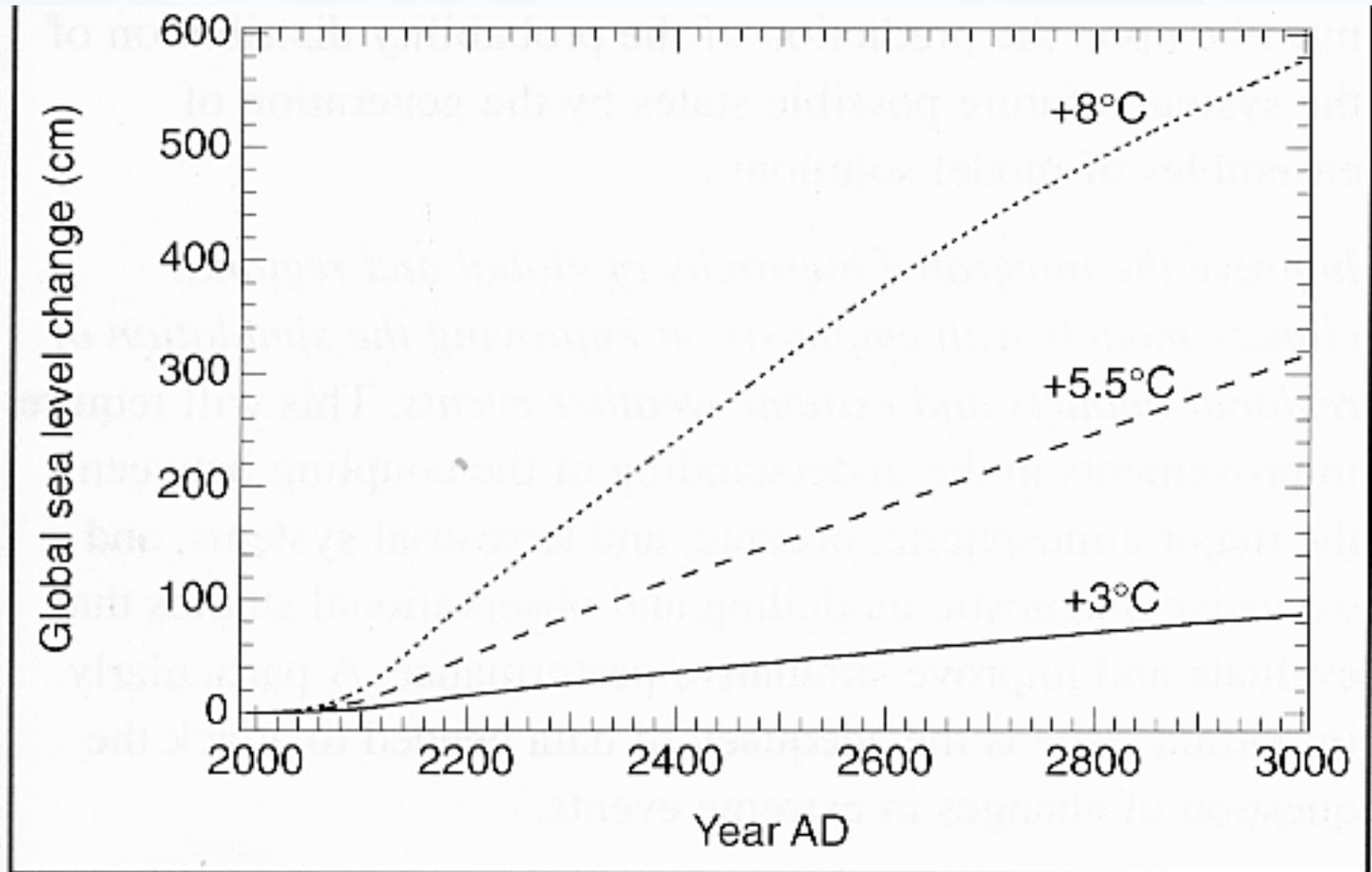


Un autre exemple de corrélation température-prévalence d'une maladie infectieuse : lien entre les cas de choléra et la température de surface de l'océan tropical est pacifique.

Source : Colwell, Science, 1996 et Pascual et col., Science, 2000.

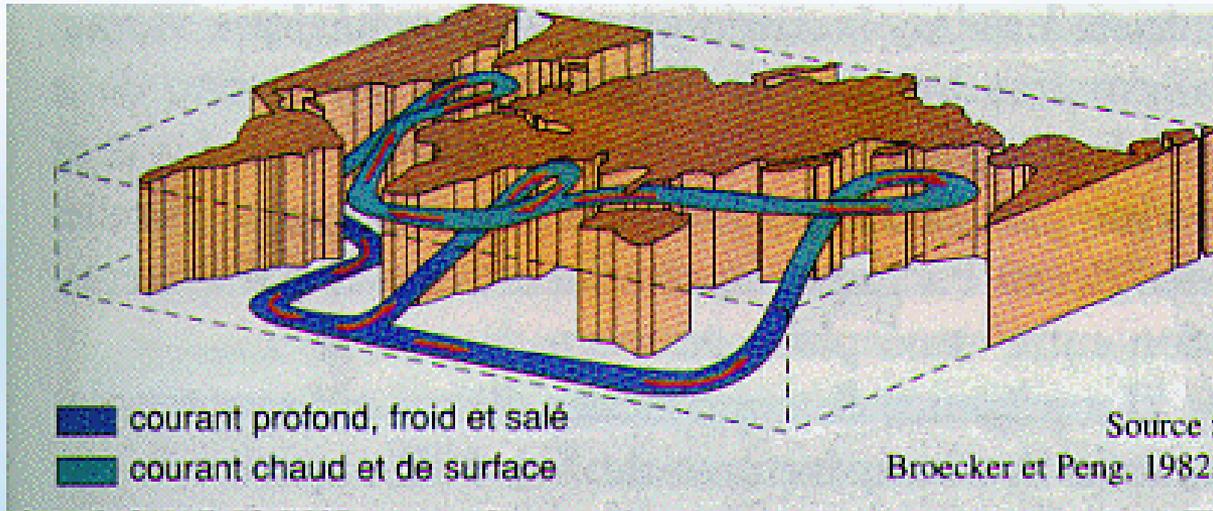
Mais surtout, le processus possède une inertie considérable

Climate
Change 2001,
the scientific
Basis, GIEC



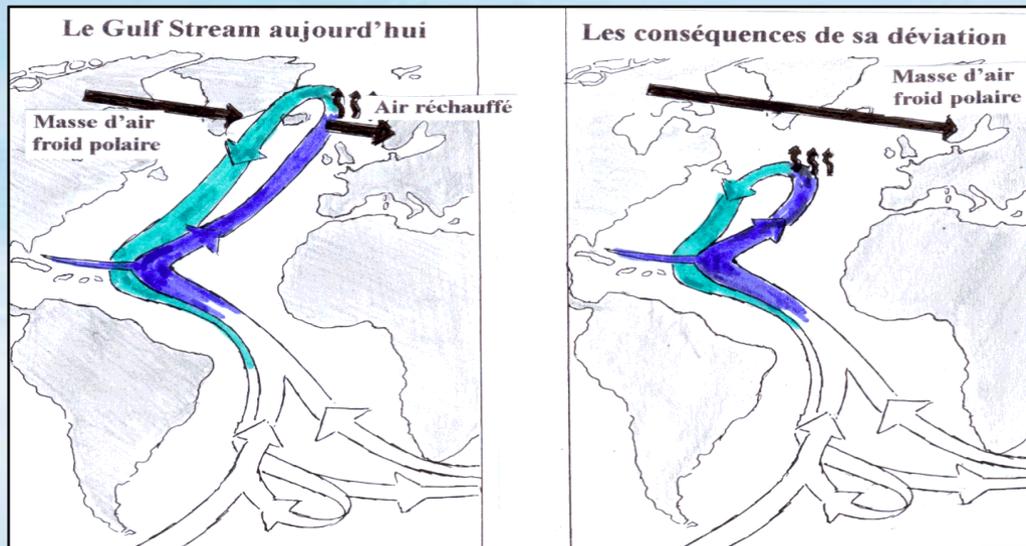
Élévation du niveau des océans à plus long terme, suite à la fonte partielle ou totale du Groenland. Les températures mentionnées sont les **élevations au-dessus du Groenland** atteintes en 3000 (nécessairement très supérieures aux élévations planétaires en 2100). Un problème analogue se pose pour la calotte «occidentale» de l'Antarctique.

Modification des courants marins



Des échanges entre eaux de surface et eaux profondes ont lieu en permanence.

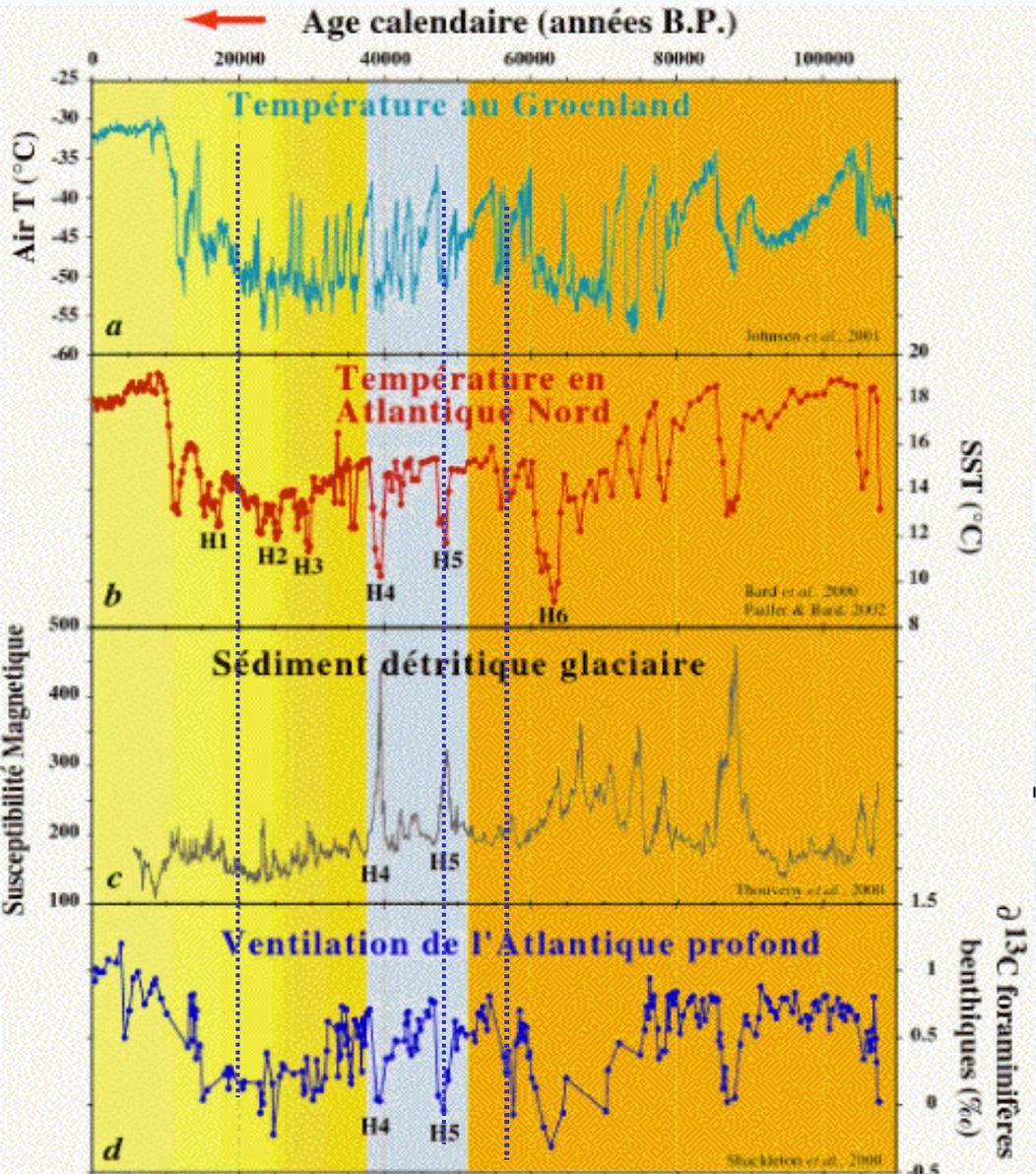
Les eaux profondes remontent les éléments nutritifs (sels minéraux) indispensables à la faune marine de surface.



Un ralentissement de cette circulation profonde :

- Modifie la répartition de la chaleur à la surface du globe avec un impact local ou régional qui peut être massif (l'Europe en période glaciaire ?),
- diminue les apports minéraux en surface et l'oxygénation des fonds : pression sur la vie halieutique

Le ralentissement de la circulation océanique profonde dans le passé



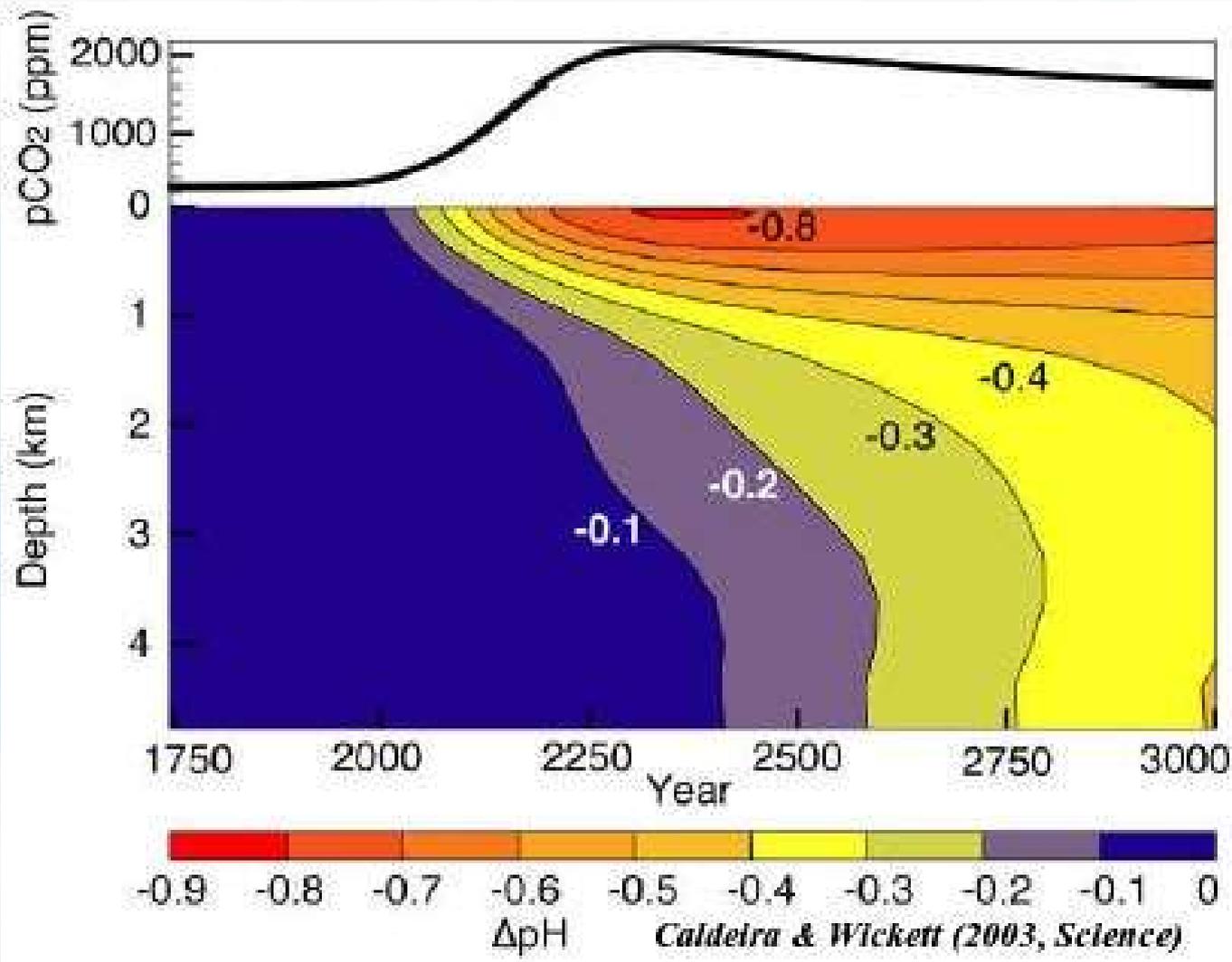
De tels ralentissements, engendrant de véritables « chocs climatiques », sont arrivés à de multiples reprises dans le passé (les lignes verticales tiretées en montrent 3, mais il y en a eu au moins 6 pendant la dernière ère glaciaire ; le plus récent s'appelle le Dryas récent).

Reconstitution, sur les 100.000 dernières années :

- de la température au-dessus du Groenland ($\delta O_{18}/O_{16}$, $\delta D/H$ dans la glace)
- de la température de surface de l'Atlantique Nord (proportion d'alkénones dans les sédiments marins)
- de la proportion de sédiments détritiques glaciaires dans les sédiments marins (atteste de la présence d'icebergs détachés du Laurentide et du Groenland)
- de la teneur en oxygène de l'eau profonde ($\delta C_{13}/C_{12}$ dans les foraminifères benthiques)

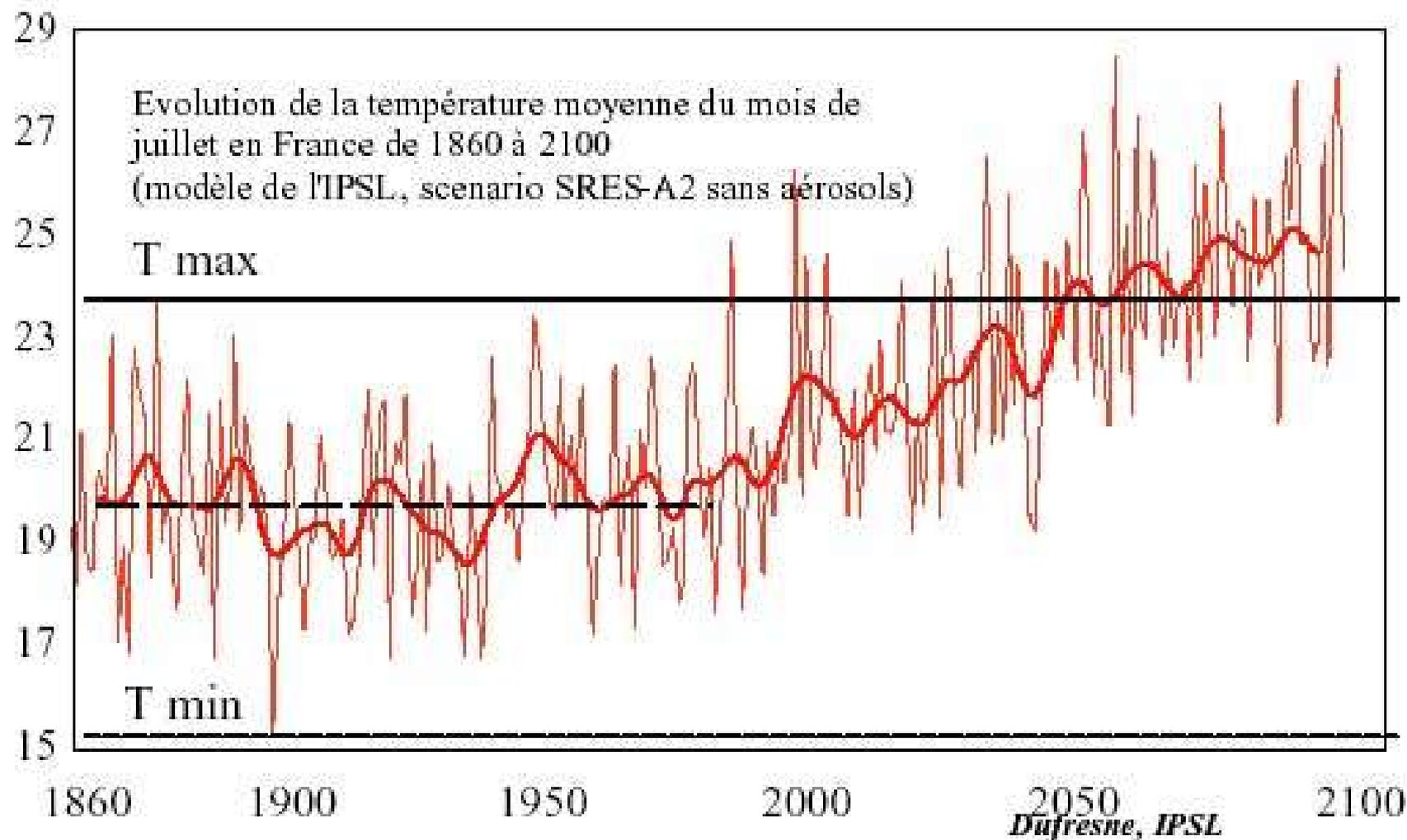
Source : Edouard Bard, Physics Today, 2002

Plus de CO₂ dans l'air n'a pas que des effets climatiques...



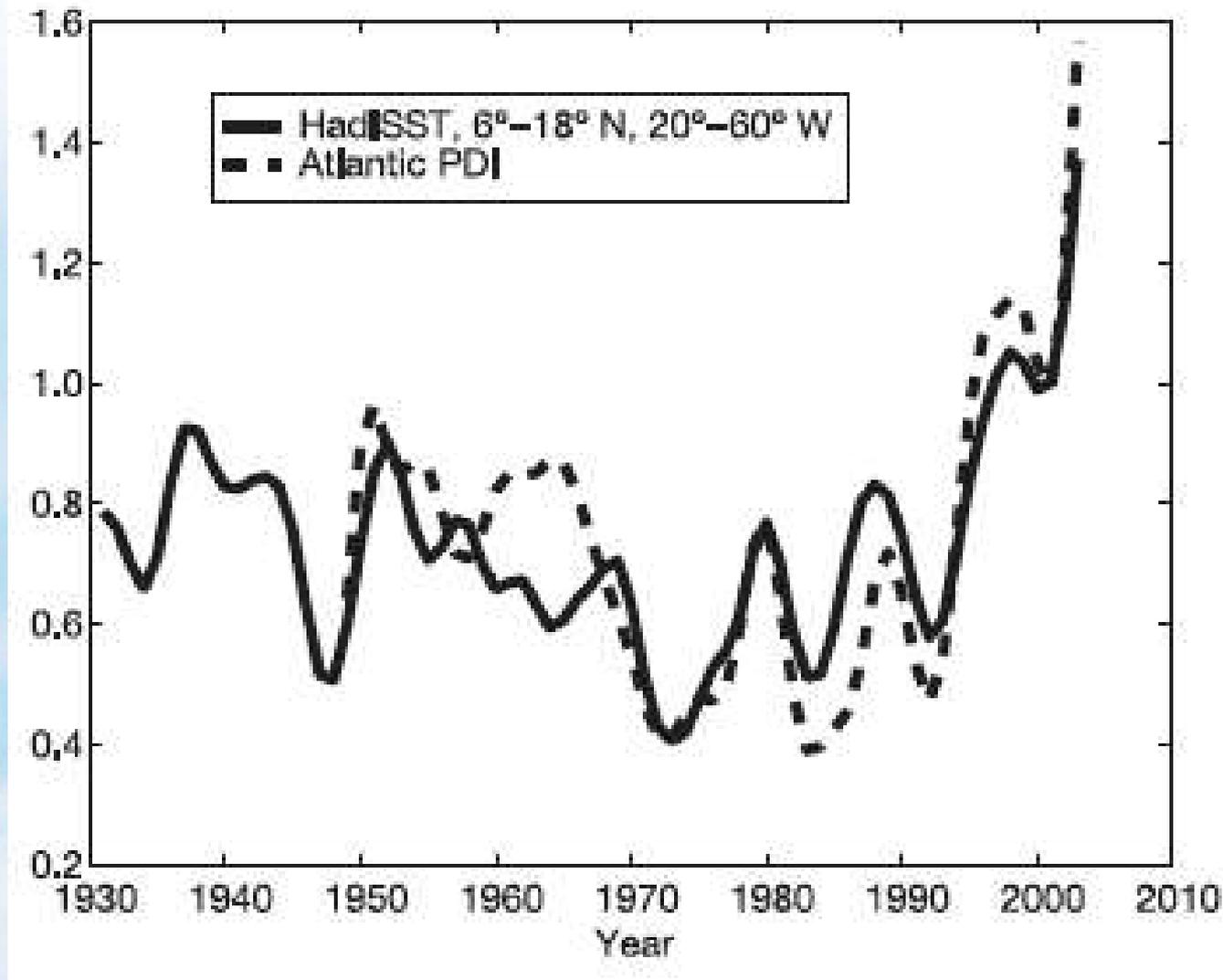
Simulation de variation du pH de l'océan en fonction du temps et de la concentration en CO₂. Source Caldeira et Wickett, Science, 2003

Plus chaud l'été plus tard en France ? P'têt ben qu'oui....



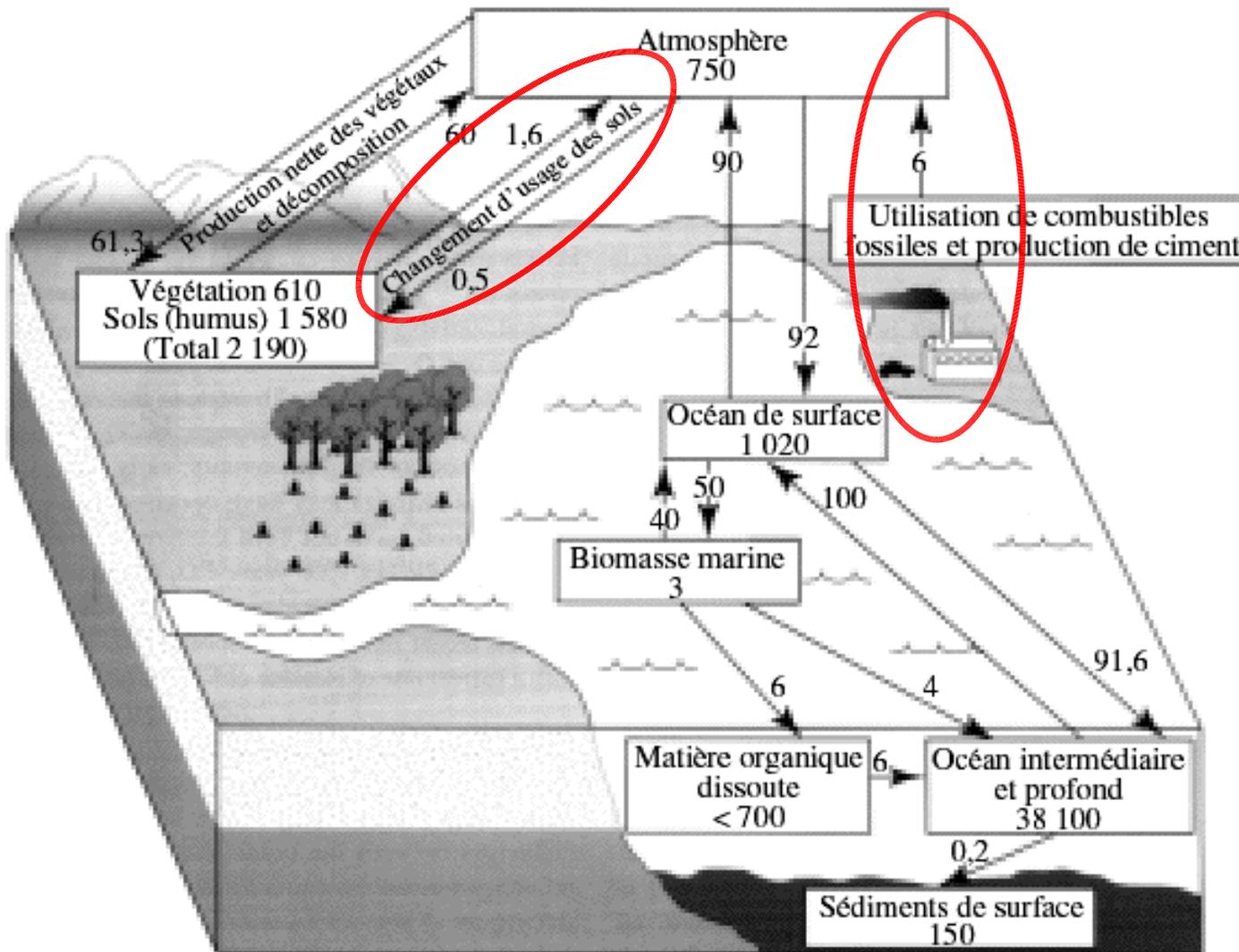
Simulation réalisée à l'IPSL sur la température moyenne du mois de juillet en France. L'été 2003 pourrait bien être la normale d'ici quelques décennies. Verrons nous étés à 50 °C ?

Une puissance cyclonique accrue ? P'têt ben qu'oui....



Comparaison sur 70 ans de l'évolution de la température moyenne de l'Atlantique tropical et de l'énergie globale libérée par les cyclones pendant la saison cyclonique. Source Nature, 2005

Les émissions de CO₂ perturbent des échanges naturels de carbone



L'émission liée aux activités humaines est faible comparé aux échanges naturels, mais importante comparée au solde de ces échanges naturels

Le phénomène peut «s'emballer» : les puits deviennent des sources

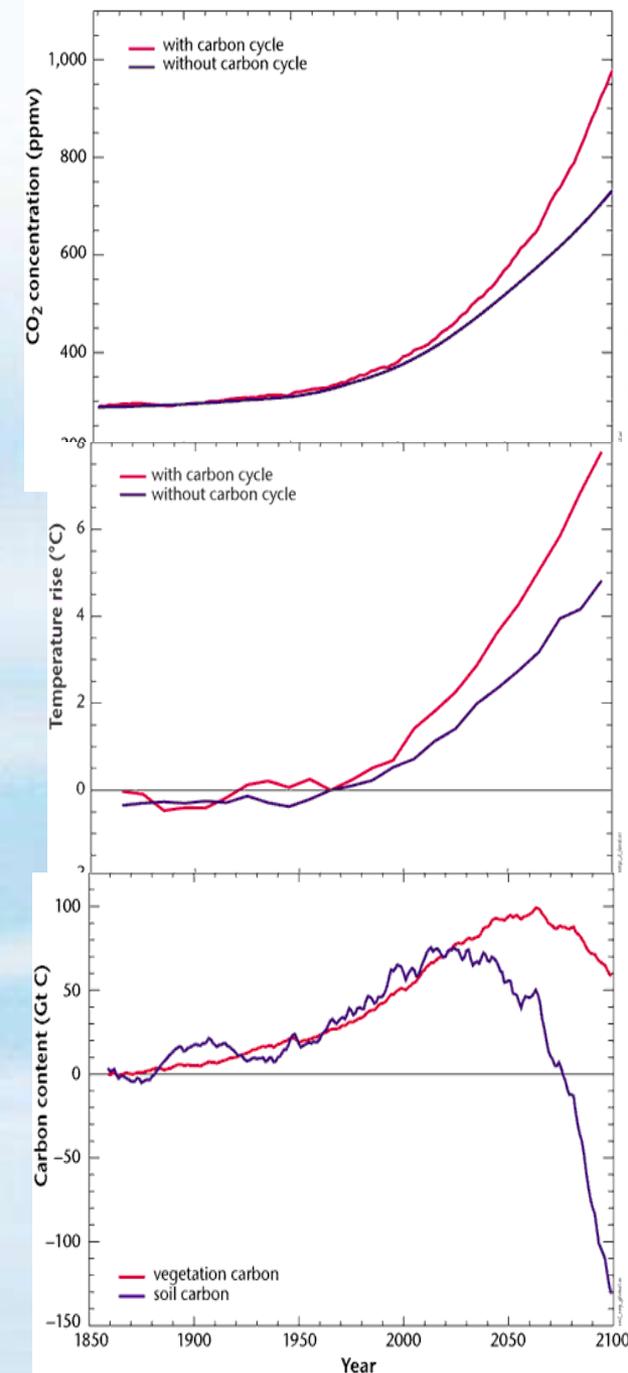
Sous l'effet d'un début de changement climatique, les écosystèmes continentaux (actuellement des puits) pourraient se transformer en source :

- les sols de forêts (par une augmentation de l'activité microbienne) ; végétation (par le stress hydrique)
- les pergélisols (partie du sol situé sous la surface qui ne dégèle pas pendant au moins 2 années consécutives, 25% des terres émergées) contiennent du méthane stocké sous forme d'hydrates solide qu'un début de réchauffement pourrait émettre de manière massive dans l'atmosphère

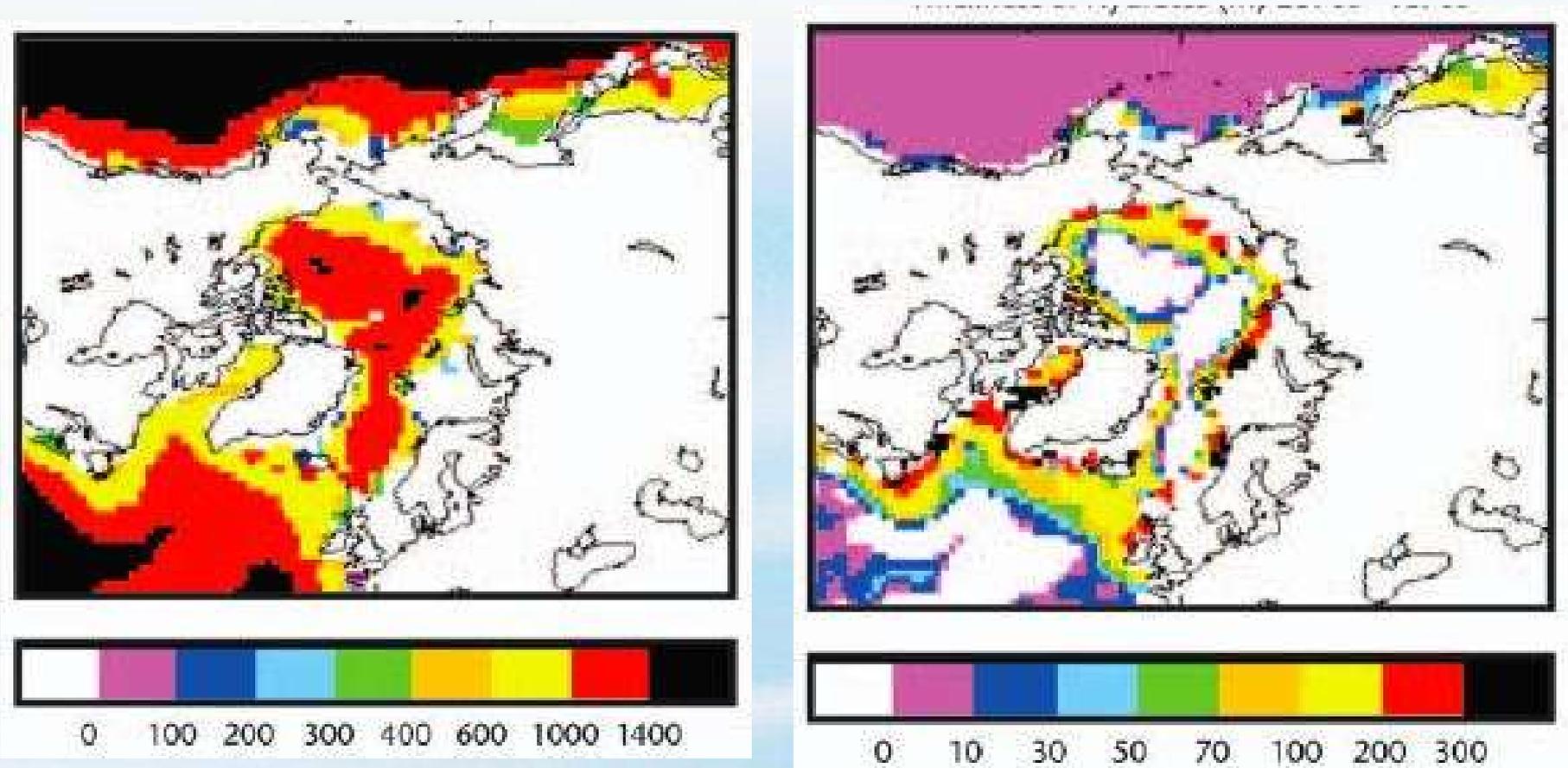
Les océans se transformeraient en source :

- les océans se stratifieraient, du fait de la fin des courants convectifs, ce qui mettra fin au renouvellement des eaux de surface, dans lesquelles se dissout le CO₂

Évolutions comparées sans et avec prise en compte du cycle du carbone. Le scénario de référence conduit à 720 ppmv de CO₂ en 2100 sous l'effet anthropique seul. (Hadley Centre, 2001)



Le phénomène peut «s'emballer» : déstockage des hydrates ?



Simulations des zones de stabilité des hydrates dans le climat actuel (à gauche) et avec le climat simulé de 2100. La zone géographique représentée est centrée sur le pôle (Hadley Centre, 2005)

Quels seront les impacts du changement climatique ? Conclusion...

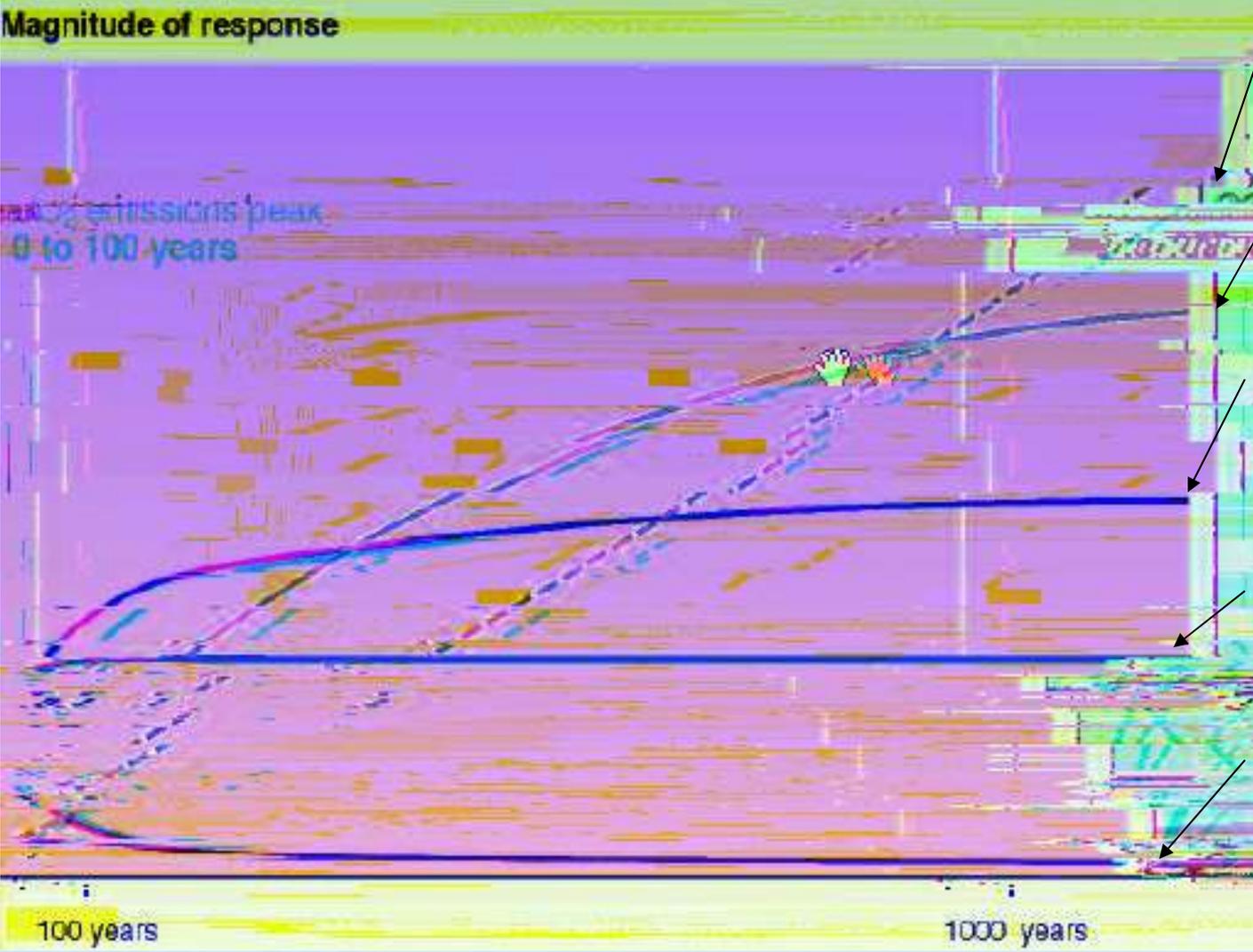
Compte tenu de notre connaissance nécessairement partielle des processus, on parle de **risques** de dommages, avec une probabilité plus ou moins élevée, qui dépendent en outre de notre comportement à venir, et non de conséquences certaines.

Attention à ne pas confondre conditionnels et futurs simples : tout ce qui est possible n'arrivera pas nécessairement, mais plus nous émettons, et plus le risque est sérieux

Attention aussi à ne pas confondre « ignorance » et « garantie qu'il ne se passera rien » ! L'ignorance, c'est juste l'ignorance, non une police d'assurance...

Attention aussi à ne pas raisonner à capacité de réaction constante : ce qui fait notre capacité de résistance à l'adversité aujourd'hui, c'est essentiellement l'abondance de l'énergie, et ce qu'il restera de cette abondance dans un siècle est un énorme point d'interrogation

Le processus est fondamentalement irréversible



Fonte des glaces (y compris calottes)

Dilatation de l'eau de surface des océans

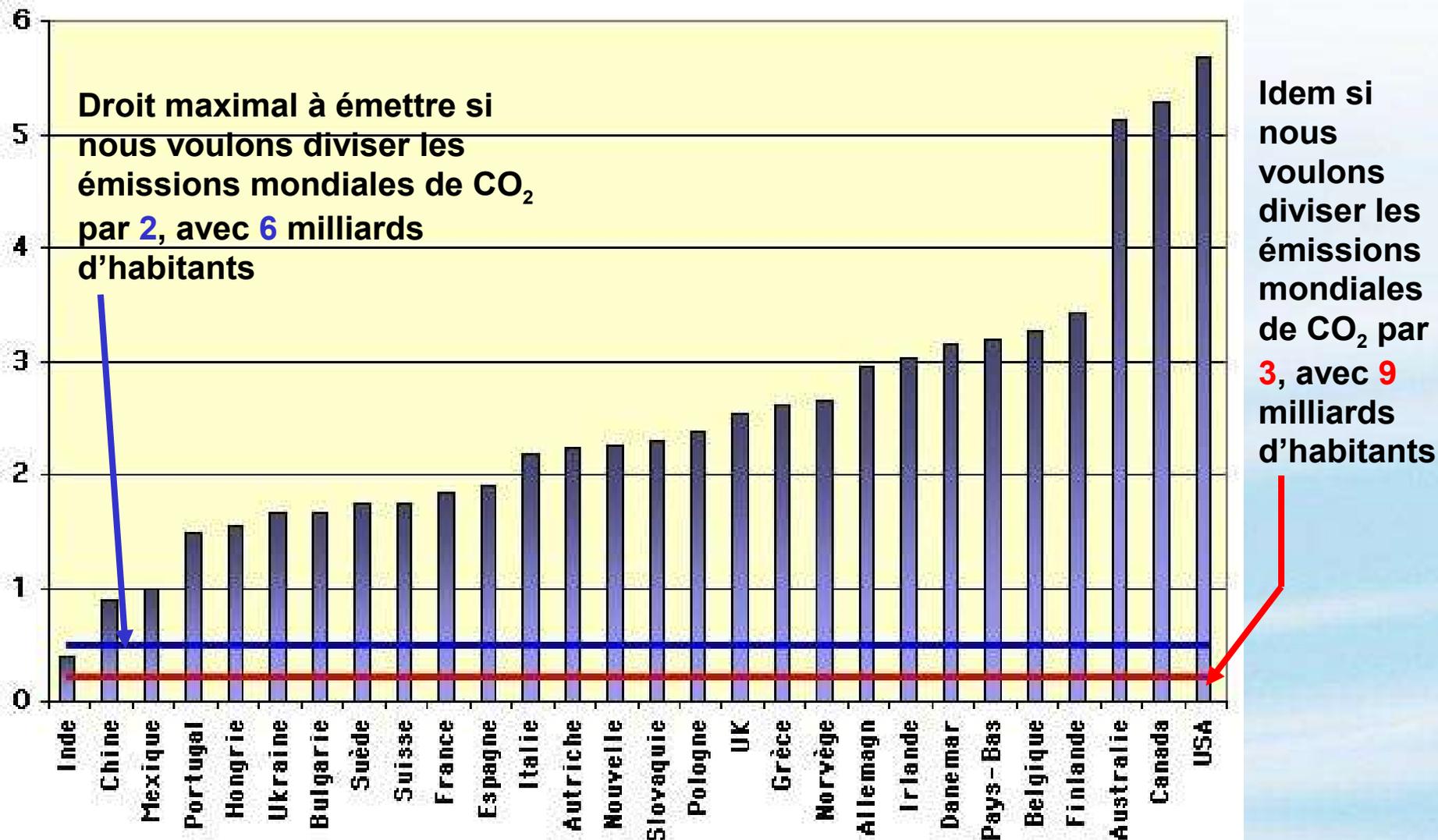
Évolution de la température moyenne

Évolution de la concentration en CO₂

Hypothèse : évolution des émissions de CO₂

Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

Qu'est-ce que le développement durable ?



Émissions de CO₂ par habitant en 1998 et « droits maximaux à émettre sans perturber le climat ». Source UNFCCC pour les émissions par habitant.

Que fait-on avec le « droit maximal » le plus élevé ?

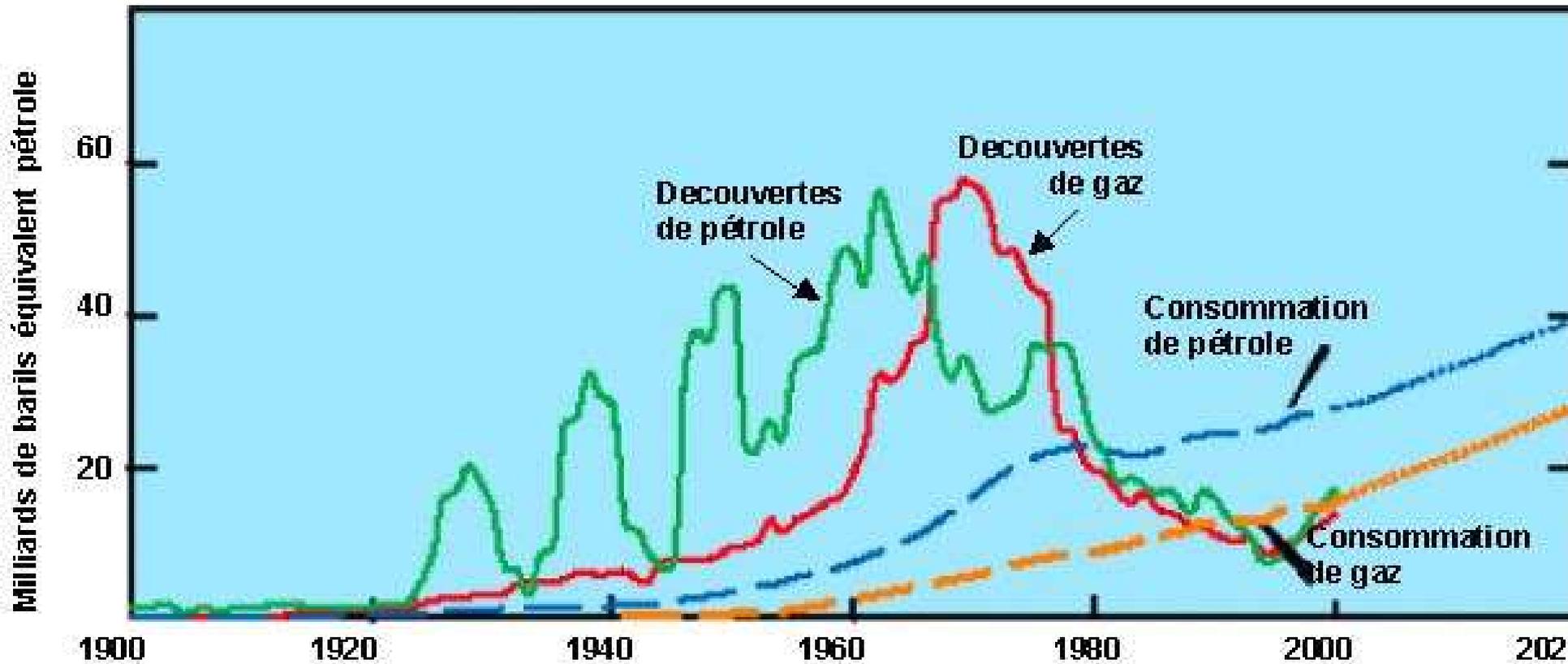
En l'état actuel des technologies, pour émettre ce «droit» il suffit de faire **l'une des choses suivantes** :

- faire un AR Paris-NY en avion,
- **ou** consommer 2.500 kWh d'électricité en Grande Bretagne, mais 22.000 kWh en France (consommation moyenne par Français : environ 7500 kWh),
- **ou** acheter 50 à 500 kg de produits manufacturés,
- **ou** produire 2 tonnes de ciment (une maison moderne de 100 m² en nécessite 10),
- **ou** parcourir 5.000 km en Twingo en zone urbaine, ou 1.500 km en 4x4 ou Mercedes en zone urbaine,
- **ou** brûler 1.000 m³ de gaz naturel (quelques mois de chauffage d'une maison).

Source : Jancovici, 2001

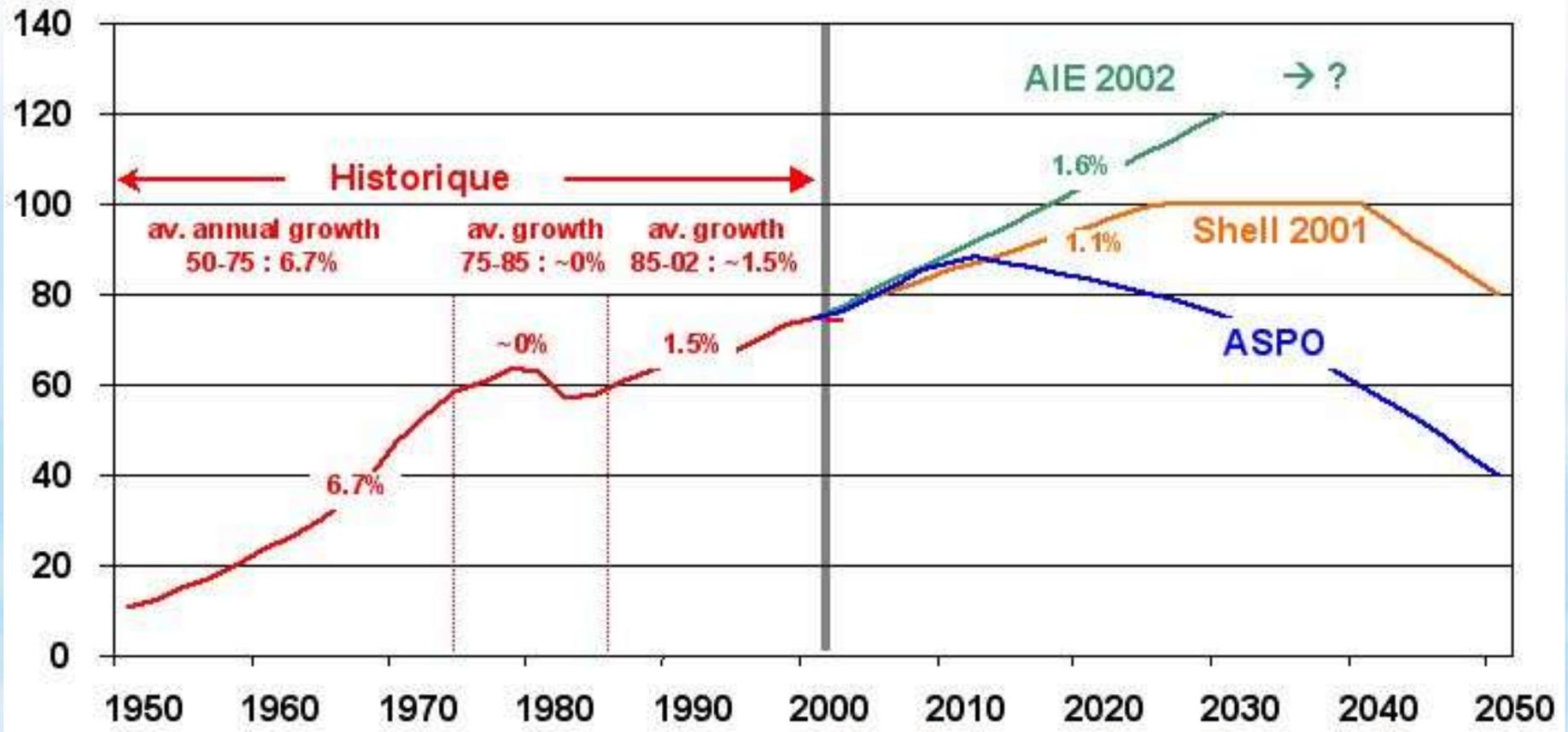
Sommes nous «loin» du pic de production des hydrocarbures?

Si les chiffres disponible pour les découvertes mondiales sont « justes », nous ne sommes peut-être plus très éloignés du « pic » de production des hydrocarbures conventionnels.



Source : Exxon Mobil, 2002

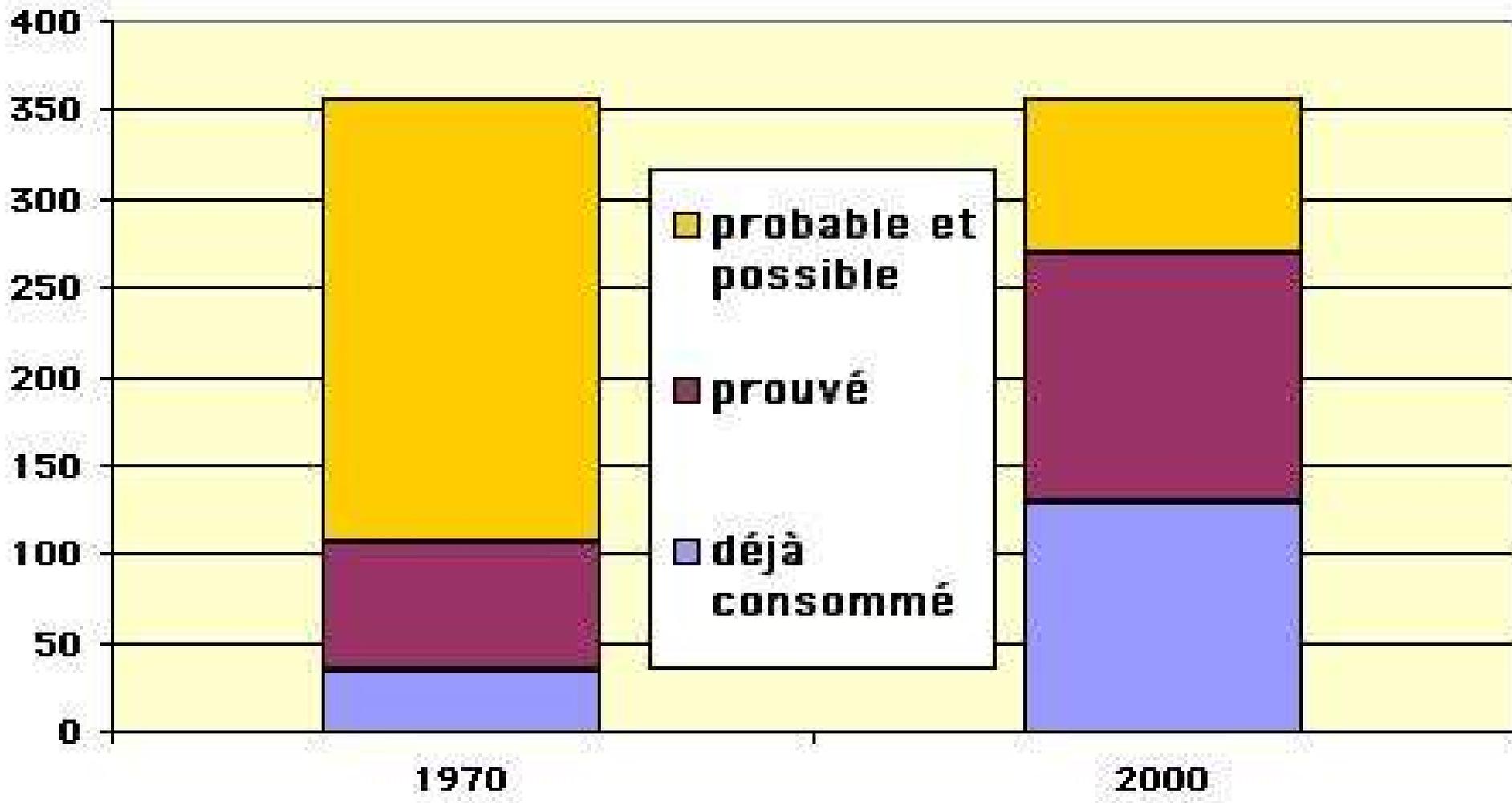
Une production pétrolière croissante pour combien de temps ?



Prédiction du maximum de la production pétrolière mondiale selon les sources. Le scénario de l'AIE, basé sur la simple prolongation de la demande, ne semble pas possible selon de nombreux opérateurs pétroliers.

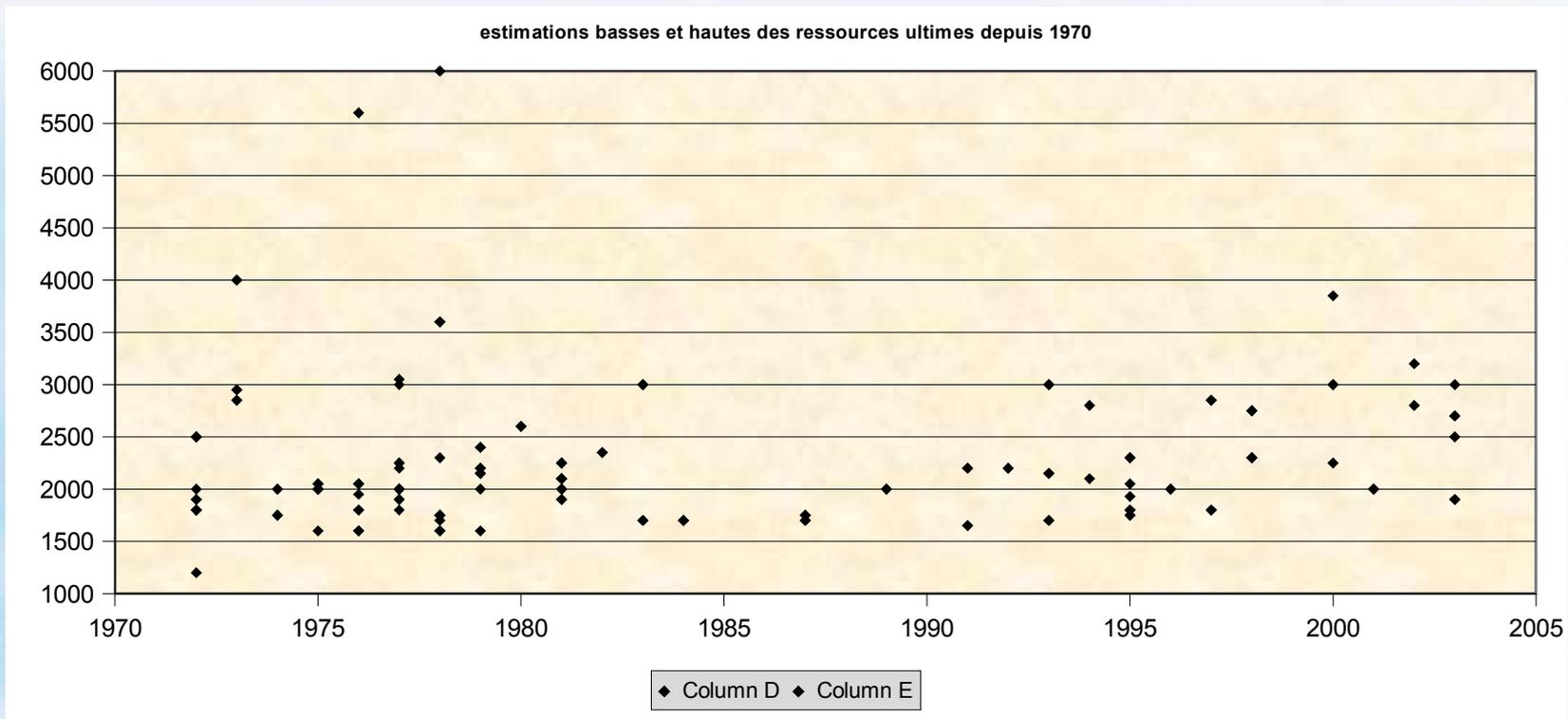
Source du transparent : Total, 2004

Sommes nous «loin» du pic de production des hydrocarbures? (bis)



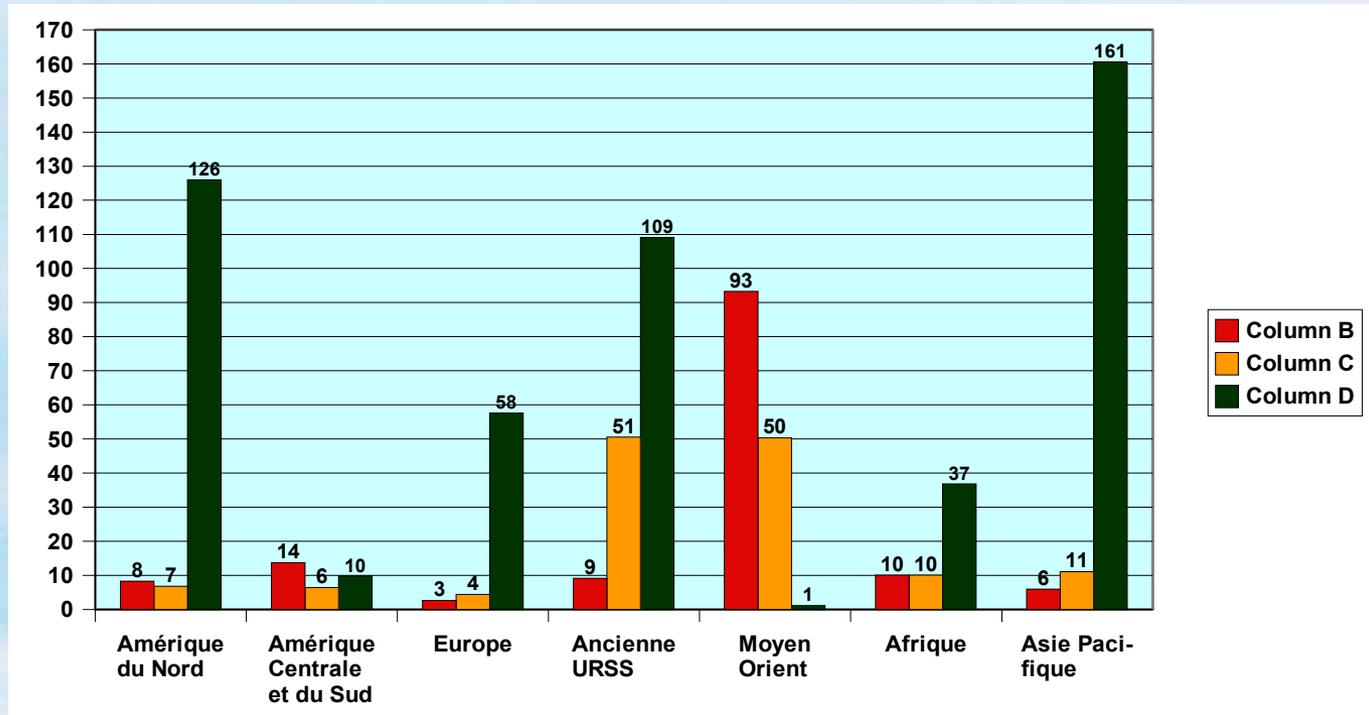
La réalité physique, c'est qu'il reste très peu de choses à découvrir !

Sommes nous «loin» du pic de production des hydrocarbures? (bis)



**La médiane des estimations sur les ressources ultimes est peu près stable depuis 30 ans.
Sources diverses**

Mais il n'y a pas que le pétrole !

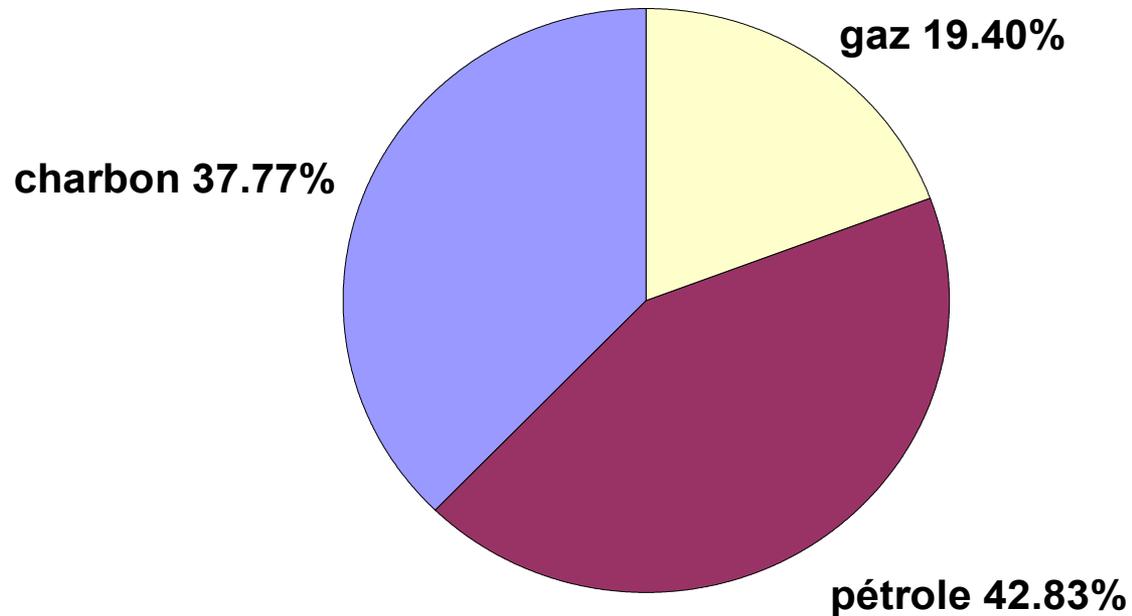


Réserves de combustible fossile par nature (Source : BP Statistical Review, juin 2002). Les USA possèdent les premières réserves mondiales de charbon, la Russie les premières de gaz et les deuxièmes de charbon : un rapport avec les tergiversation sur Kyoto ?

Le charbon continue à jouer un rôle majeur dans les émissions de CO₂

Source Agence Internationale de l'énergie

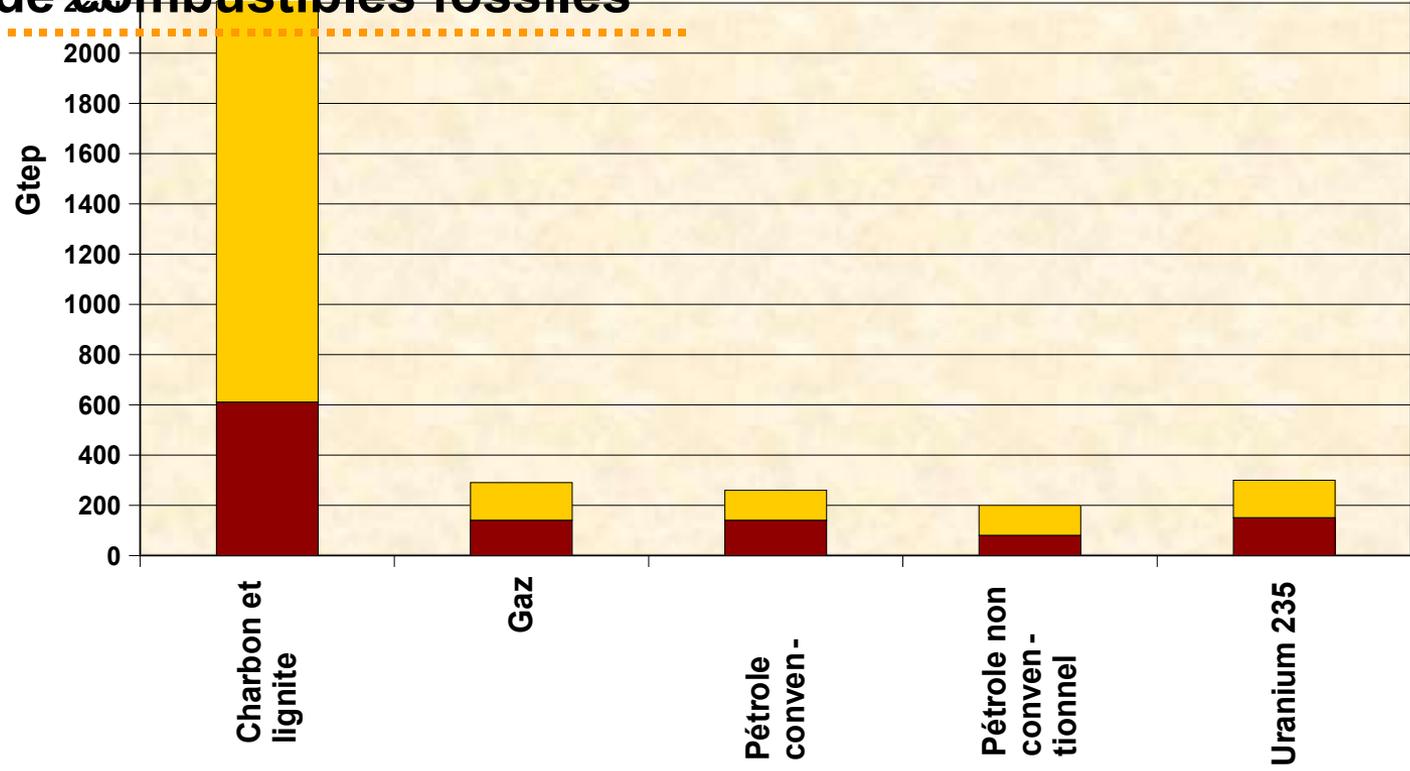
répartition des émissions mondiales de CO₂ en 2000 par énergie



Combien de temps le problème va-t-il se poser ?

Réserves de combustibles fossiles

1 Gtep = 1 milliard de tonnes équivalent pétrole. La consommation d'énergie annuelle de l'humanité en 2000 est d'environ 9 Gtep

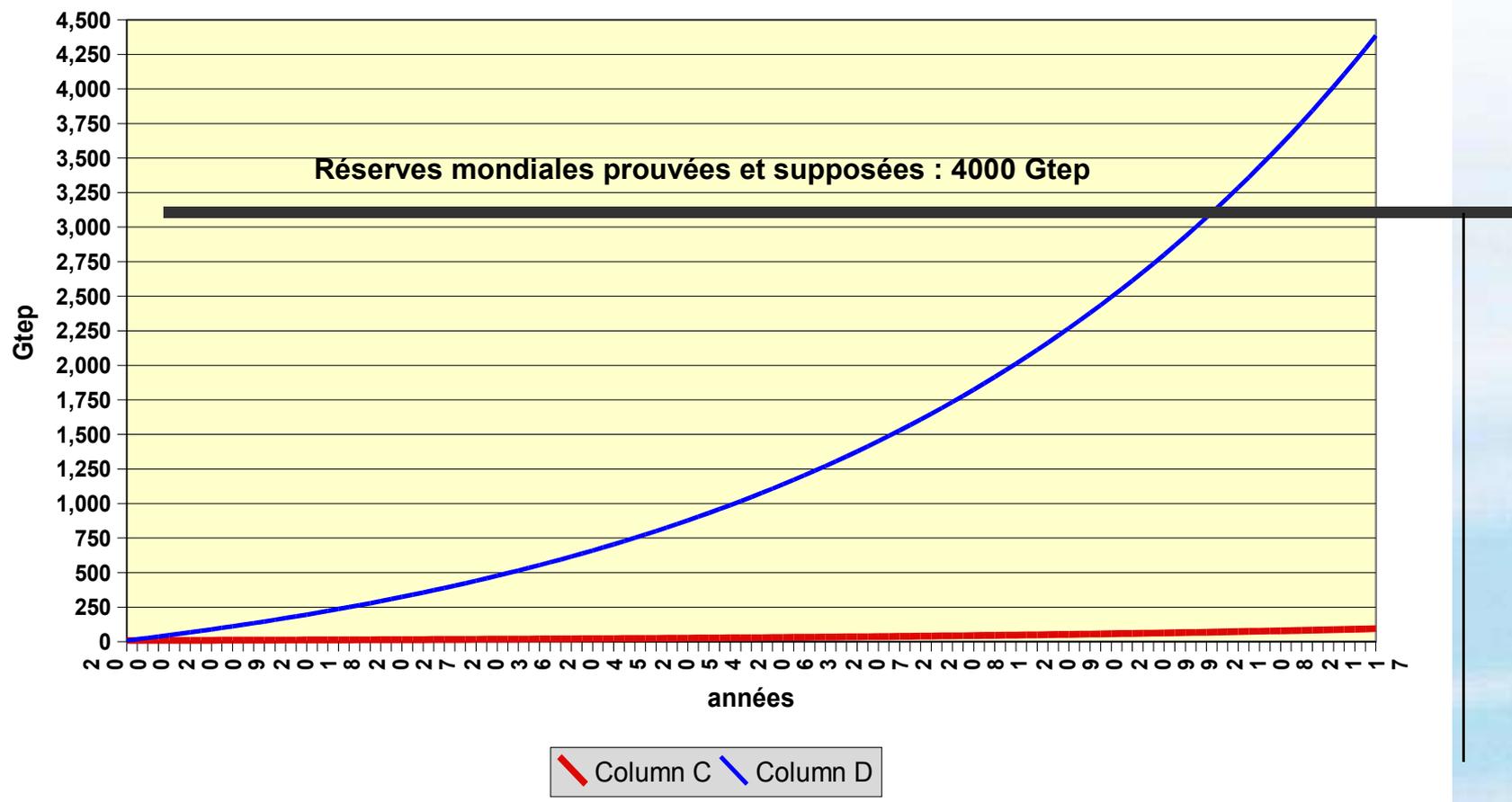


Column
Column

Total des réserves prouvées : 800 Gtep, avec les supposées 4000 Gtep. Source IFP

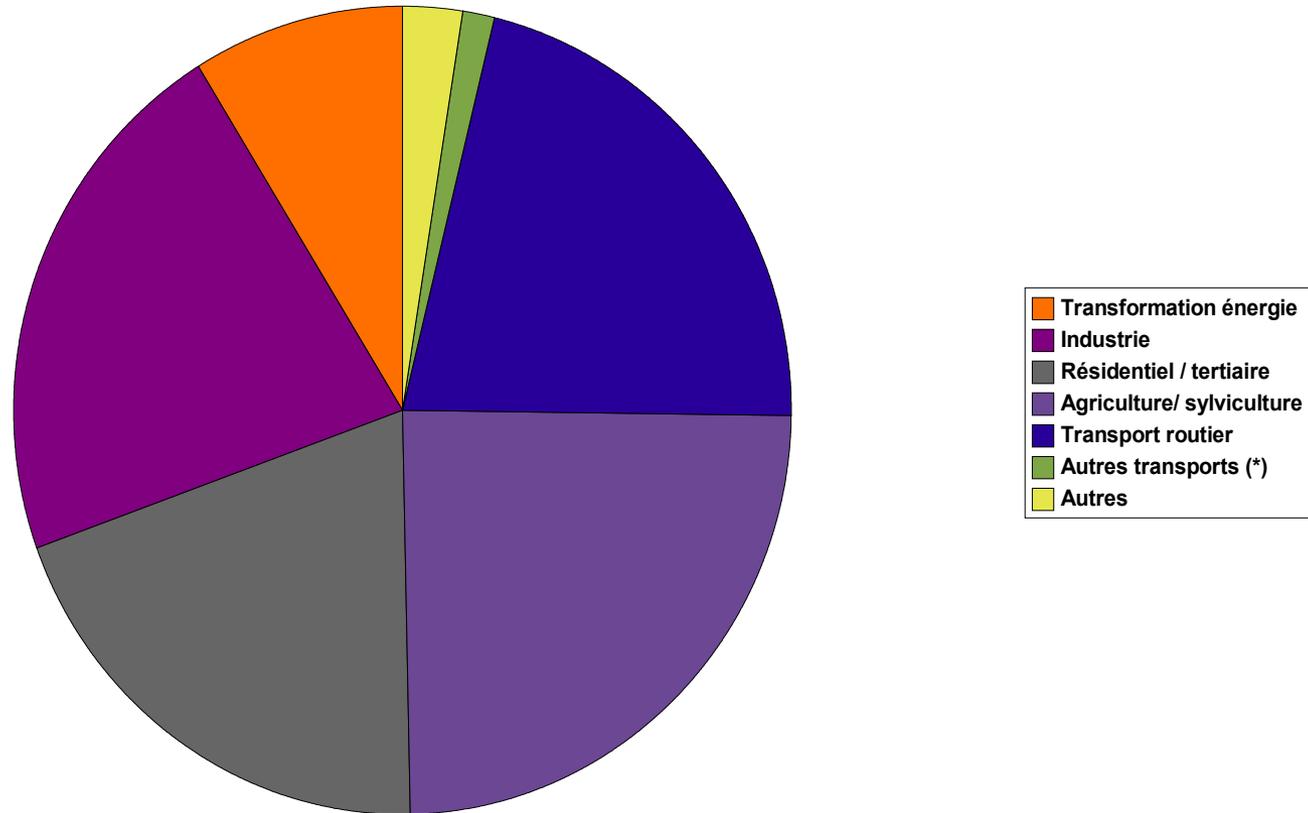
Un peu de prolongation tendancielle.....

Consommation mondiale d'énergie avec 2% de croissance par an



Avec 4000 Gtep, nous pouvons faire croître la consommation de 2% par an pendant un siècle ; en 2100 10 milliards de terriens peuvent alors consommer comme un Américain de l'an 2000 (8 tep par personne)...mais nous aurons épuisé toutes les réserves connues et supposées et la concentration atmosphérique en CO₂ aura dépassé 2000 ppmv.

Avec quoi émettons nous des gaz à effet de serre en France ?

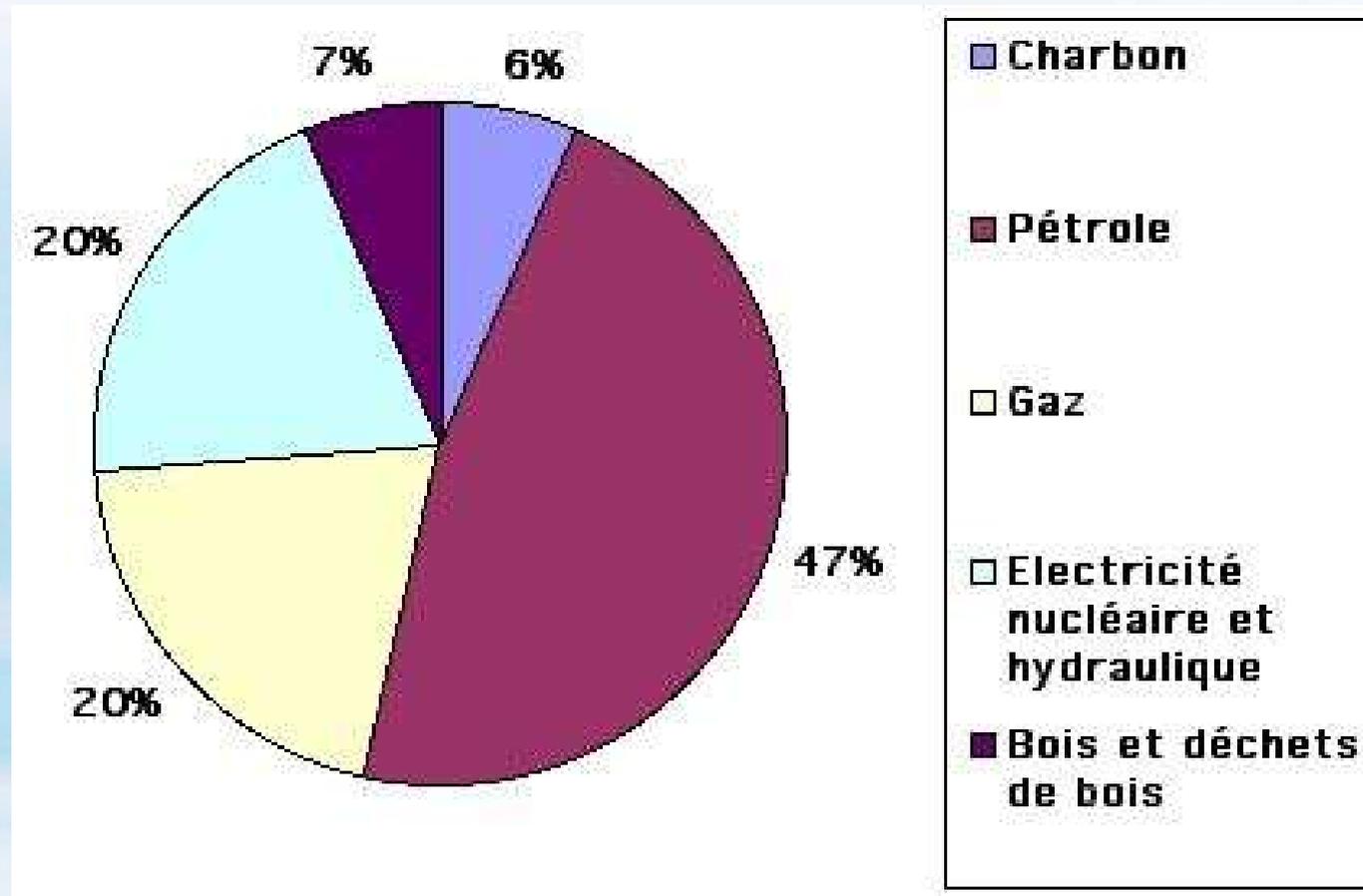


Répartition des émissions **brutes** françaises 2001 (tous gaz à effet de serre pris en compte) par secteur (source CITEPA)

(*) hors transports maritimes et aériens internationaux

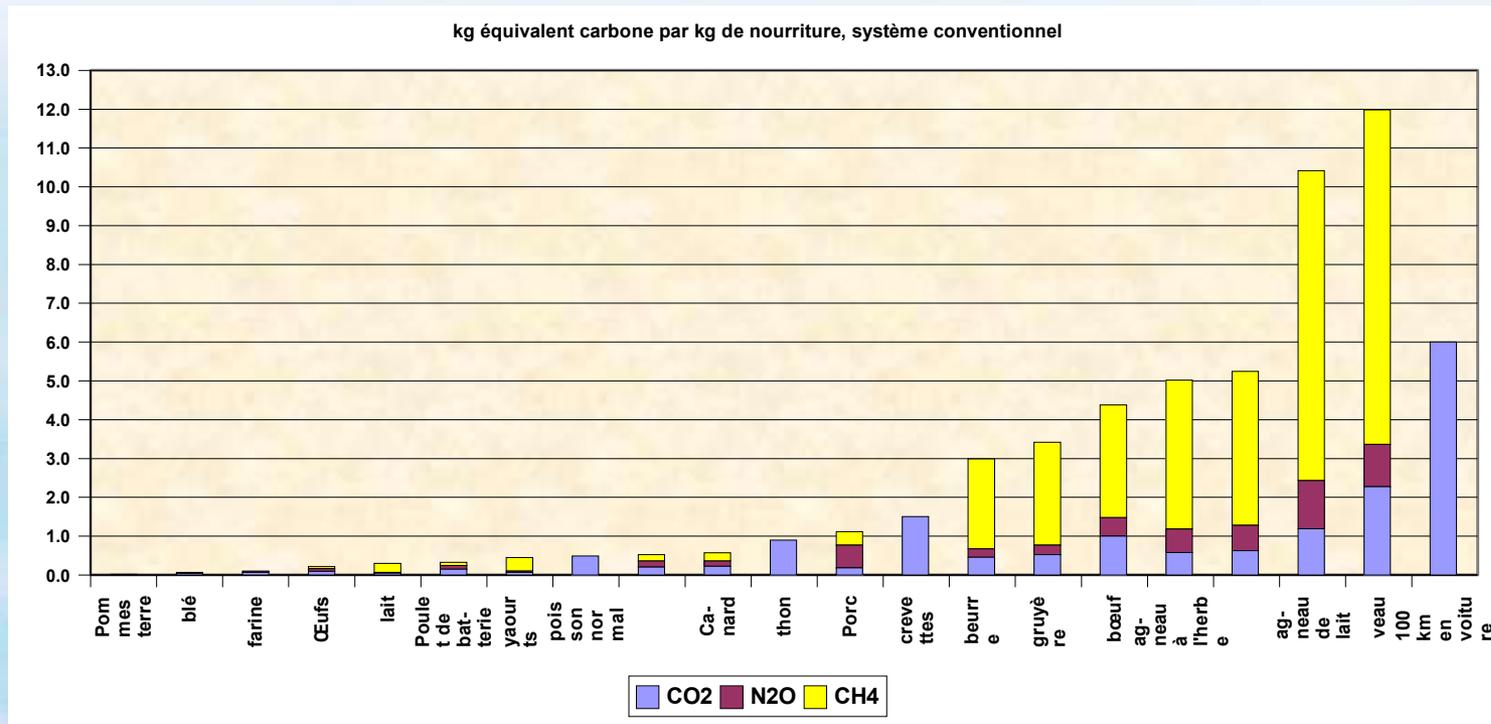
Et la France ?

Part de chaque énergie en France. Source Observatoire de l'énergie



Là où il y a des émissions de CO₂ en France, il y a surtout du gaz ou du pétrole

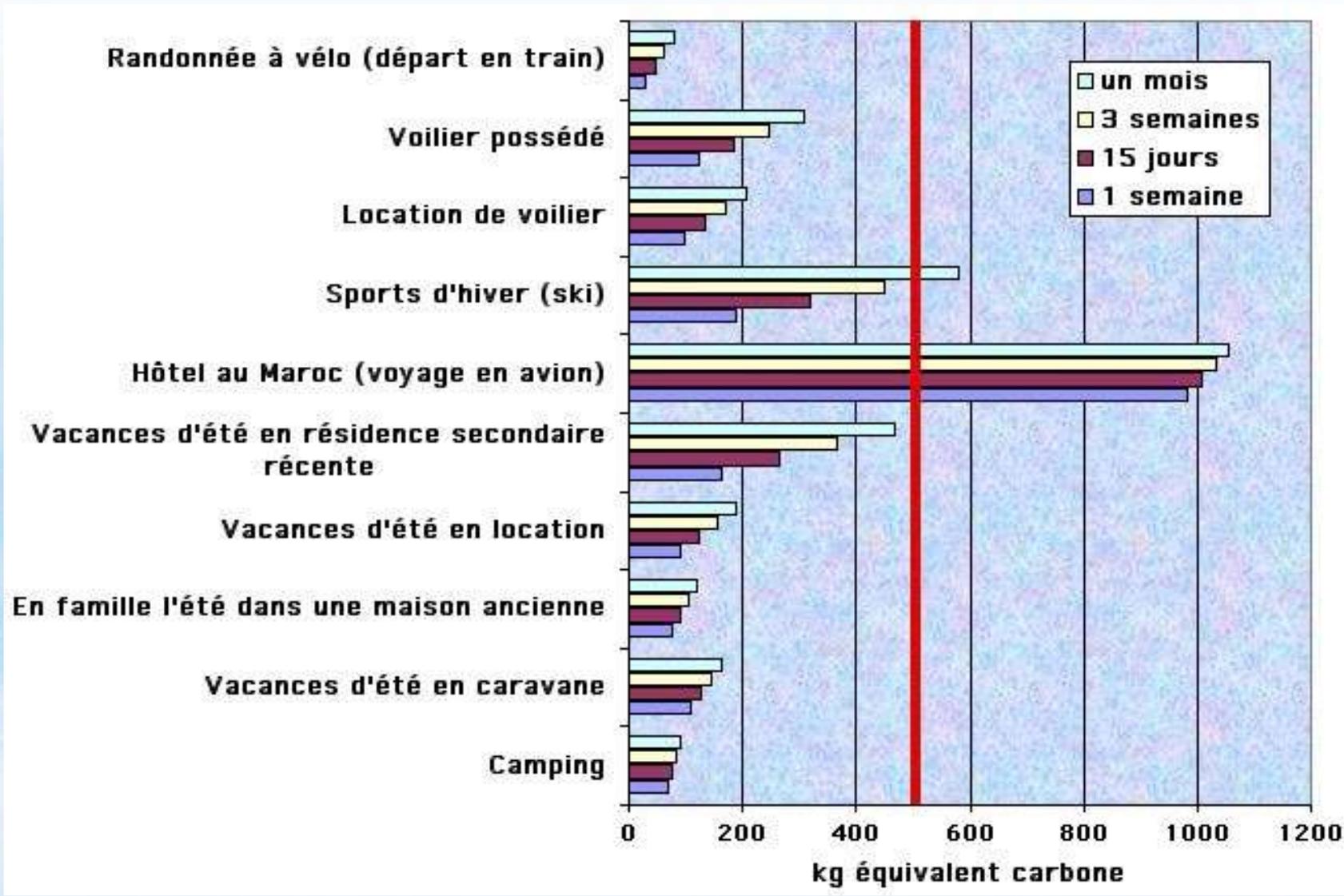
Les émissions agricoles sont très dépendantes de la production de viande



Kg équivalent carbone pour la production d'un kg de nourriture

Source : Jancovici/IFEN, 2004

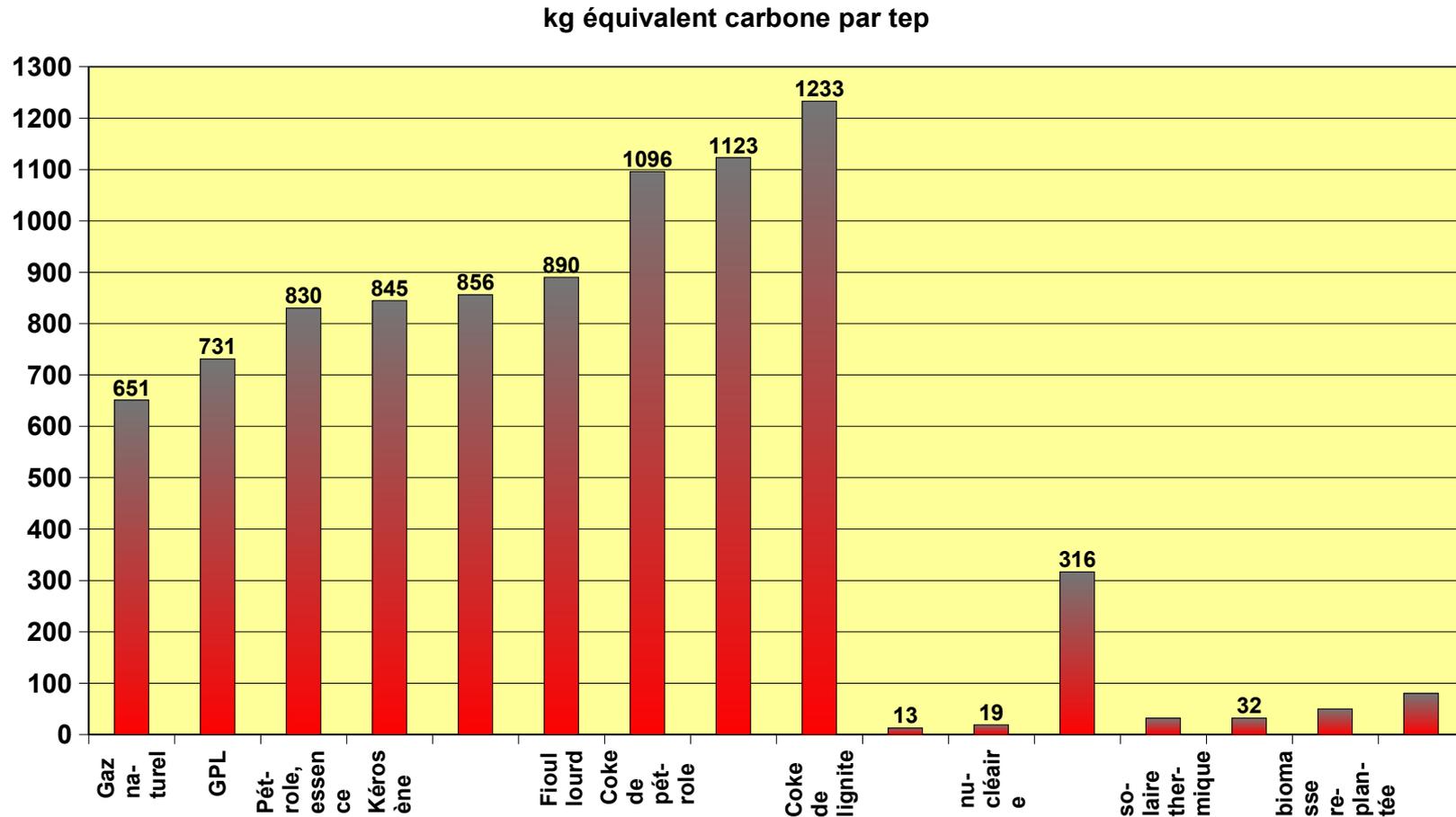
Il y a aussi des émissions dans le tourisme....



Emissions liées au séjour d'une famille de 4 personnes selon le type de tourisme. Source Jancovici, 2004

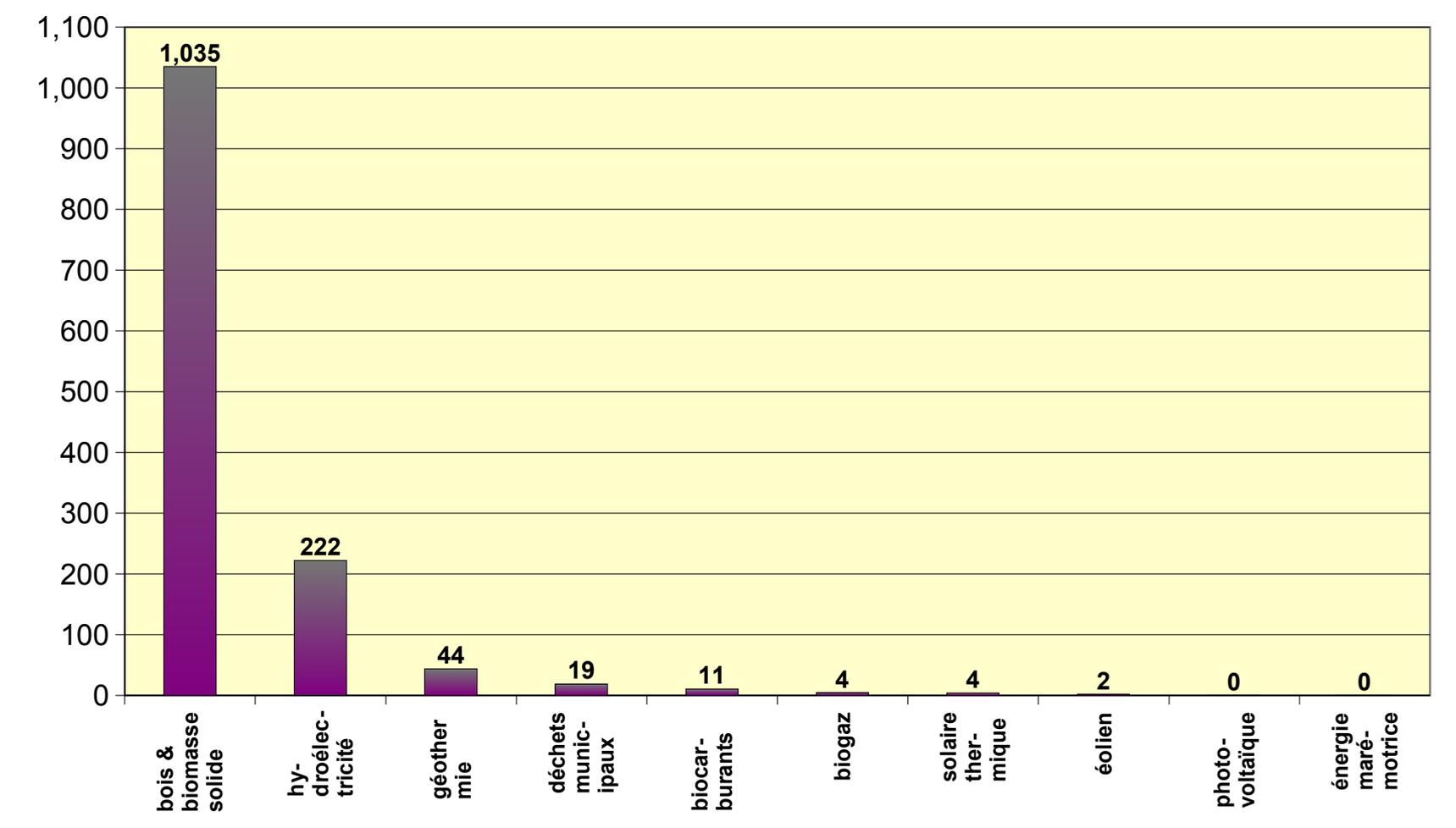
Quelles marges de manœuvre ?

Utiliser des énergies moins «carbonées»



Émissions de gaz à effet de serre engendrées par la consommation d'une tonne équivalent pétrole, selon la nature de l'énergie utilisée. Pour les énergies électriques nous avons pris l'équivalence énergie finale

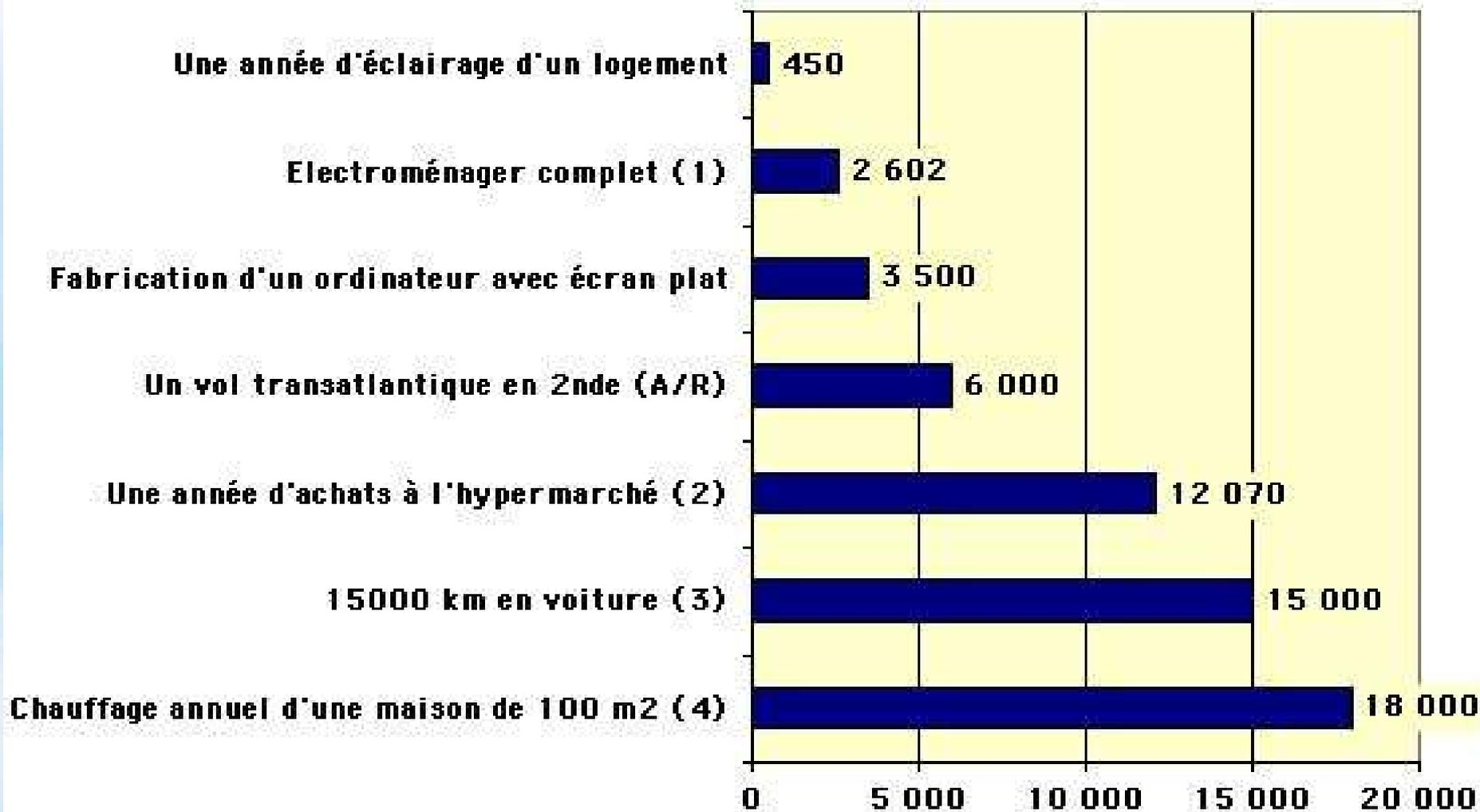
Peut-on utiliser des énergies renouvelables ?



Contribution des énergies renouvelables hors bois au bilan énergétique mondial

Quelles marges de manœuvre ?

Les économies significatives ne concernent pas que l'électricité



Consommation annuelle par usage en kWh. Sources diverses

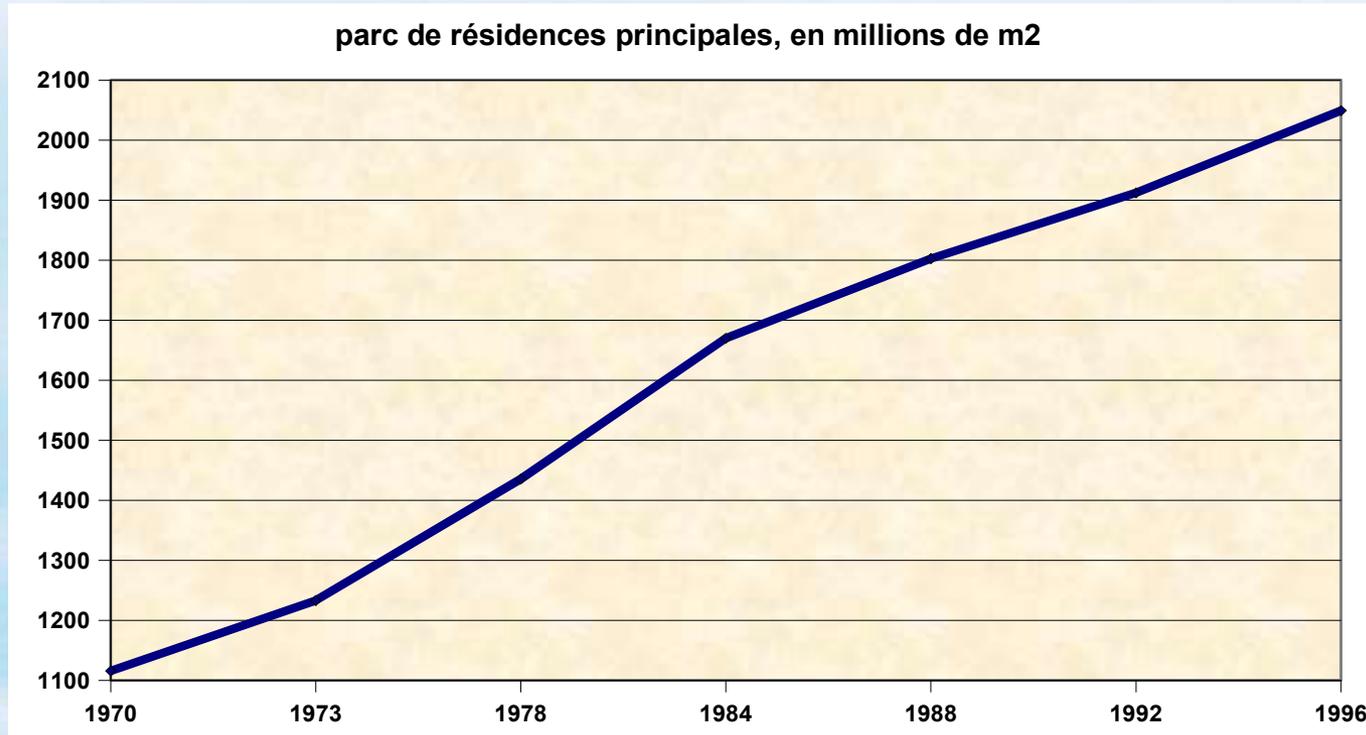
Quelles marges de manœuvre ?

Diminuer la consommation d'énergie...et ne plus l'augmenter !

France	kep/habitant moyenne 1995	kep/habitant meilleure techno disponible	Commentaires	kg C/habitant meilleure techno disponible (+)
Habitat	845	360		170
dont confort thermique (1)	740	300	ens. du parc aux normes meilleures	170
dont électroménager	35	25	équipements optimisés	-
dont produits bruns	70	35	systèmes de	-
Tertiaire	505	250		100
dont confort thermique	415	200	normes que	100
dont usages spécifiques	90	50	optimisation vieilles	-
Alimentation	360	250	50% de gains sur froid et	130
Industrie	775	580		270
dont production intermédiaire	625	450	eco-production & recyclage	190
dont biens d'équipement & conso	150	130	-	80
Transports (4)	805	450		400
dont personnes	490	250	voitures 4 l/100 < 13 000	230
dont marchandises	315	200	produits à puissance	180
TOTAL	3290	1890	-	1070 (*)

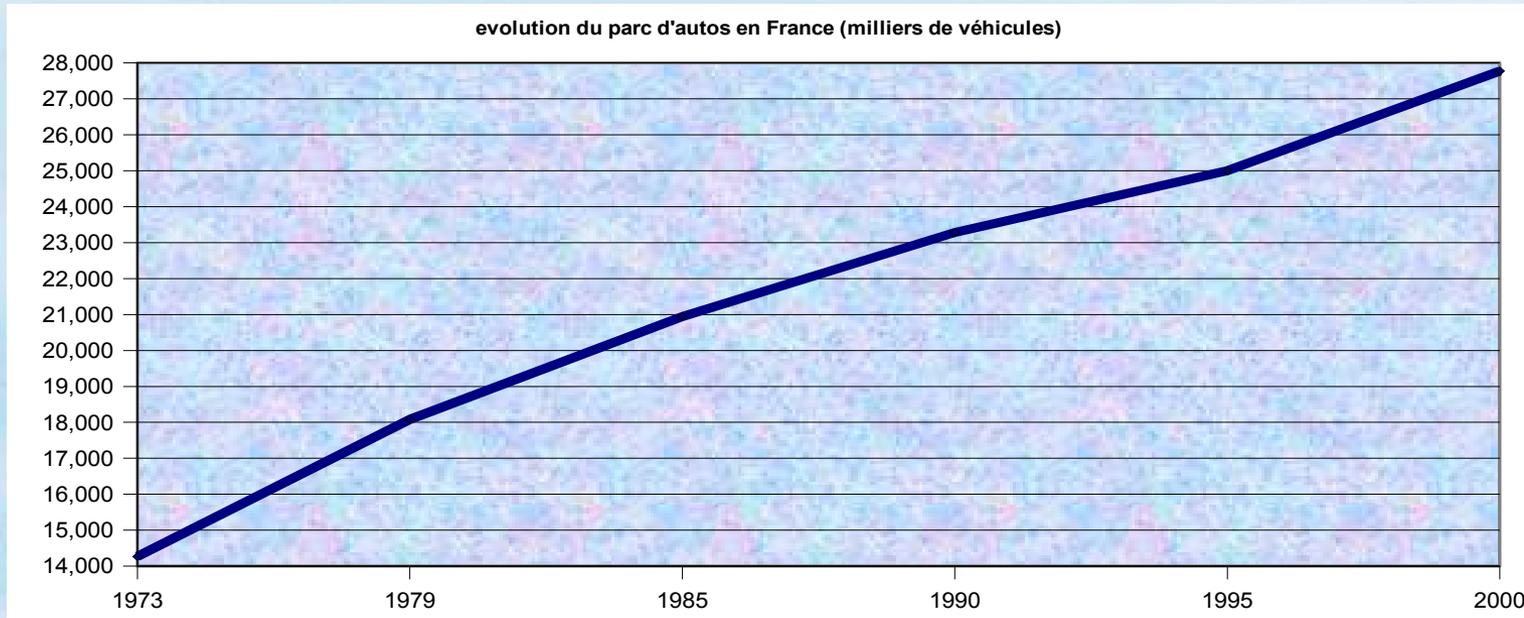
Consommations par usages et réductions possibles d'origine purement technique. Source : Commissariat général du Plan

Les économies d'énergie : les effets parcs annulent les gains unitaires



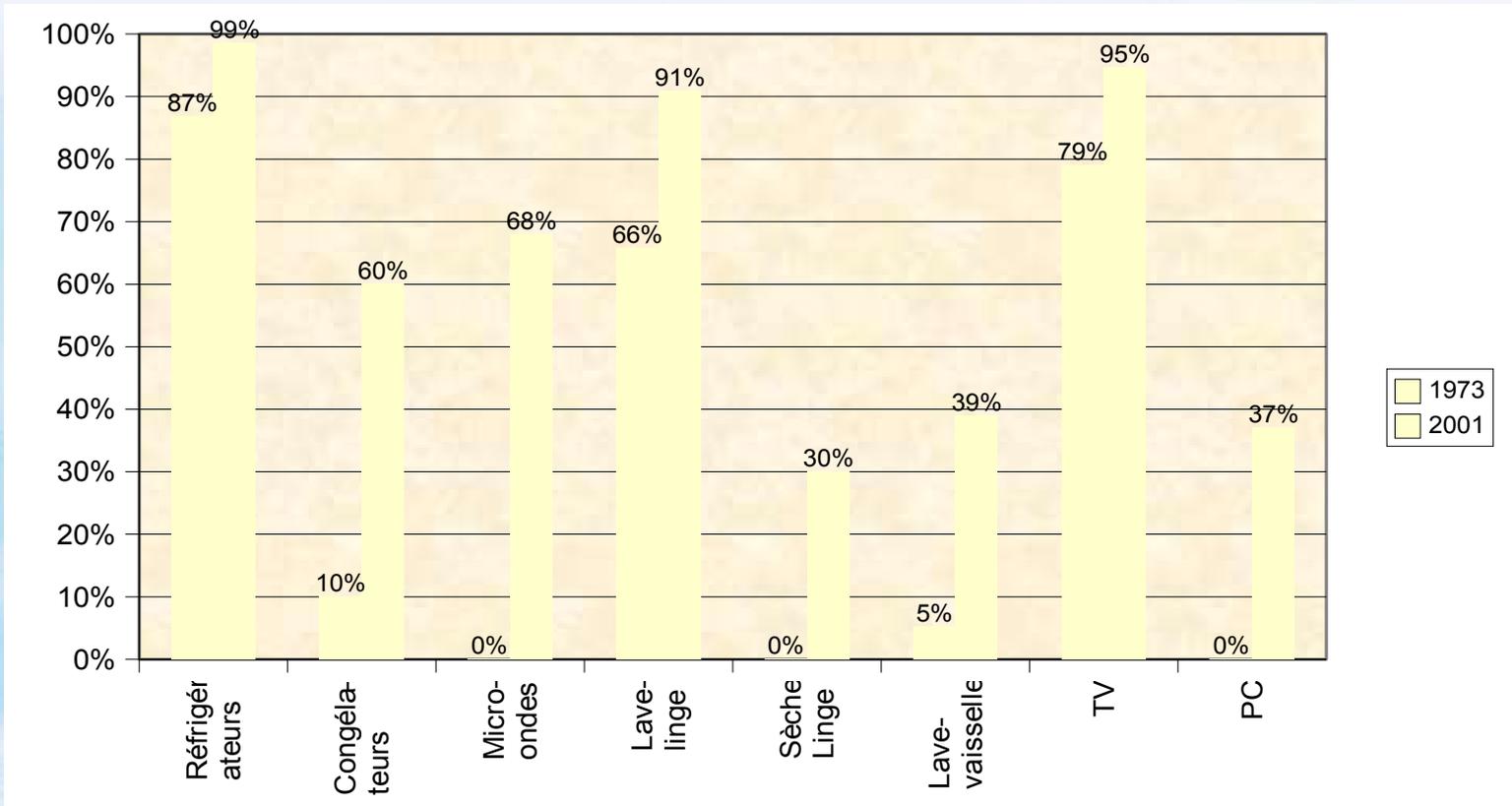
**Evolution de la surface construite (donc chauffée) entre 1970 et 1996.
Source CIPP, 1998, et INSEE, in Traisnel, 2000**

Les économies d'énergie : les effets parcs annulent les gains unitaires



**Le parc auto a quasiment doublé entre 1973 et 2000, malgré 3 chocs pétroliers.
Source observatoire de l'énergie**

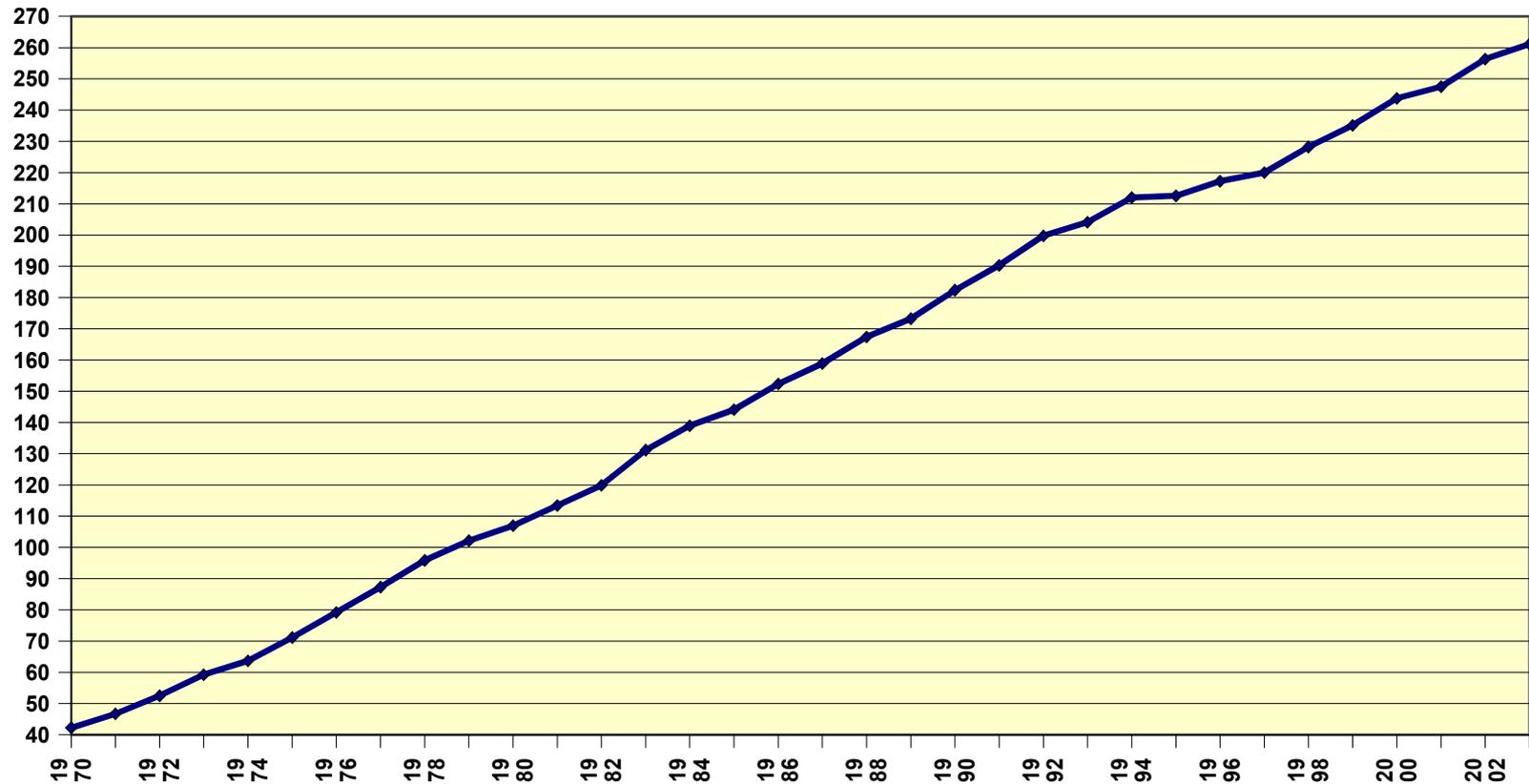
Les économies d'énergie : les effets parcs annulent les gains unitaires



Evolution des taux d'équipement des ménages français. Source Observatoire de l'Énergie.

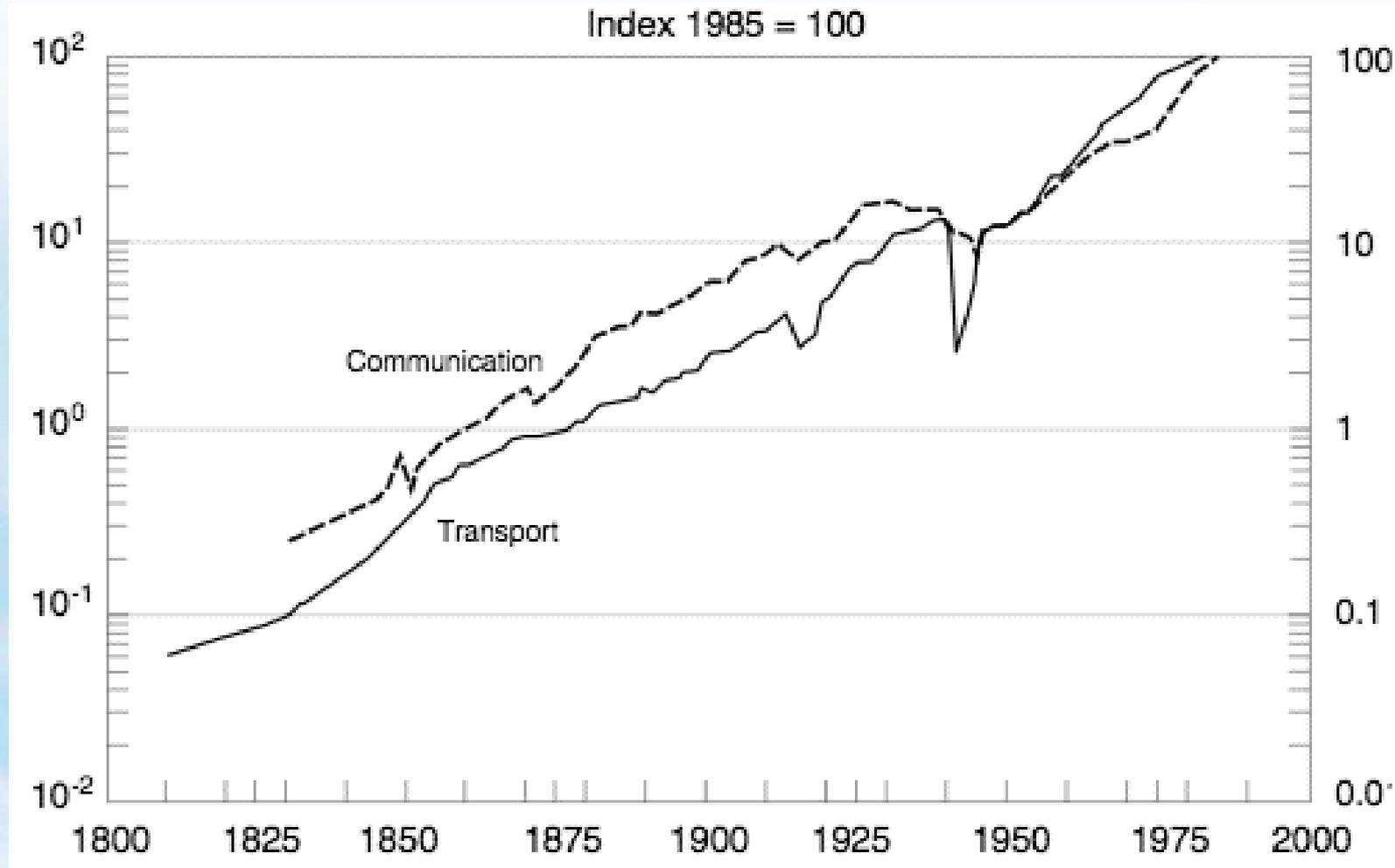
En conclusion, la consommation ne diminue pas du tout !

consommation d'électricité résidentiel tertiaire, corrigé du climat (TWh)



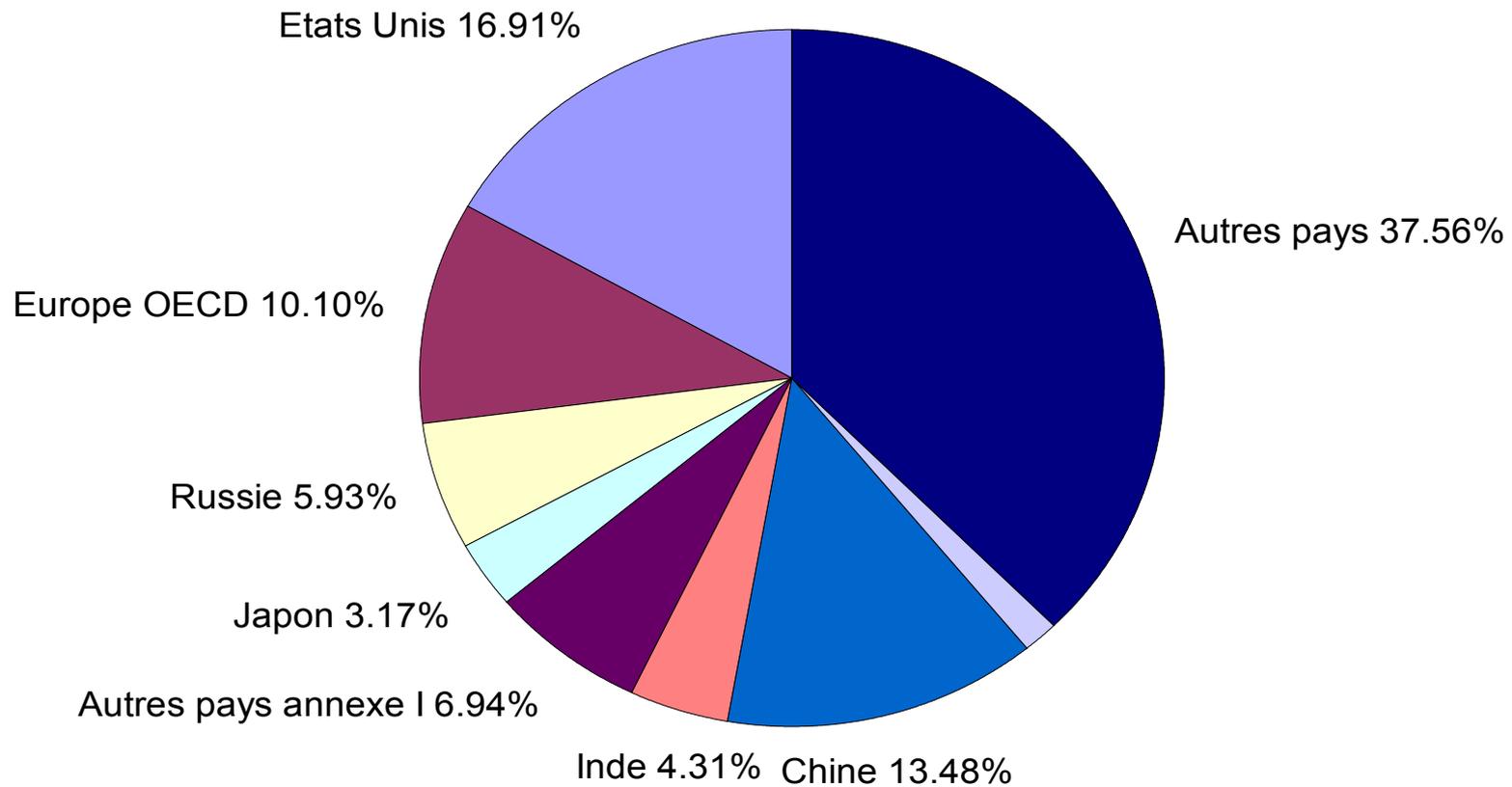
La consommation d'électricité dans les bâtiments (le chauffage ne fait que 70 TWh) croit fortement. Source Observatoire de l'Énergie.

Suffit-il de « dématérialiser » l'économie ?



Jusqu'à maintenant, la circulation accrue des informations n'a pas empêché l'augmentation parallèle des flux physiques (source : Source : Arnulf GRÜBLER, the Rise and Fall of Infrastructures, 1990) . **Un employé du tertiaire de 2004** (un employé de banque, de la sécu, d'une mairie, un agent de France Telecom...) **consomme presque autant d'énergie, pour son seul travail, qu'un Français de 1960 pour tous ses usages.**

Presque tous les pays contribuant significativement au changement climatique sont des démocraties



Répartition approximative par pays des émissions de gaz à effet de serre en 2000.
Sources primaires : UNFCCC, WRI, adapté par l'auteur

La démocratie n'est pas la voix de la sagesse, mais celle de la majorité

Quelques « erreurs » classiques de « ceux qui savent » :

→ Raisonner comme si tout élu « savait » aussi. Mais les votes à l'Assemblée et au Sénat (et les décrets des ministères, et les arrêtés des préfets...) sont faits par des gens qui, pour l'essentiel, n'ont pas de connaissances « supérieures à la moyenne » en matière climatique

→ Raisonner comme si tout électeur « savait » aussi....

→ Imaginer que la diffusion de l'information est une affaire simple ou secondaire une fois que «quelqu'un » sait. C'est peut-être vrai pour les aventures extra-conjugales du Prince Charles ; c'est plus discutable pour un dossier comme celui du changement climatique.

Les élus ne sont pas chargés d'être visionnaires, mais juste mandataires

- le cahier des charges de l'élu ne lui dicte pas d'être plus audacieux que l'état général de l'opinion, mais conforme à cette dernière. Il peut néanmoins anticiper quelques évolutions, mais à court terme.
- L'élu ne sait pas résoudre nos contradictions à notre place. Comment lui reprocher de mal gérer des demandes antagonistes ?
- La maîtrise du changement climatique nécessite des éléments qui, actuellement, ne sont pas compatibles avec les souhaits de la majorité de la population
- L'action actuelle des représentants des démocraties, qui semble très timide à «ceux qui savent», est donc assez logique si nous réalisons que les demandes de la majorité de la population sont globalement contradictoires.
- Ce qui peut changer la hiérarchie de nos demandes, c'est l'information dont nous disposons.
- Il n'y a donc pas de réflexion possible sur l'action future en démocratie sans réflexion sur la manière dont l'information se diffuse

Les media sont (hélas ou heureusement ?) incontournables

Nature du moyen de communication	Population touchée
Conférence d'un spécialiste, 1 fois par semaine, à 100 personnes en moyenne, pendant 40 ans	40 (ans)*46 (semaines par an)*100 (personnes par conférence) = 180.000 personnes environ
Ecriture d'un livre sur le climat	Quelques milliers de lecteurs
Réalisation d'un site Internet sur le climat	Quelques centaines de milliers de visites par an ; mais quel nombre réel d'internautes ? Le dixième ?
Journal de 20h d'une grande chaîne nationale	5 à 10 millions de personnes tous les jours
Un exemplaire de quotidien	Quelques millions de personnes par jour : l'Equipe (2,5 millions de lecteurs quotidiens), Ouest France (2,2 millions), Le Monde (2,2 millions), Le Parisien (2 millions avec la diffusion de Aujourd'hui en France) ...

Le 20 heures de TF1 touche en une soirée autant de monde que 2000 ans de conférences hebdomadaires....

Pas encore écoeuré ?

**Tous les transparents projetés, et bien d'autres, peuvent se retrouver
sur**

www.manicore.com