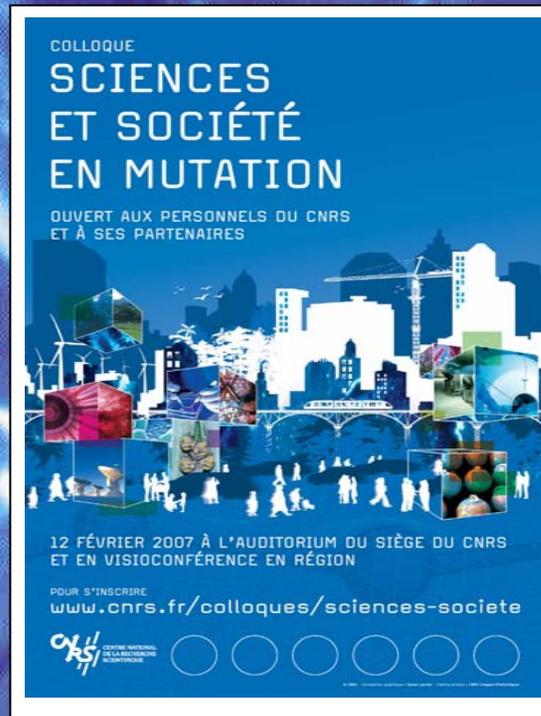


# L'aval du cycle électronucléaire et quelques autres questions qui nous sont posées.



## L'énergie Le climat

Jean-Claude LE SCORNET Institut de Physique Nucléaire d'Orsay  
École des Accélérateurs IN2P3 La Londe des Maures Novembre 2007

# Bibliographie

## *Le nucléaire expliqué par des physiciens.*

par des physiciens du CEA  
sous le direction de P. Bonche  
Édition EDP sciences 2002

## *L'énergie dans le monde: Bilan et perspectives*

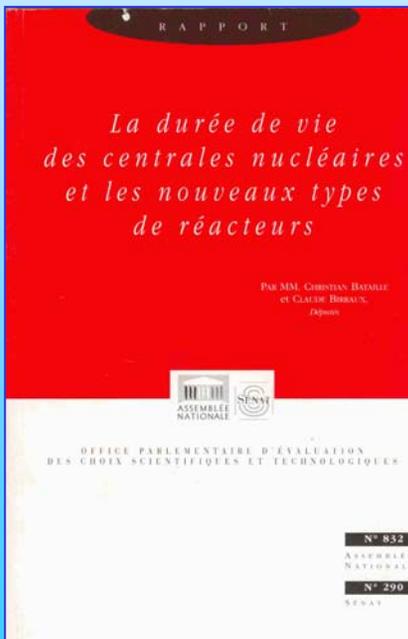
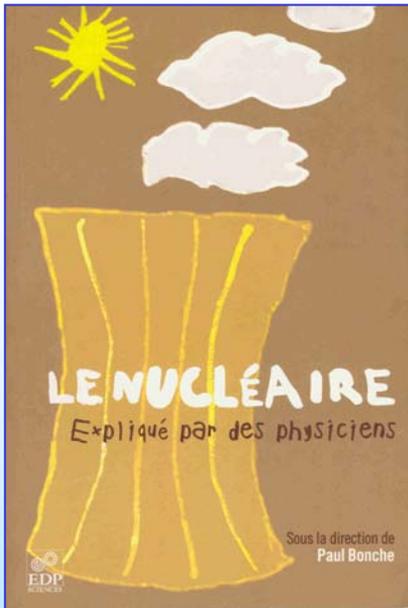
par des physiciens du CNRS  
JL Bobin, H. Nifenecker, C. Stéphan.  
Edition EDP Sciences 2001

## *La durée de vie des centrales nucléaires et les nouveaux types de réacteurs*

Rapport de C. Bataille et C. Birraux  
Office Parlementaire d'évaluation des choix  
scientifiques et technologiques 2003  
N° 832 Assemblée Nationale, N° 290 Sénat

## *Le rapport du GIEC synthétisé pour les non spécialistes*

[www.greenfacts.org/climate-change/giec/giec.htm](http://www.greenfacts.org/climate-change/giec/giec.htm)

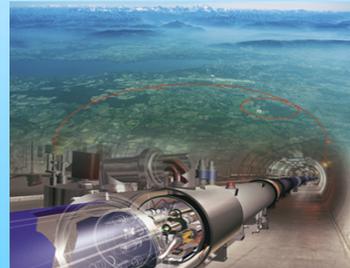


# Des accélérateurs pour la recherche ...

Recherche	Méthodes	Accélérateurs
Physique des particules	Collisions	Synchrotrons, collisionneurs protons/électrons
Physique nucléaire	Collisions noyau-noyau	Accélérateurs d'ions lourds: Synchrotron, Cyclotron, Tandem , Linac
Physique atomique	Collisions atomiques	
Matière condensée	Diffraction de rayon X	Rayonnement synchrotron
	Diffusion de neutrons	Linac à protons
Biologie, chimie	Cristallographie protéines, virus	Rayonnement synchrotron
Physique des matériaux	Activation, spectrométrie de masse	Van de Graaf Tandem



Alice 1969

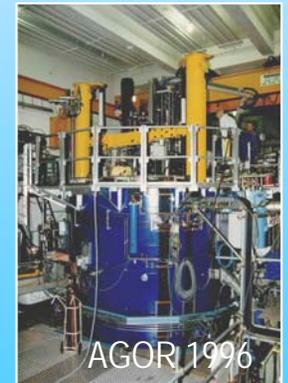
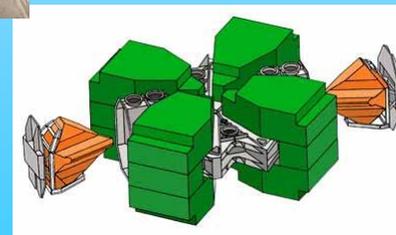


LHC 2008



Soleil 2006

GANIL 1994



AGOR 1996

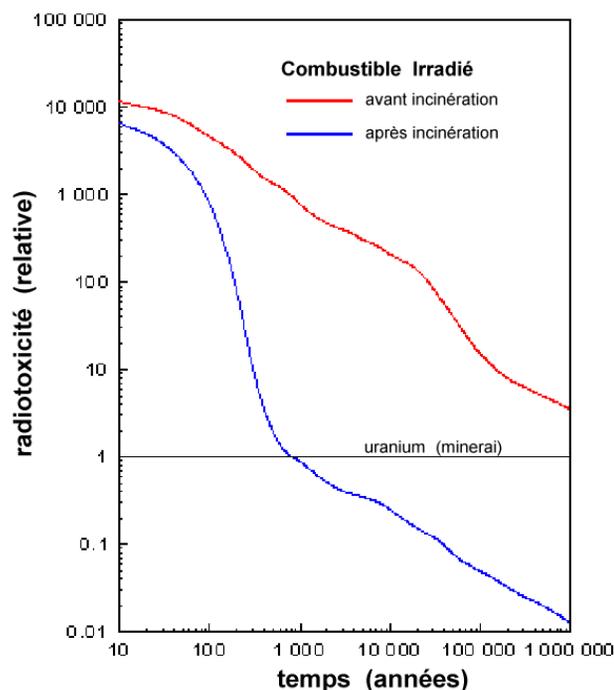
# ... et pour de tous autres usages ...

Domaine	Méthodes	Buts
Recherche	Faisceaux énergétiques de particules	Exploration de la matière
Médecine	Production de radio-isotopes	Imagerie, scintigraphies, traceurs
	Irradiations: X,gamma,protons, électrons,ions lourds	Radiothérapie anti-tumorale
Métallurgie	Faisceaux d'électrons	Soudures
Agroalimentaire	Irradiation des aliments	Stérilisation des germes
Archéologie	Spectrométrie de masse	Datation



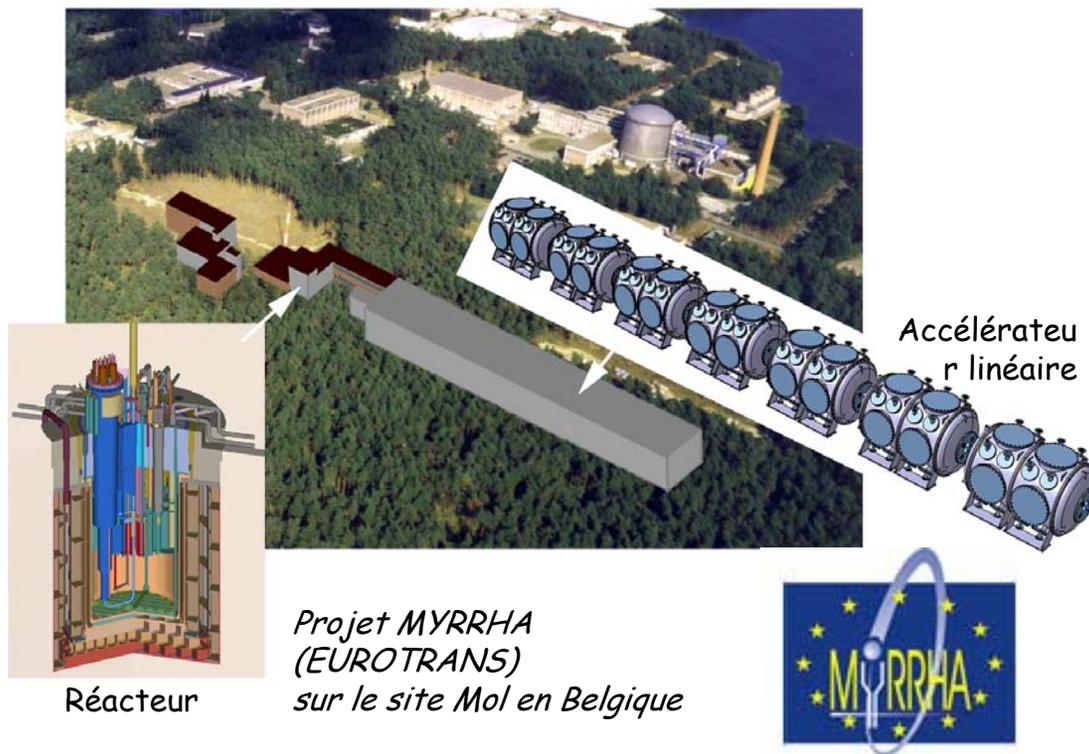
# ... dont le traitement des déchets nucléaires

## Par transmutation



Radio-toxicité relative d'une tonne de combustible irradié avant et après incinération. Une séparation des produits à vie longue au niveau de 99.9 % suivie de leur incinération, permettent d'atteindre le niveau de référence en 700 ans.

## Le projet d'incinérateur MYRRHA



## L'accord SCK CEN - CNRS/IN2P3

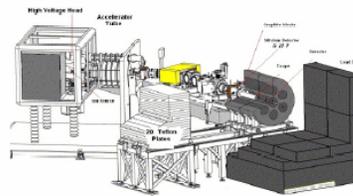
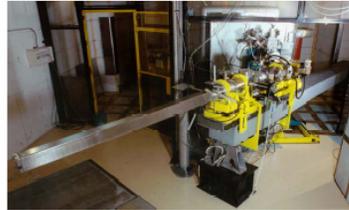
L'accord prévoit qu'en collaboration avec d'autres partenaires européens, le SCK•CEN pilotera le développement du réacteur sous-critique et de la cible, et l'IN2P3/CNRS conduira le développement de l'accélérateur linéaire de haute puissance



# un programme expérimental

## L'expérience des GENEPI

- GENEPI-1 au CEA-Cadarache
  - Couplé au réacteur MASURCA (2000)
  - Cible Tritiée
  - Programme MUSE-4
- GENEPI-2 au LPSC (depuis 2003)
  - Mesures de section efficace nucléaire
  - Cible Tritiée ou Deutérée
  - Doigt de gant long (plomb) ou court (graphite, téflon)



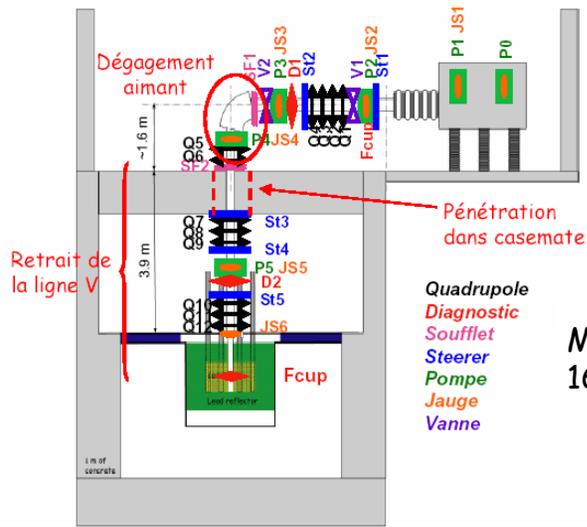
## Generator of Uninterrupted Intense Neutrons at the lead Venus Reactor

GUINEVERE consiste en:  
une expérience de **couplage** (à puissance nulle) entre le réacteur VENUS (SCK-CEN, Mol, Belgique) et une source de neutrons **GENEPI versatile** (GENEPI-3C)

et répond au besoin d'un instrument pour poursuivre les programmes expérimentaux dédiés au **pilotage et contrôle des réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur** préliminaires à la réalisation d'un ADS de démonstration

→ Programme EUROTRANS/ECATS 6<sup>ème</sup> PCRD Européen

## Design préliminaire de l'accélérateur



Maud Baylac LPSC Grenoble  
16 octobre 2007, Roscoff

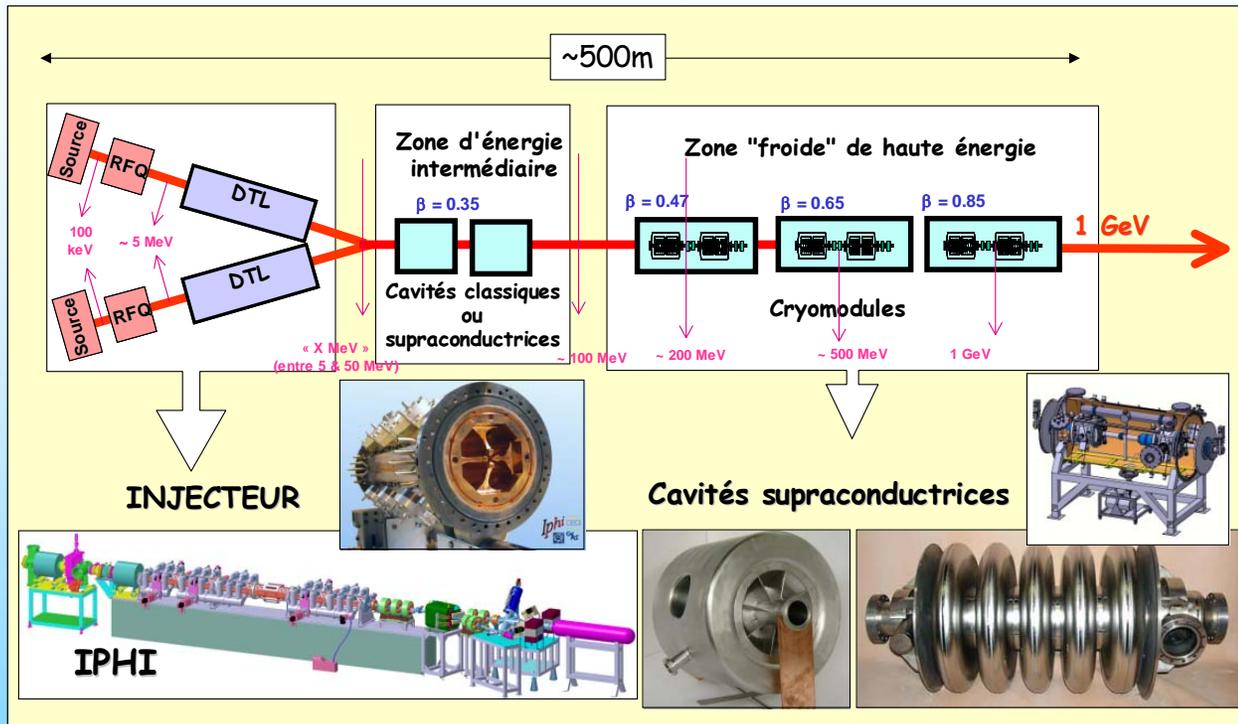
## Les grandes lignes de GUINEVERE

- Réacteur (SCK-CEN)
  - Transformation de VENUS en réacteur rapide (modéré au plomb)
  - Combustible fourni par le CEA-Cadarache
  - Renforcement des structures pour soutenir le plomb dans la cuve
  - Extension du bâtiment pour accueillir l'accélérateur



- Construction d'une nouvelle source GENEPI-3C

# Des accélérateurs à l'aval du cycle électronucléaire



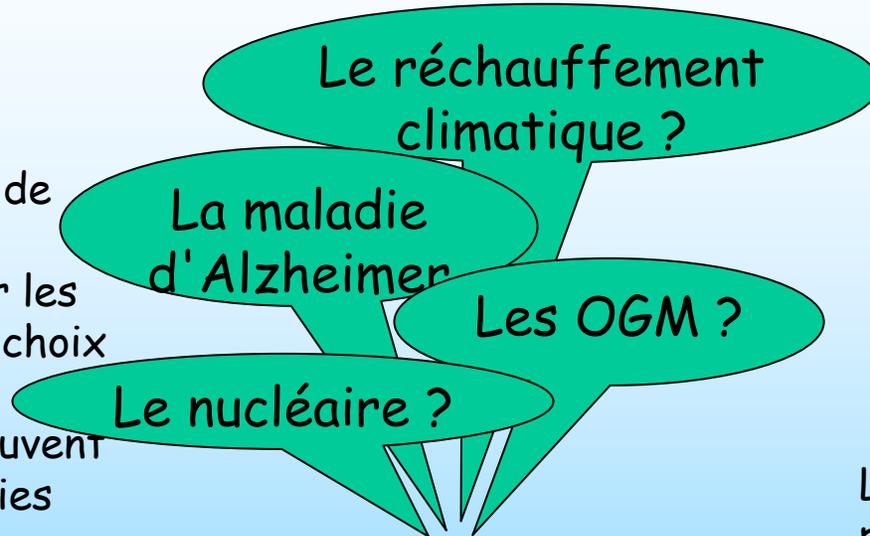
Ou plus exactement de l'aval du cycle aux accélérateurs

Le pluralisme de l'expertise et de la recherche étant, quel que soit le secteur considéré, synonyme d'efficacité, le CNRS et les universités doivent être encouragés à accroître significativement leur participation à l'effort national de recherche sur les systèmes nucléaires du futur et l'aval du cycle du combustible.

Recommandation du rapport de Christian BATAILLE et Claude BIRRAUX de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST), N° 832 Assemblée Nationale, N° 290 Sénat, Mai 2003

# Une sollicitation pressante et multiforme

Nos parlementaires ne recherchent-ils pas l'éclairage académique de ces mêmes chercheurs lorsqu'il s'agit d'évaluer les impacts sociétaux des choix scientifiques et technologiques trop souvent influencés par les lobbies économiques?



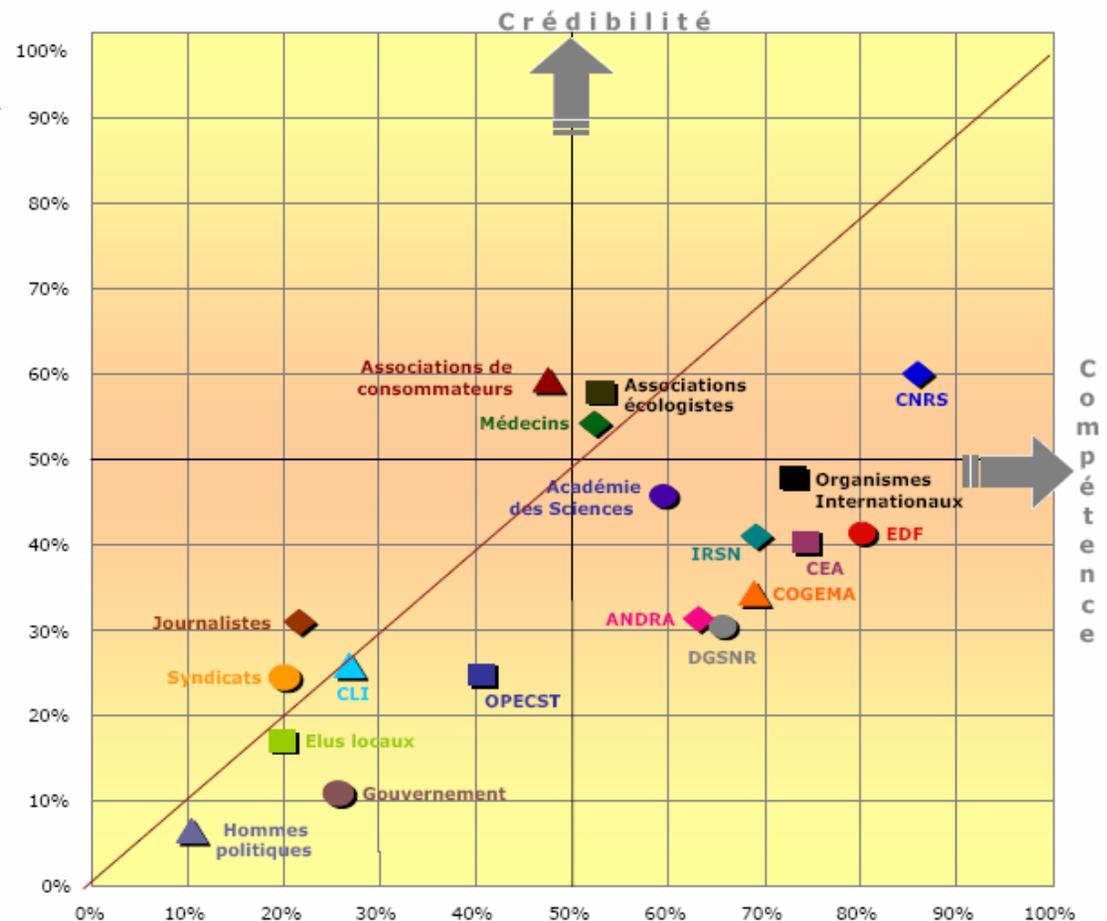
Les médias ne puisent-ils pas, quelque soit le sujet, de la sexualité des drosophiles à la montée de l'intégrisme au Xinjiang occidental, dans le vivier des chercheurs du CNRS pour satisfaire la demande culturelle de nos concitoyens ?

# Le scientifique bénéficie d'une confiance élevée dans la population

à la fois comme homme de savoir et comme expert

La société elle-même ne place-t-elle pas le CNRS au plus haut du diagramme crédibilité-compétence, bien au-delà des politiques, des industries, des institutions et des ONG ?

Les citoyens manifestent ainsi un maximum de confiance dans l'avis des scientifiques indépendants, signifiant un désir d'information et d'expertise qui ne doit rien aux interprétations politiques et/ou religieuses.



Baromètre IRSN 2006 sur la perception des risques et de la sécurité.

# Donner sens au progrès

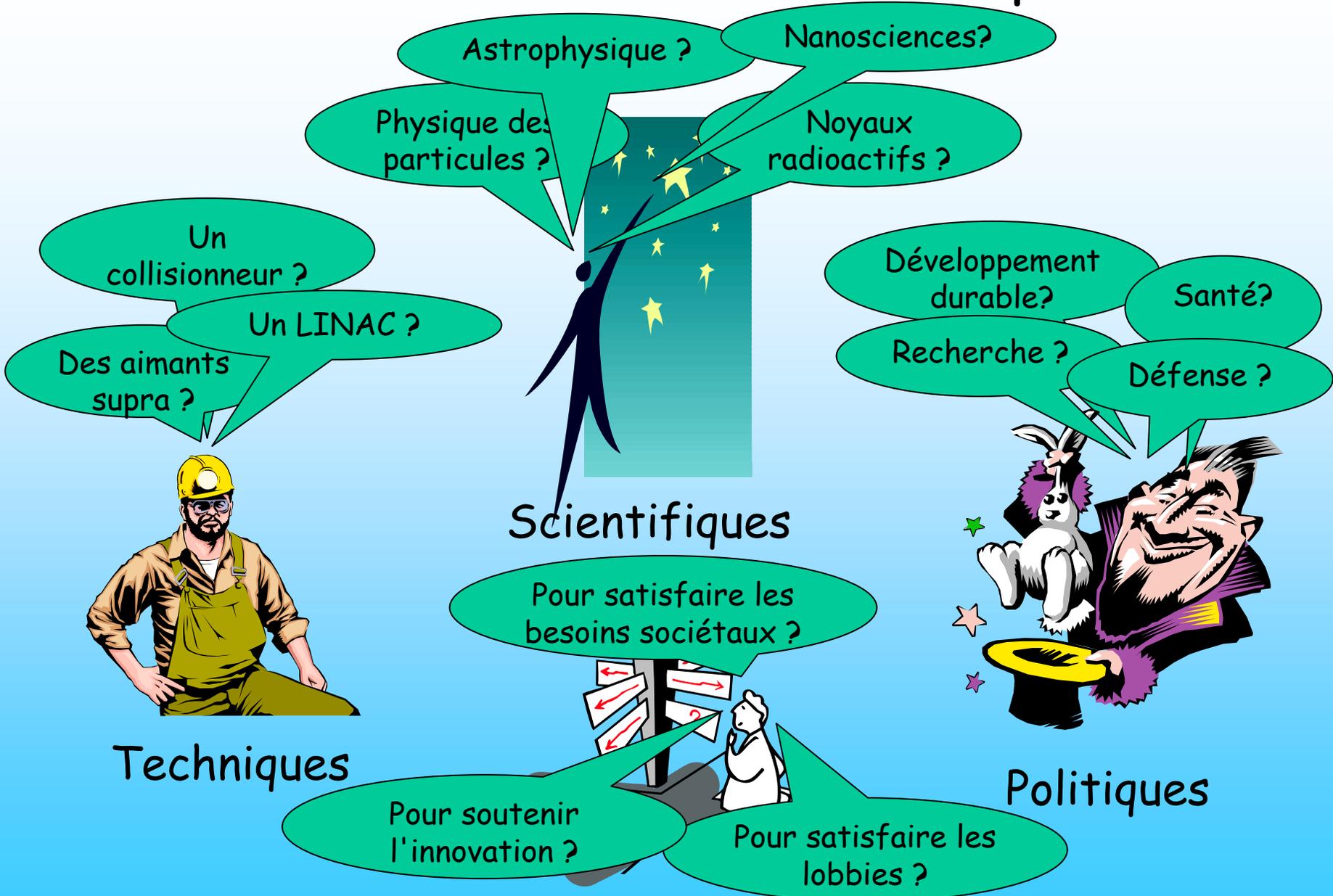


Cette quête d'objectivité, en but aux obscurantismes et au scientisme, a très tôt diffusé pour tisser les multiples réseaux internationaux qui ont contribué à **donner du sens au progrès**.



Comprendre, expliquer, débattre, rassurer, les citoyens, pour donner corps à leur perception du progrès (confort, sécurité de l'approvisionnement, indépendance énergétique, réduire l'impact environnemental) mais aussi pour contribuer au soutien au développement technologique et industriel (marché, emploi, rôle de l'innovation) et à la prise de décision politique.

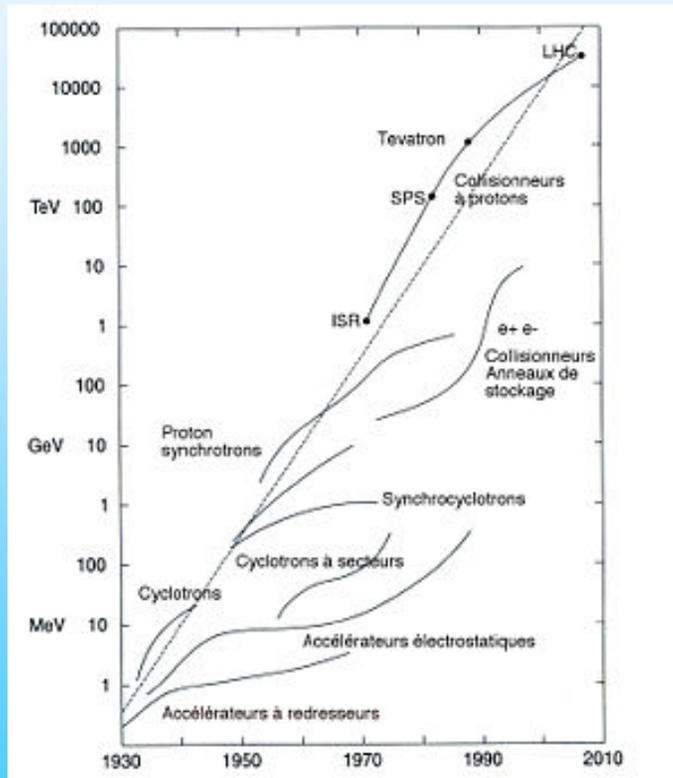
# Faire des choix, affirmer des priorités



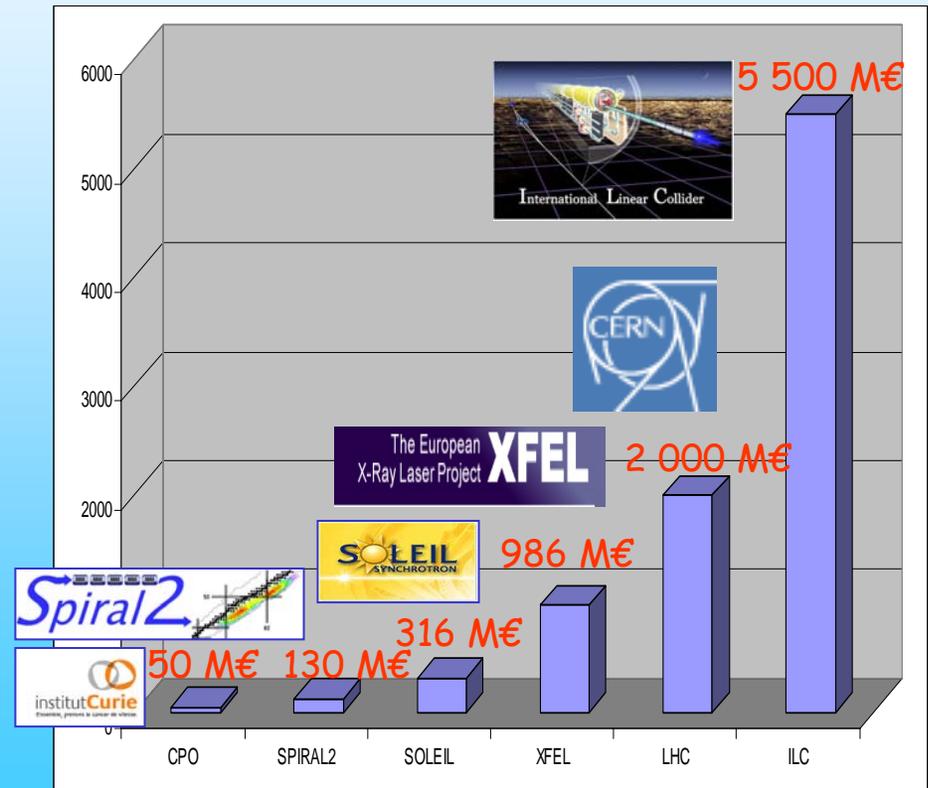
# D'autant que les grands équipements scientifiques coûtent cher

Pour les accélérateurs, un gain d'un facteur 10 en énergie tous les 7ans et malgré une réduction sensible du coût par eV d'énergie de faisceau

Des projets toujours plus coûteux

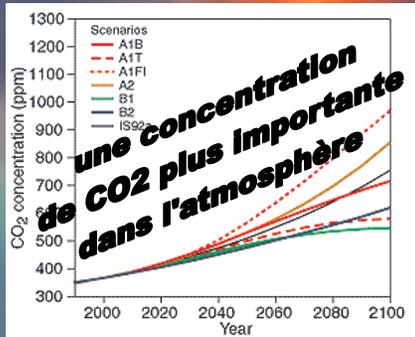
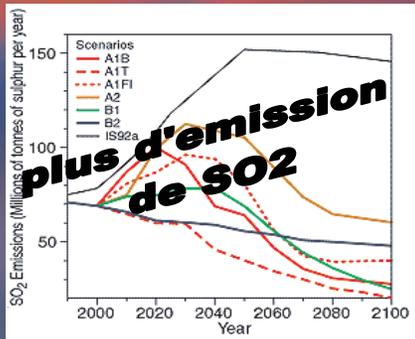
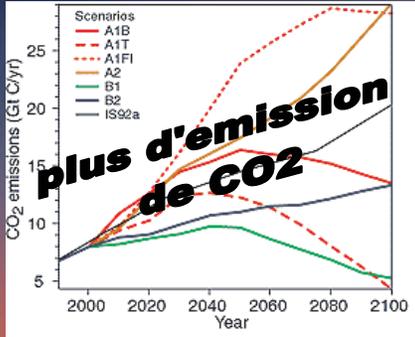


Le diagramme de Livingston

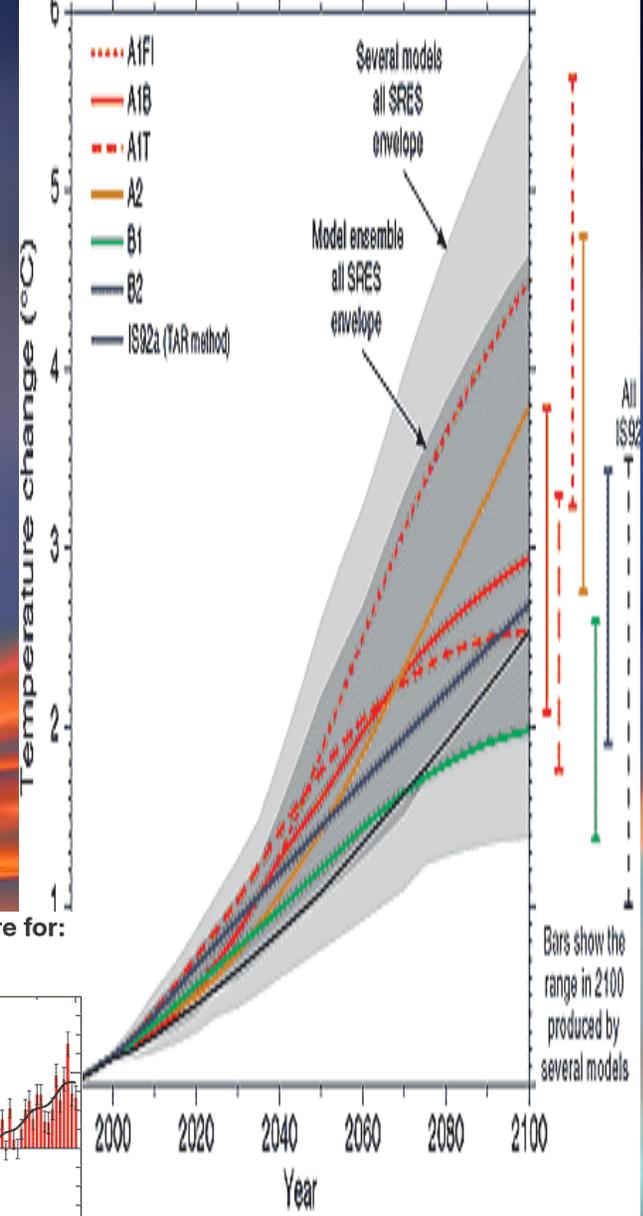
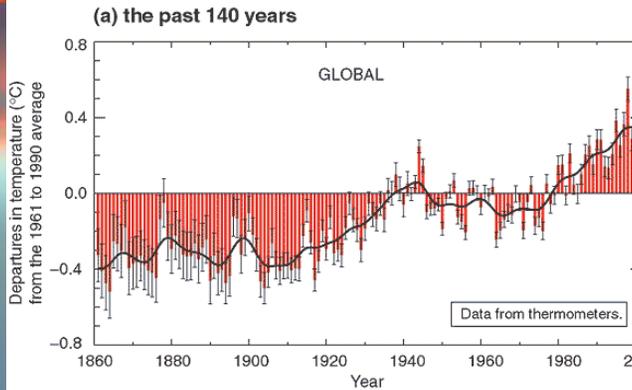


# Une priorité nouvelle: l'énergie et le climat

Les projections du  
GIEC  
le temps se gâte!



Variations of the Earth's surface temperature for:



# Fonction d'alerte

L'homme occidental, longtemps persuadé de pouvoir légitimement consommer l'essentiel des ressources d'énergie fossile de la terre, a presque simultanément, **appris des scientifiques que leur usage abusif précipitait à la fois leur finitude et les réchauffements climatiques**, et vérifié dans l'aggravation des dangers géopolitiques, que l'essentiel de l'humanité n'entendait plus en être spoliée.

Citoyens



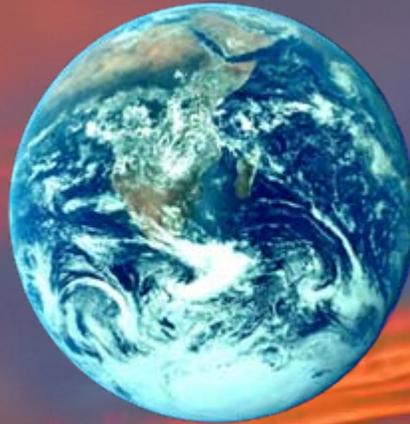
du monde

L'homme, longtemps ignorant de l'impact de ses activités sur le climat, a presque simultanément, **appris des scientifiques qu'il était responsable d'un processus rapide de réchauffement planétaire**, et vérifié, avec Tchernobyl, que les nuages n'avaient cure des frontières d'État, et avec le « trou d'ozone » que les activités humaines sont capables d'avoir un impact à l'échelle de la planète.

# Planétarisation

Les problématiques climatiques et énergétiques embrassent la planète entière et participent à la mondialisation de nos temps contemporains.

Gouvernance



internationale

Dés lors, les politiques nationales s'affrontent à leurs propres limites. Sans doute, notamment dans le domaine énergétique, les différentes politiques nationales conduites (en France, en Autriche, aux USA ...) permettent d'en quantifier les « effets locaux » (en terme d'indépendance et de pérennité des ressources, en terme de production de gaz à effet de serre et de contribution des renouvelables). Mais leurs incohérences confrontées aux problématiques globales à l'échelle de la planète exigent de procédures de gouvernance mondiale, tel le **protocole de Kyoto**.

# Le GIEC

Dans le domaine du climat, les scientifiques ont rempli leur **fonction d'alerte et se sont organisés mondialement** en impliquant, via deux organisations dépendant de l'ONU, le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale), la quasi-totalité des États de la planète et donc des politiques au sein du **GIEC (le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat)** plus connu sous son sigle IPCC : International Panel on Climate Change), créé en 1988.

## Nobel de la paix 2007



INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

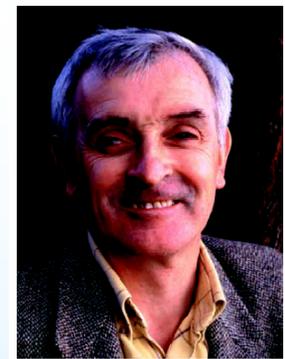


Mr. Rajendra Pachauri  
Chairman of the IPCC

Nul doute que ce type d'organisation mondiale,  
**à l'interface scientifiques-politiques,**  
ne doive se multiplier pour prendre en charge les différents problèmes que  
posent à l'humanité entière **sciences et société en mutation**

"C'est seulement, il y a moins de 20 ans, que l'on a pris conscience que l'homme, qui émet du gaz carbonique depuis deux cents ans, était sûrement en train de modifier son environnement à grande échelle".

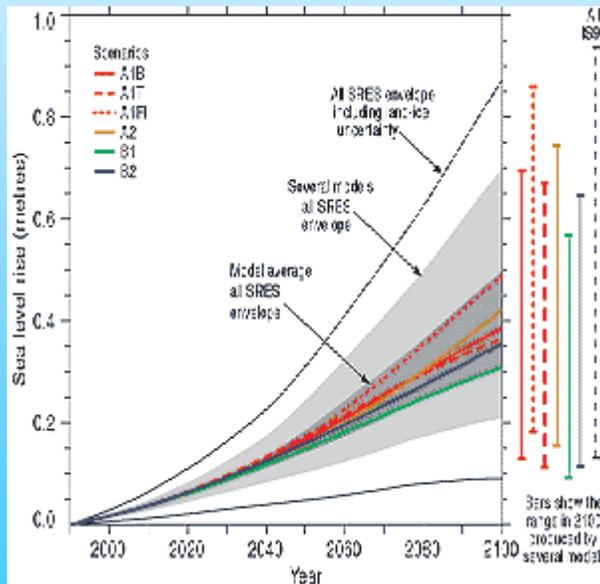
## La vérité scientifique ...



Jean JOUZEL

N. Tiget / CNRS

Les scientifiques travaillent à la modélisation de ces phénomènes complexes et bâtissent des scénarios, dont le grand public retient à juste titre que si réchauffement il y a bien, son évaluation à 100 ans est soumise à une importante **barre d'erreur**.

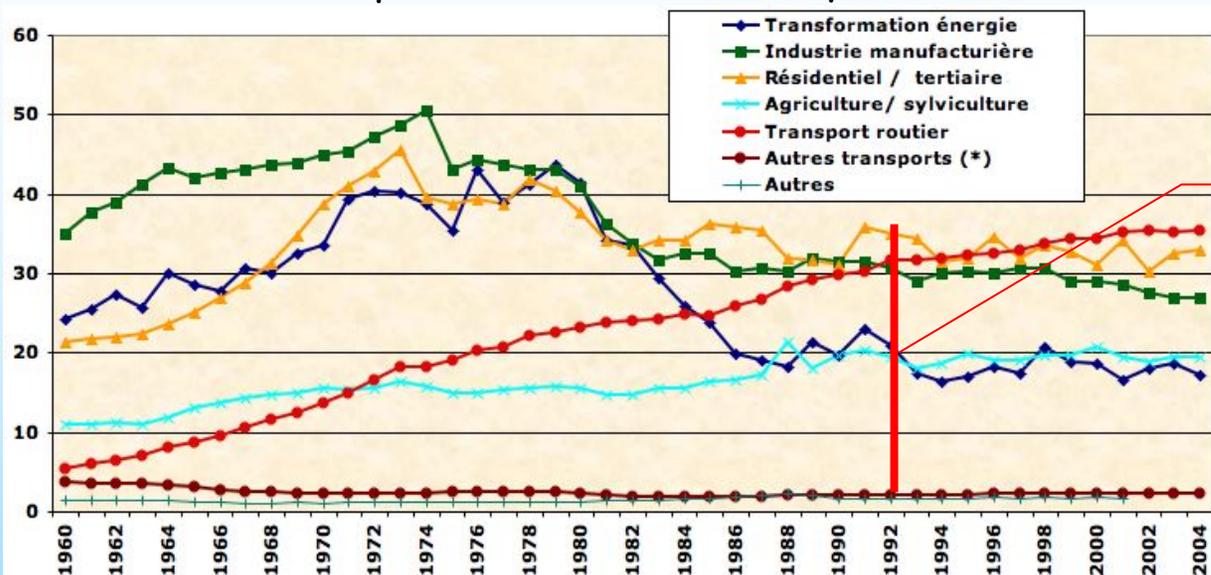


## ... et incertitudes scientifiques.

L'attente de l'opinion envers les scientifiques de réponses précises (réduire les barres d'erreur), de prévisions fiables (évaluer les probabilités), d'expression unanime (appréciation des barres d'erreurs) est souvent déçue..

Les approximations dues aux instruments de mesures, à la compréhension partielle des événements, à la réalité floue du système (physique quantique), aux codes de calcul utilisés, au temps impartis pour acquérir et traiter les informations ... conduisent à des vérités scientifiques imprécises et perfectibles soumises aux interprétations théoriques (discussions « savantes » et non désaccords entre savants) et aux vérifications expérimentales.

La France, dont l'essentiel de la production d'énergie électrique (80% nucléaire et 15% hydraulique) est réalisée sans émission de CO<sub>2</sub>, est aujourd'hui, parmi les pays à fort PNB avec la Suisse et la Suède, l'un des plus vertueux en termes d'émission de gaz à effet de serre par habitant. L'effort qui reste à faire s'avère d'autant plus difficile.



Niveaux de référence de la mise en œuvre du protocole de Kyoto

Evolution par activité des émissions de CO<sub>2</sub> seul (en France) depuis 1960, en millions de tonnes équivalent carbone.

## ... et la précision de la nomenclature

Les 27 % de la contribution du « transport routier » aux émissions de CO<sub>2</sub> en France est minorée. Il faut lui ajouter:

- les émissions des raffineries pour produire l'essence (dans le poste "transformation énergie"),
- celles de l'industrie pour la construction des voitures et des routes,
- et plus généralement toutes les émissions produites par des activités concourant aux déplacements (assurances, garages, etc.)

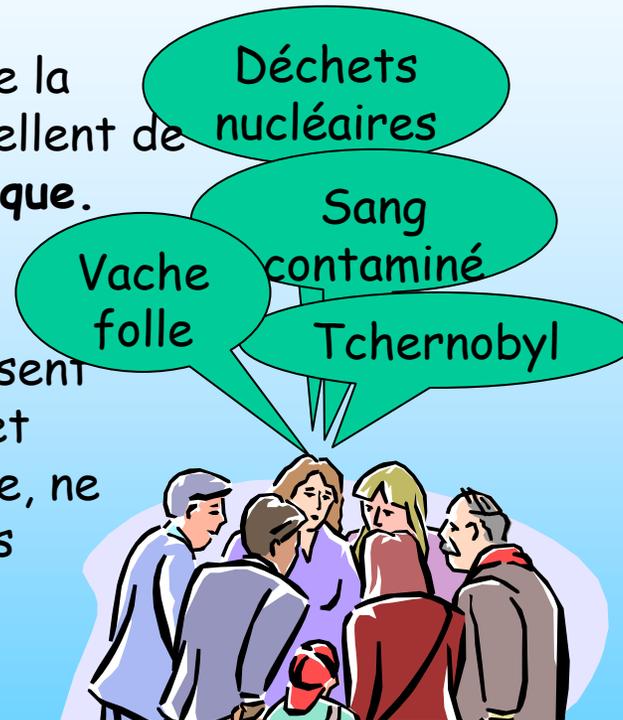
**Le total le plus probable est proche de 40% !**

Ces "incertitudes" scientifiques contribuent à douter de la science

# Le doute sur l'automatisme des bienfaits de la science

Certaines disciplines comme la biologie et l'agronomie appellent de profondes questions d'éthique.

Les technologies, qui proposent des modifications rapides et puissantes des modes de vie, ne sont pas à la portée de tous



Tout se passe comme si la science admise autrefois comme facteur de progrès, était aujourd'hui perçue aussi comme facteur de risques...

Pour autant il ne s'agit pas de réduire la science à des processus de communication ou de satisfaction du public, mais de renforcer son potentiel d'éclairage et de l'exprimer, d'en assumer les promesses et les risques avec les générations montantes.



# La science, autrefois admirée et glorifiée, poserait-elle aujourd'hui un "problème" ?

Etienne KLEIN dans "la science en question":

Les relations de la science avec la société ressemblent de plus en plus à celle d'un vieux couple qui se défait: les débats restent passionnés, mais les rapports ne le sont plus.

L'air du temps: la peur comme figure inédite du lien social

Les questions aux scientifiques: sur le lien entre savoir et pouvoir, entre science et développement, entre science et vérité(s), entre science et universalité

L'inéluctable reconfiguration des liens entre science et société

Ré-érotiser l'acte de connaître ... et repenser le discours de la science

"La chose me semble devenue criante: les sciences contemporaines manquent cruellement, aussi bien dans leur construction que dans leur présentation, d'un travail philosophique régulier."

Une nouvelle rhétorique et de nouveaux parfums, voilà sans doute ce qui - entre autres choses - aiderait la science d'aujourd'hui à devenir **culture**.

E. HURSSSEL

F. NIETZSCHE J-M LEVY-LEBLOND

S. WEINBERG

P. FEYERABEND

I. STENGERS

# Pour une culture du raisonnement scientifique

De fait il appartient sans doute aux scientifiques de s'opposer à la réduction du complexe au profit du simplisme, dont l'accessibilité (la consommation) immédiate masque le réel, et ce faisant en interdit l'approche critique, raisonnable et citoyenne.

**La société a besoin de citoyens ouverts à la complexité et aux évolutions d'un monde dont ils sont tous coresponsables du devenir, la société démocratique a besoin d'une culture du raisonnement.**



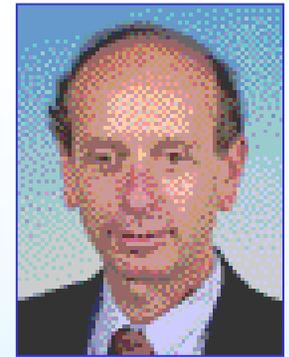
Hubert VEDRINE

- la culture française reste marquée par l'Esprit des Lumières, sauf sur un point récent et pernicieux : la désaffection envers la science (cf. l'effondrement des effectifs des écoles d'ingénieurs au profit des écoles de commerce) et son corollaire, la crainte de l'avenir et la perte de confiance dans le progrès, y compris dans celui sans lequel on ne pourra conjurer la menace écologique. Une grande partie de l'opinion, y compris à gauche, ce qui est frappant et paradoxal, est touchée par cette régression, et cet abandon d'une partie essentielle de la philosophie du progrès, traduit par une interprétation paralysante du principe de précaution.

Rapport sur la France et la Mondialisation remis au Président de la République le Mardi 4 Septembre 2007



# NON, la science n'est pas en panne



Interview de Michel SPIRO,  
Directeur de l'IN2P3  
Libération du 27 mai 2003

Michel Spiro, du CNRS, prône une autre voie que celle du CEA:  
«Du thorium à la place de l'uranium»

Sur la gestion des déchets nucléaires

Nous travaillons sur des systèmes d'incinération des éléments radioactifs à base de réacteurs pilotés par des accélérateurs de protons

Sur les filières innovantes

Sur la sûreté

Sur un nucléaire durable

Sur la prolifération

Nous étudions une filière nouvelle de réacteurs pour l'horizon 2050 utilisant du Thorium à la place de l'uranium et fonctionnant avec un cœur liquide (des "sels fondus") avec des neutrons ralentis.

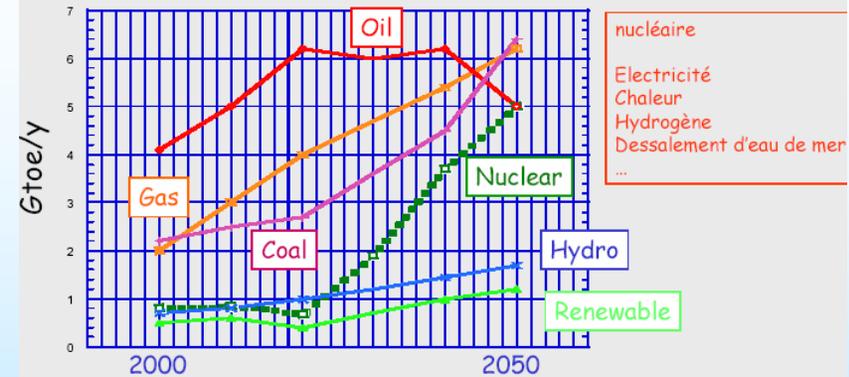
# Le contexte énergétique mondial

Des nouvelles sources d'énergie (sans émission de CO<sub>2</sub>) sont nécessaires  
Ordres de grandeur :

Source	Consommation totale en 1998 (Gtep)	Scénario x2 en 2050 (Gtep)
Fossile (gaz, pétrole, charbon)	7.5	≡ hypothèse ≡ 7.5
Biomasse (traditionnelle)	1.2	1.2
Hydraulique	0.7	1.0
Nucléaire	0.6	10.3
Renouvelables (solaire, éolien, biomasse)	0.02	
<b>Total</b>	<b>10.2</b>	<b>20.4</b>
CO <sub>2</sub> (Gt C eq.)	6	< 6

ex: N = R ⇒ N = R = 5.1 Gep = 20%  
 ⇒ nucléaire multiplié par ≈ 10  
 ⇒ renouvelables multipliées par ≈ 300

Ex: scénario TotalFinaElf, nucléaire 20% in 2050 (x8)



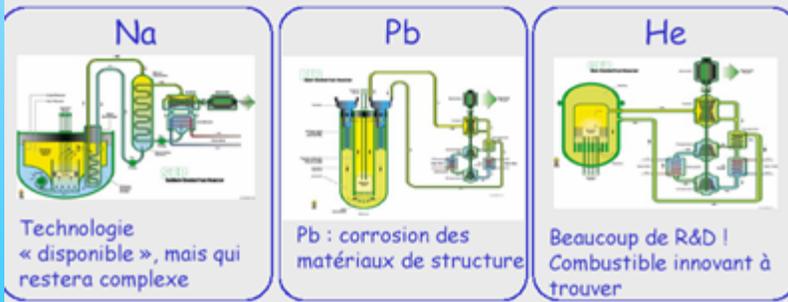
Ref: P.-R. Bauquis, TotalFinaElf

## Le nucléaire du futur - Génération IV

Cycle régénérateur Uranium / Plutonium

Régénération possible avec des neutrons de haute énergie  
 ⇒ Réacteurs à neutrons rapides (RNR)

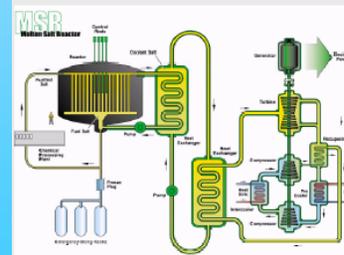
L'eau ralentirait les neutrons, il faut donc un autre fluide pour extraire la chaleur du cœur : Sodium (Superphénix), Plomb, ou gaz (hélium)



Cycle régénérateur Thorium / Uranium-233

Régénération possible avec des neutrons de basse énergie (E < 1 eV)  
 Mais le retraitement du combustible doit être très rapide, afin d'empêcher l'empoisonnement du combustible

Concepts de réacteurs à combustible liquide : Réacteurs à sels fondus



Système très innovant

- Besoin en matière fissile 10 fois moindre que pour un RNR U/Pu (mais il faut de l'U-233)
- Pas de risque de fusion du cœur
- Recyclage sur place
- R&D: chimie, de matériaux et de corrosion

## Contribution du CNRS et de la recherche fondamentale à la gestion des déchets nucléaires

Michel SPIRO, directeur de

Audition M. Spiro/CNRS  
OPECST 20/01/05

# Il reste encore beaucoup à faire

## Après 2006

- Recherche finalisée, portée par les industriels et le CEA, et orientée sur GEN-IV: soutien du CNRS sur les matériaux, la pyrochimie, les scénarios..
- Recherche long terme, portée par le CNRS avec le soutien des autres acteurs:
  - Élimination des déchets REP (de GEN-II et GEN-III) et découplage production - incinération avec les réacteurs hybrides sous-critiques
  - Voie thorium/sels fondus à approfondir.
- Détermination du CNRS à contribuer à tous les domaines de recherche, des déchets nucléaires à la production d'énergie nucléaire durable.

Audition M. Spiro/CNRS  
OPECST 20/01/05

Bon courage  
Et merci