

LES SCÉNARIOS MONDIAUX POSSIBLES POUR LA PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE DE DEMAIN

S. David

CNRS/IN2P3/Institut de Physique Nucléaire

1



In2p3



**UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11**

PLAN

Le monde énergétique aujourd'hui... et quelques scénarios pour demain

Un scénario renouvelable pour l'Europe

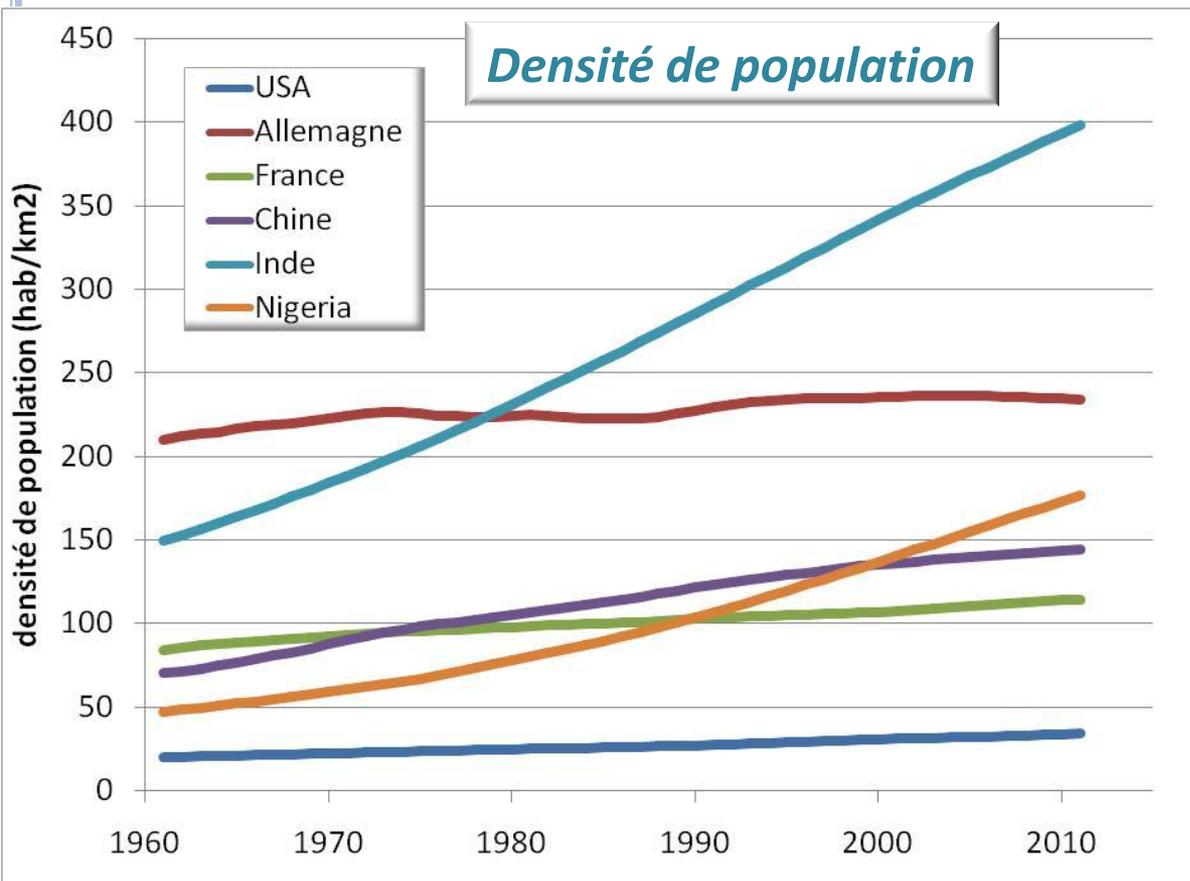


Un scénario énergétique pour le logement en France



LE MONDE ÉNERGÉTIQUE AUJOURD'HUI

Population mondiale

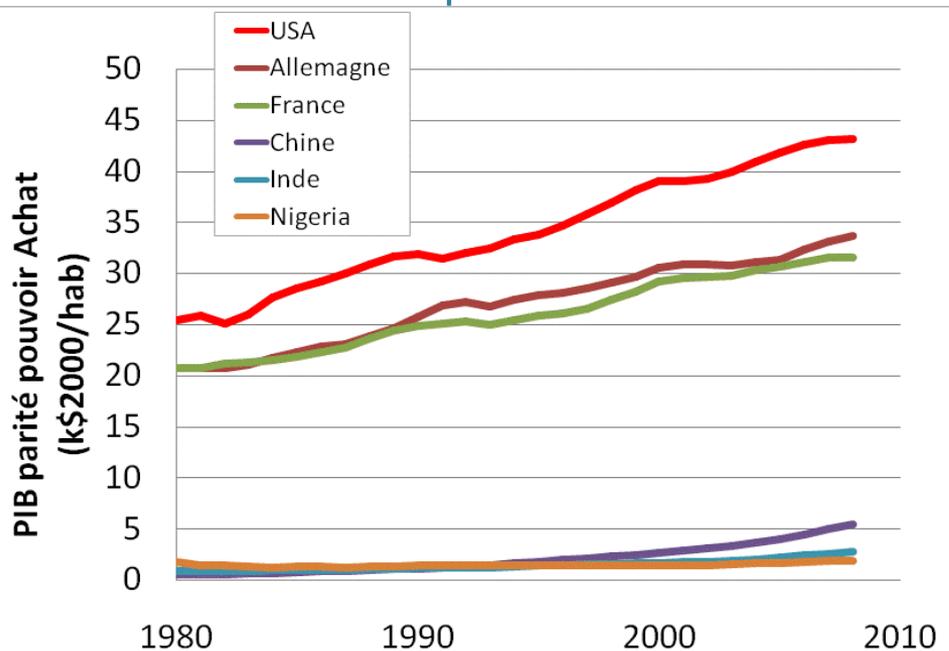


	Pop Mhab	%/an
Inde	1185	+1,3
Allem.	83	-0,14
Nigéria	161	+2,1
Chine	1347	+0,54
France	63	+0,55
USA	312	+0,92

	2005	2050
Monde	6,5 milliards	9,5 milliards

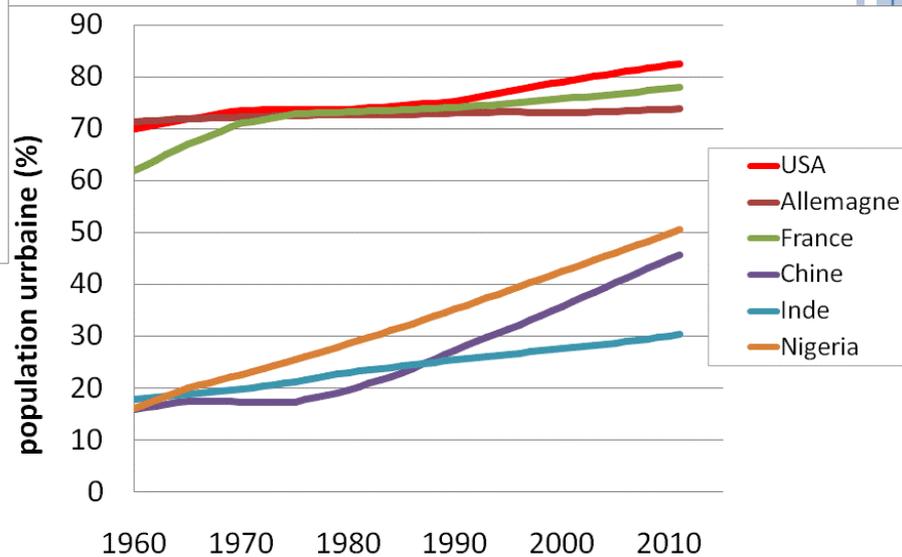
LE MONDE ÉNERGÉTIQUE AUJOURD'HUI

Un monde en pleine expansion économique



Et un taux d'urbanisation galopant

En 2008, le taux d'urbanisation mondial a atteint 50%



Villes :
Centre d'affaire, commerce, culture, industrie
Stabilisation de l'économie
Vivre ensemble, réduction des inégalités

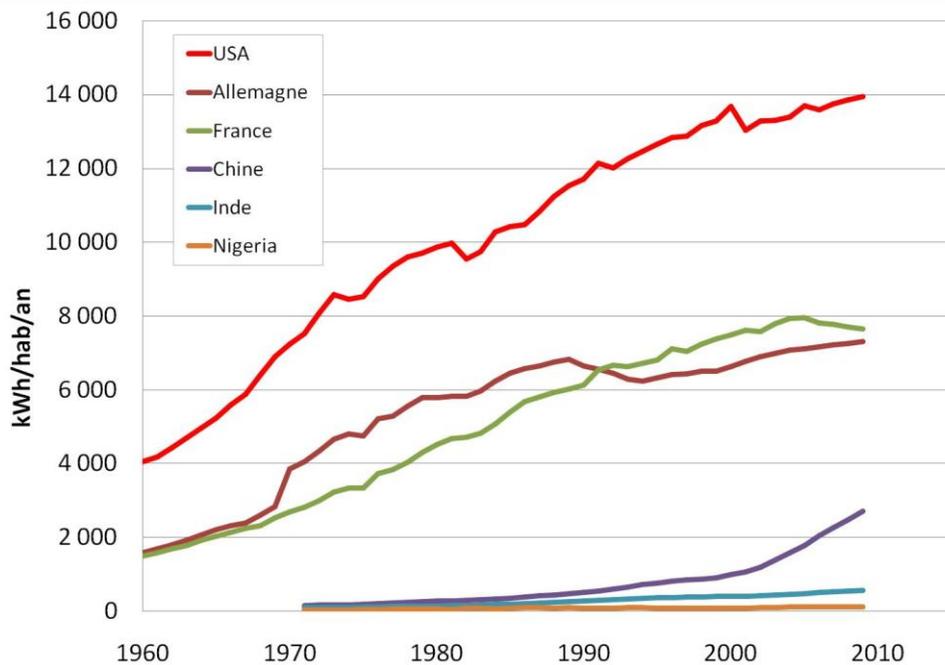
LE MONDE ÉNERGÉTIQUE AUJOURD'HUI

Consommation d'énergie

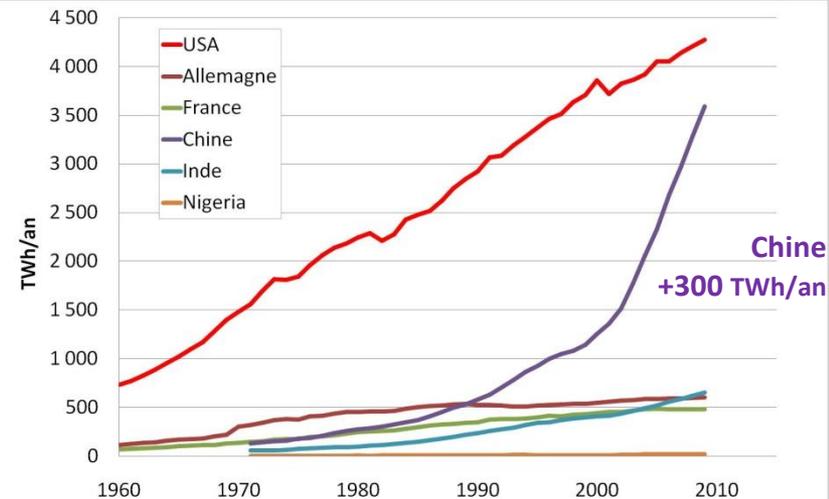
Des besoins mondiaux en énergie en forte croissance

Des inégalités de consommation gigantesques, niveaux mondial ou régional

Consommation électrique par habitant



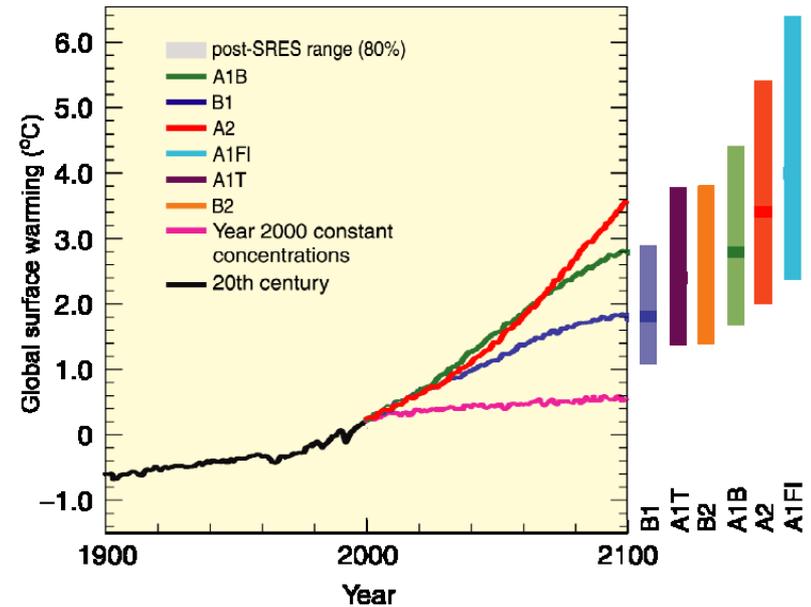
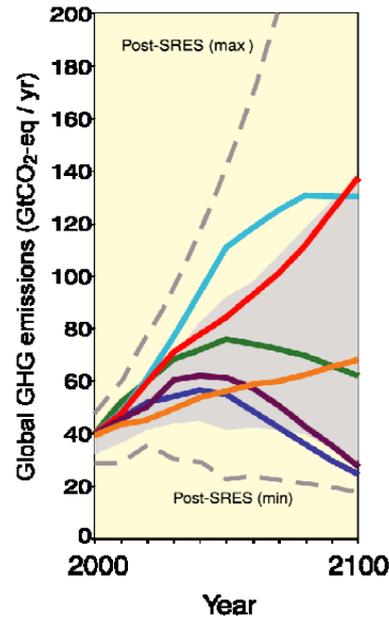
Consommation électrique totale



LE MONDE ÉNERGÉTIQUE AUJOURD'HUI

Le dérèglement climatique

source	Gtep/an (2008)
Combustibles fossiles	9.1
biomasse	1.2
Hydraulique	0.7
Nucléaire	0.6
Nouveaux renouvelables	0.02
Total	11,62



Stabilisation à +2°C (/2000) \Rightarrow émissions GES / 2

Inertie du système : divergence après 2050

nous ne verrons pas les effets de nos efforts

Nous ne croyons que ce nous voyons, mais nous ne croyons plus ce que nous savons. Jean-Pierre Dupuy

LE MONDE ÉNERGÉTIQUE AUJOURD'HUI

Les émissions de CO2 ont atteint un niveau record en 2010

LEMONDE.FR avec AFP | 30.05.11 | 08h18 • Mis à jour le 30.05.11 | 12h14

Abonnez-vous
15 € / mois

115



Partagez

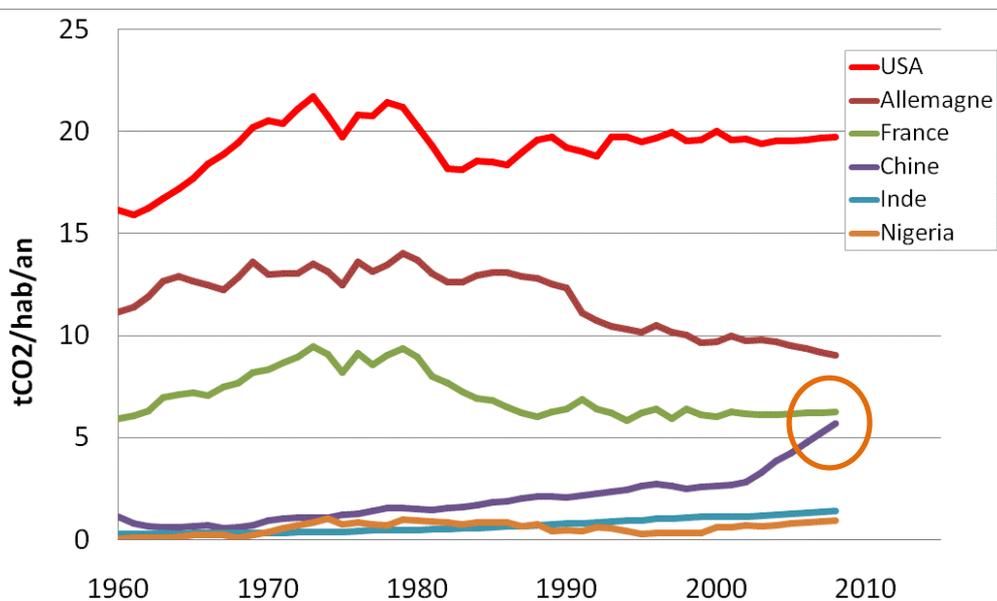


Facebook

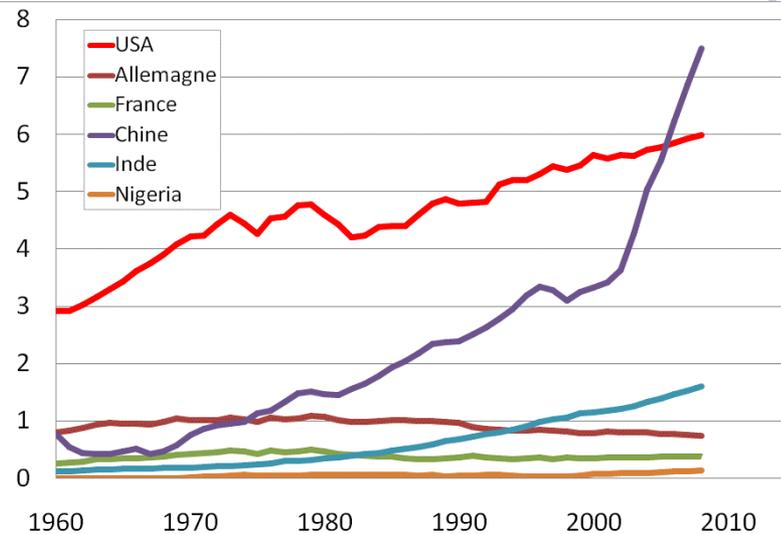


Des émissions mondiales en forte croissance

Émissions t.éq.CO2 /hab/an



Émissions totales t.éq.CO2 /an



RÉPONDRE AU PROBLÈME

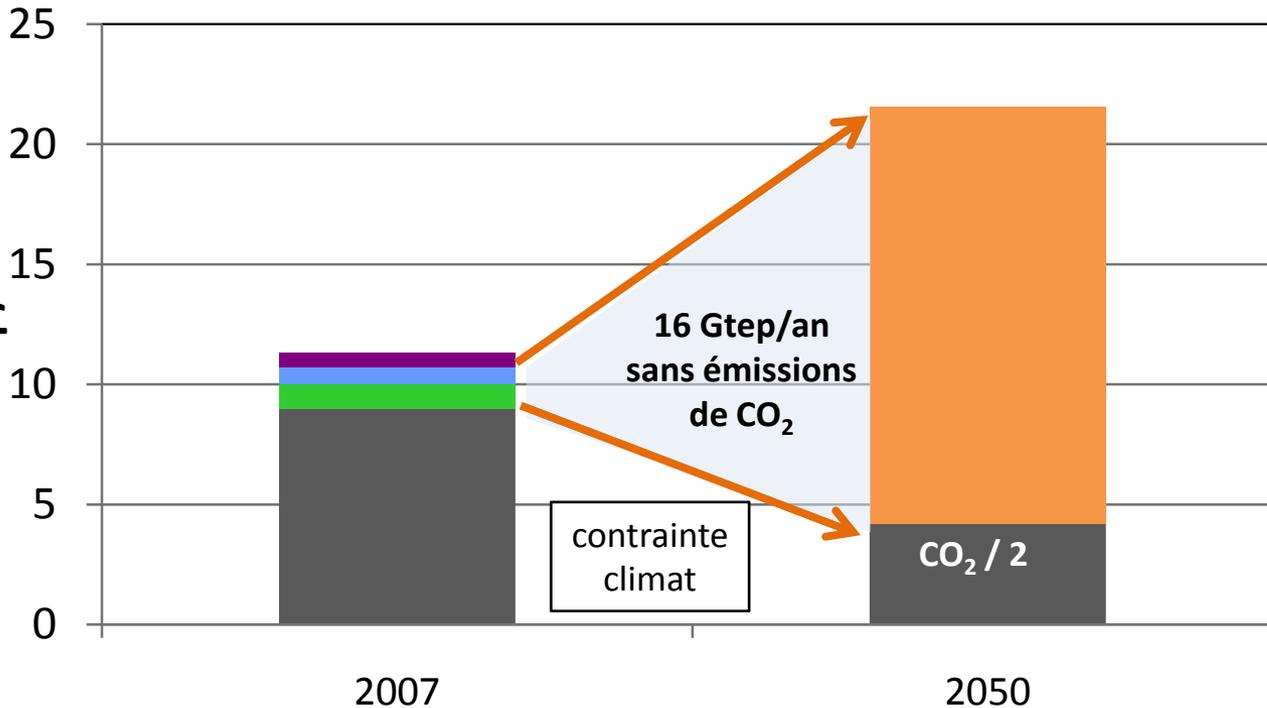
COstruction Simplifiée d'un Monde Énergétique en 2050 (COSIME2050)

Les études de prospective prévoient une consommation en 2050 entre 15 et 30 Gtep/an, contre 12 aujourd'hui

Exercice : décrire ce que pourrait un monde

Hypothèse 1 : « 20 Gtep/an »

Hypothèse 2 : contrainte climatique, émissions GES / 2



Ce qui est simple est faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable. Paul Valéry

ANNALES DE PHYSIQUE

Construction
d'un monde énergétique
en 2050

S. Bouneau, S. David, J.-M. Loiseaux, O. Méplan



EDP
SCIENCES

Hypothèse 3 : réduction des inégalités de consommation

On considère :

3 types de population P_1 P_2 P_3 , niveau de consommation C_1 C_2 C_3

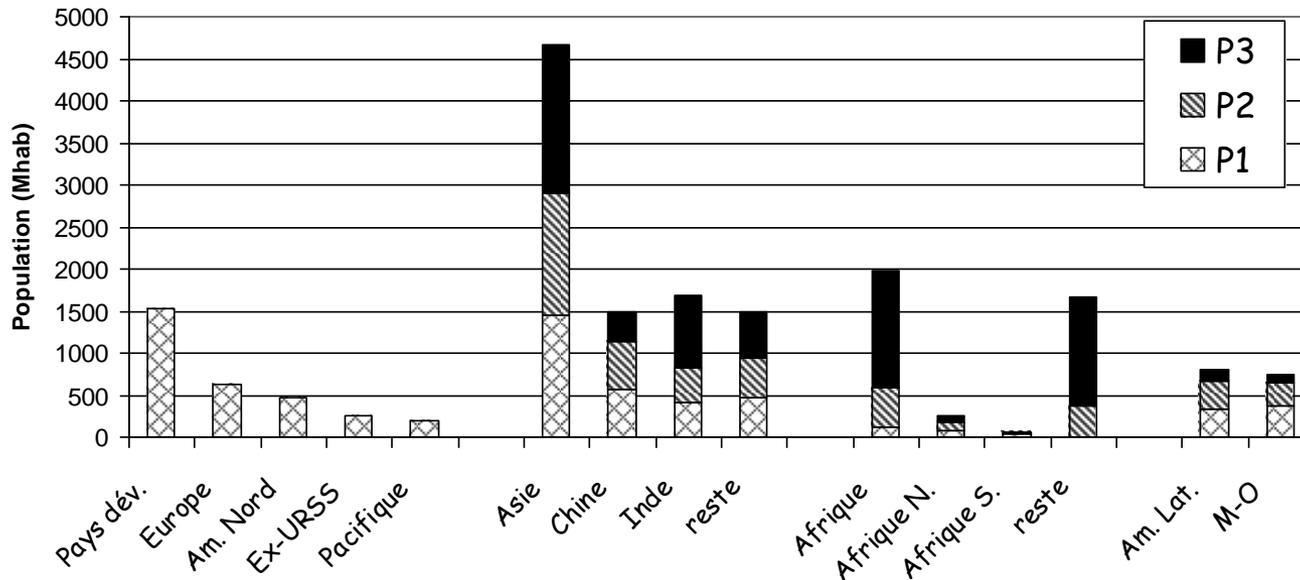
Pour chaque zone géographique, on répartit la population selon P_1 P_2 P_3

Règle de répartition :

pays riches : 100% P_1

pays émergents : urbains 50% P_1 50% P_2 ; ruraux 100% P_3

pays pauvres : urbains 100% P_2 ; ruraux 100% P_3



	Ghab
P_1	3,7
P_2	2,7
P_3	2,9

Hypothèse 3 : réduction des inégalités de consommation

La réduction des inégalités passe par fixer les rapports de consommation

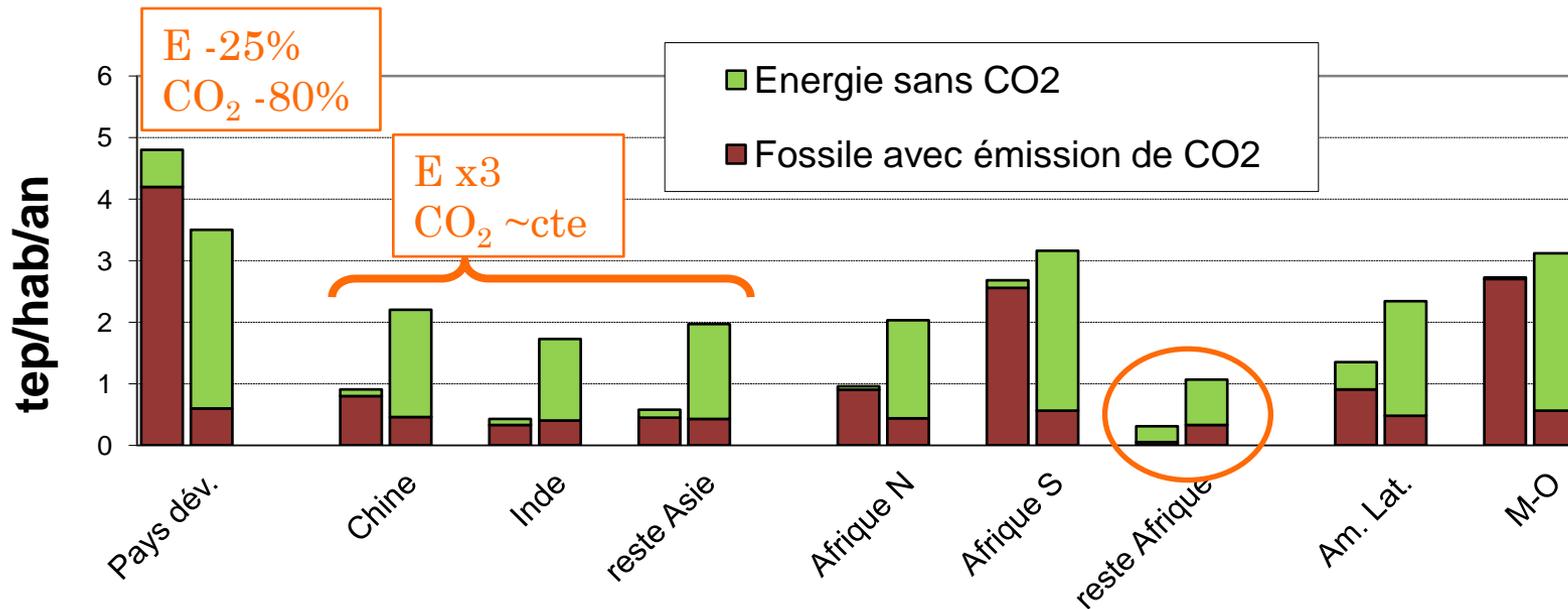
$$C_1/C_3 = 4 ; C_2/C_3 = 2 ; C_3/C_3 = 1$$

Avec $E_{tot} = 20$ Gtep/an, cela suffit pour déterminer $C_1 C_2 C_3$

$$C_1 = 3,44 ; C_2 = 1,72 ; C_3 = 0,86 \text{ (tep/hab/an)}$$

De même avec les émissions de GES = 4,2 Gtep/an au total

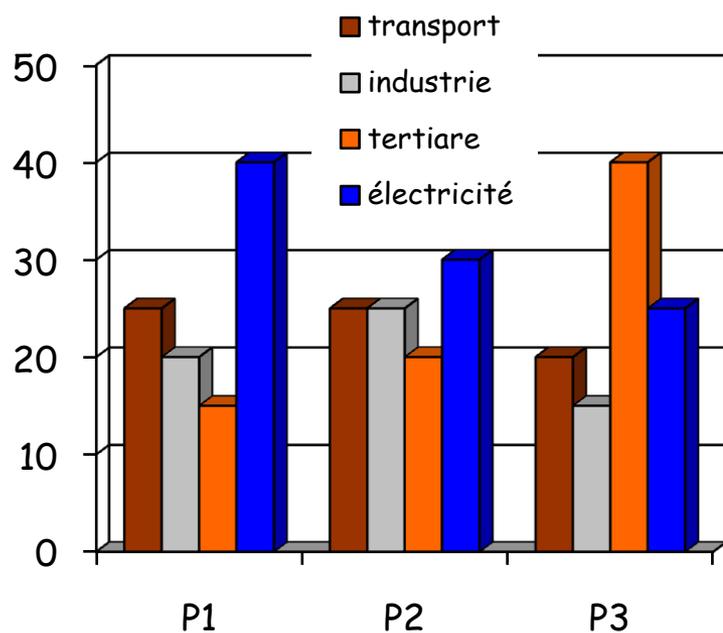
$$F_1/F_3 = 2 ; F_2/F_3 = 1,4 ; F_3/F_3 = 1 \Rightarrow F_1 = 0,59 ; F_2 = 0,42 ; F_3 = 0,30 \text{ (tep/hab/an)}$$



Construction du mix énergétique

Adéquations sources / besoins

Répartition des besoins



	Transport	Industrie HT	Rés./tert. BTBT	Electricité
Fossile (CO2)				
pétrole	X	X	X	
gaz		X	X	X
charbon		X		X
Fossile (CCS)		X		X
Hydro/PV/éolien				X
Solaire concentré		X		X
Biomasse	X	X	X	X
Géothermie			X	X
nucléaire				X

Construction du mix énergétique

potentiel des sources renouvelables

(World Energy Council)

Hydraulique	2 Gtep/an		modulable
PV	0,5 Gtep/an	électricité	intermittent
Éolien	1 Gtep/an		intermittent
Solaire concentré	1 Gtep/an		~intermittent
Bois	2 Gtep/an	électricité et chaleur	modulable
Géothermie	0,3 Gtep/an		
Solaire thermique	0,5 Gtep/an	chaleur	
Biocarburant	0,5 Gtep/an	transport	
TOTAL	7,8 Gtep/an		

Charbon avec captage et séquestration CO₂ : 3,7 Gtep/an = 12 GtCO₂ /an

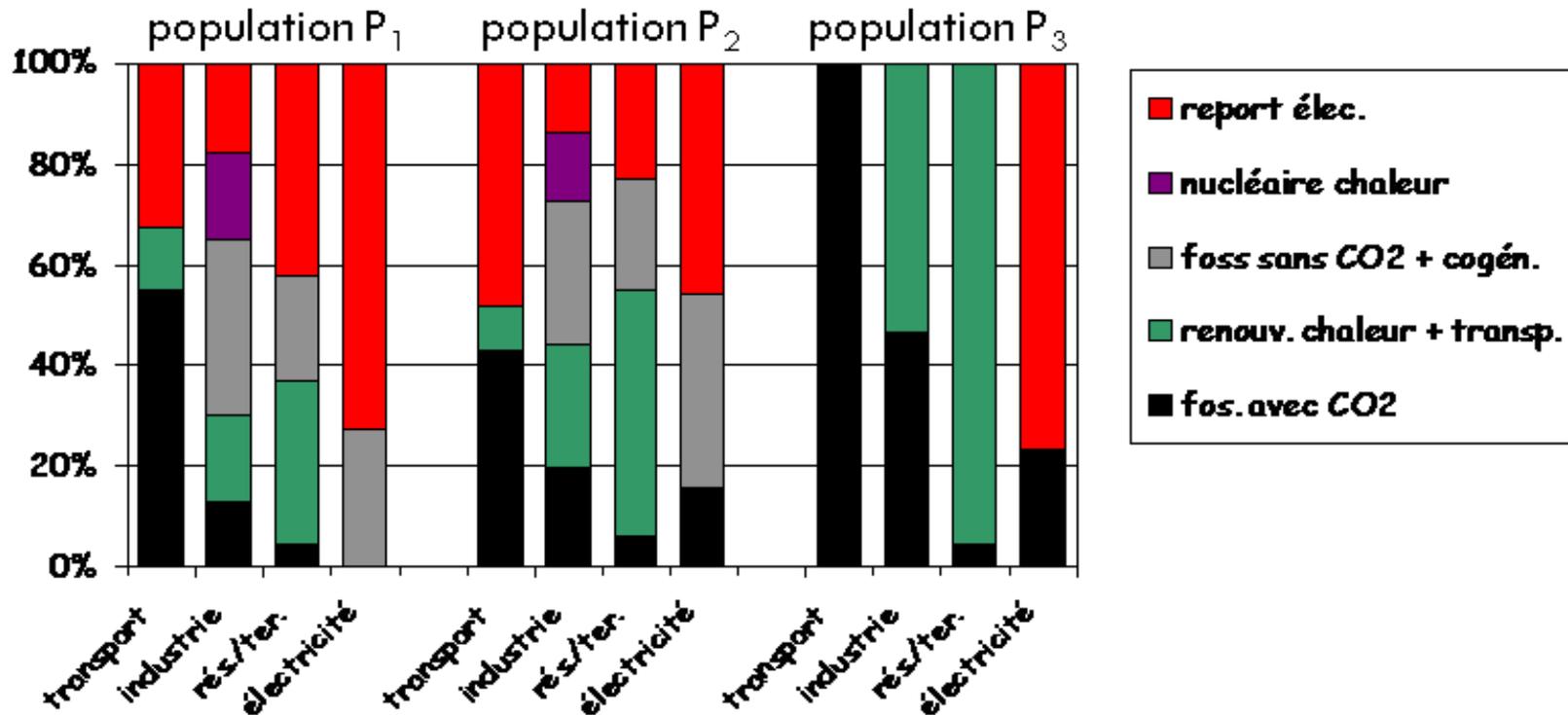
Construction du mix énergétique

On remplit d'abord les besoins non électriques

fossiles avec émission CO₂ : principalement pour la transport

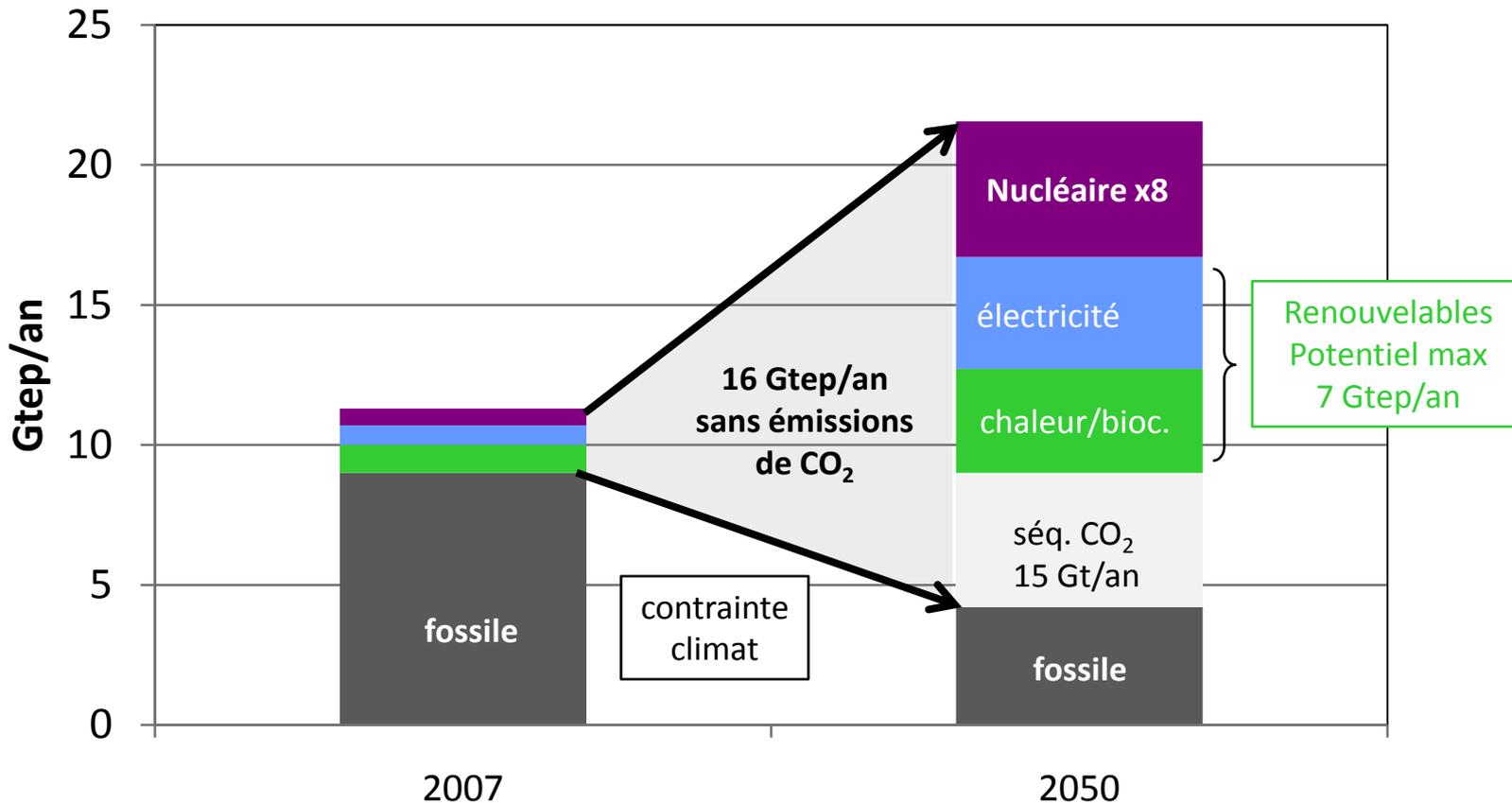
biomasse : principalement pour les populations rurales

Les besoins manquants sont reportés sur l'électricité



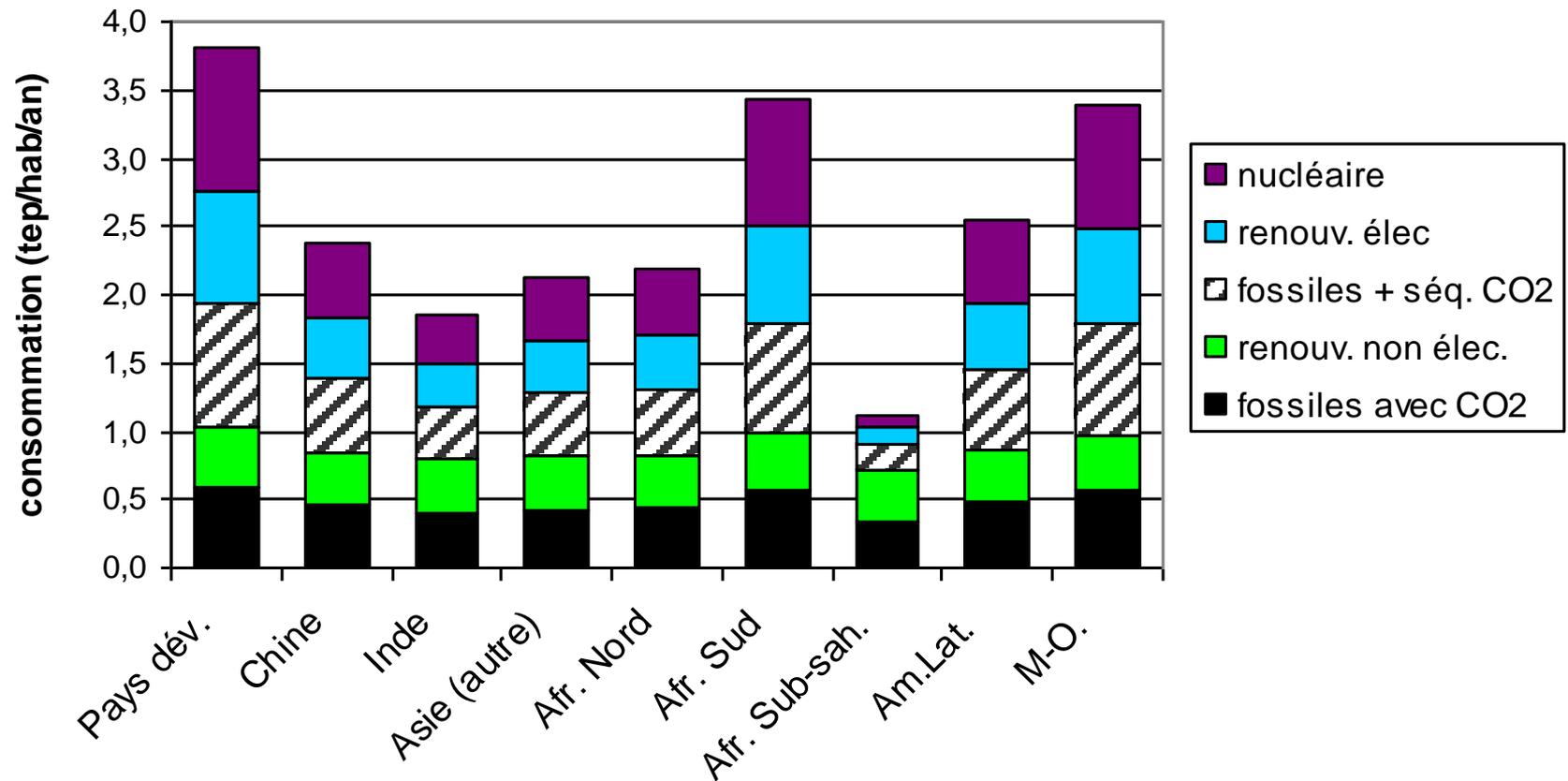
Quelques résultats

Le mix global fait appel à toutes les sources, au maximum de leur potentiel



Quelques résultats

Recours au captage CO₂ pour toutes les régions du monde
 Quasiment pas de nucléaire en Afrique sub-saharienne
 Émissions de CO₂ relativement homogènes

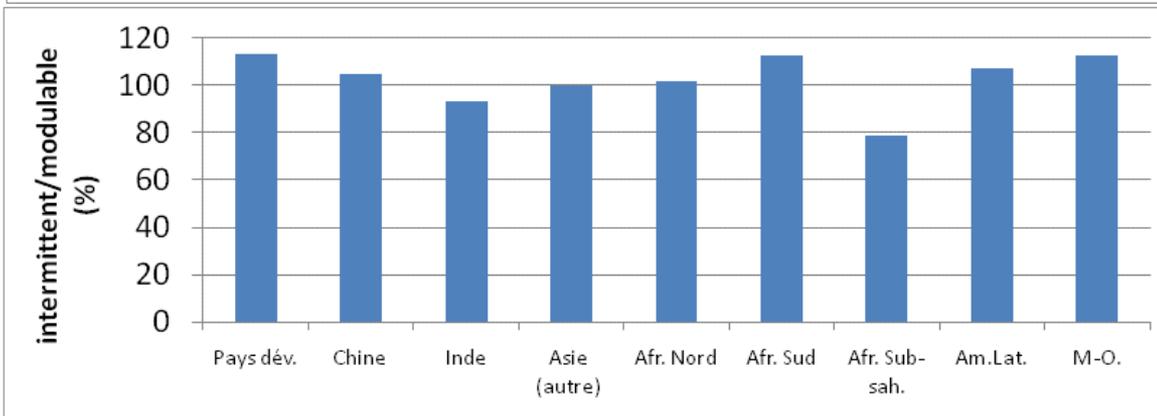
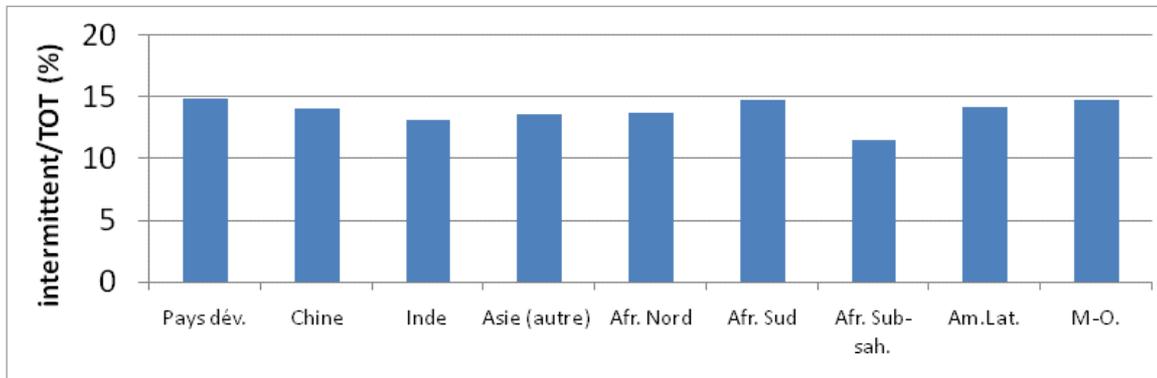


Focus sur l'électricité et l'intermittence

Base : nucléaire + fossile avec cogénération

Modulable : hydraulique + fossile sans cogénération

Intermittent : PV + éolien + solaire à concentration



Incompatible avec la gestion actuelle des réseaux

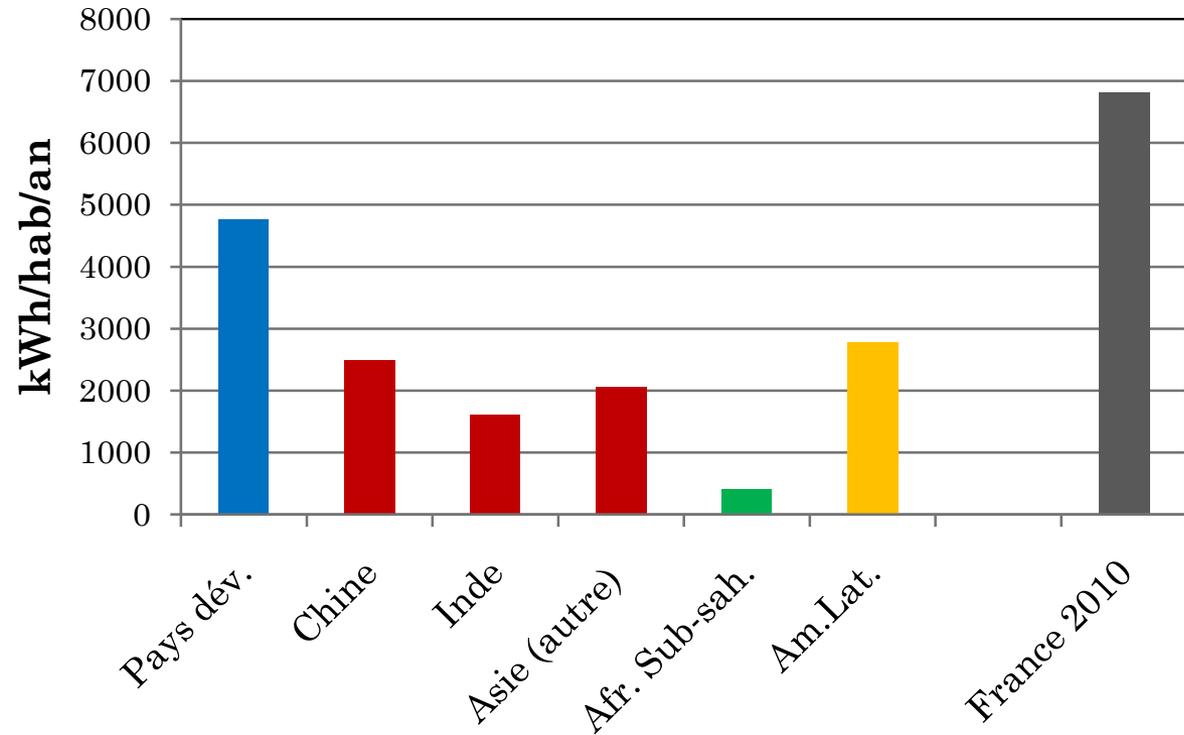
Moduler le nucléaire et la cogénération?
Stockage (STEP)

...

Focus sur le nucléaire

Nucléaire x8

Répartition géographique
« par habitant »



Rappel : cas français ~60 réacteurs en 20 ans pour 60 Mhab

D'ici 2020, la croissance du nucléaire sera très faible, si déploiement il y a, ce sera après 2020, voire 2030

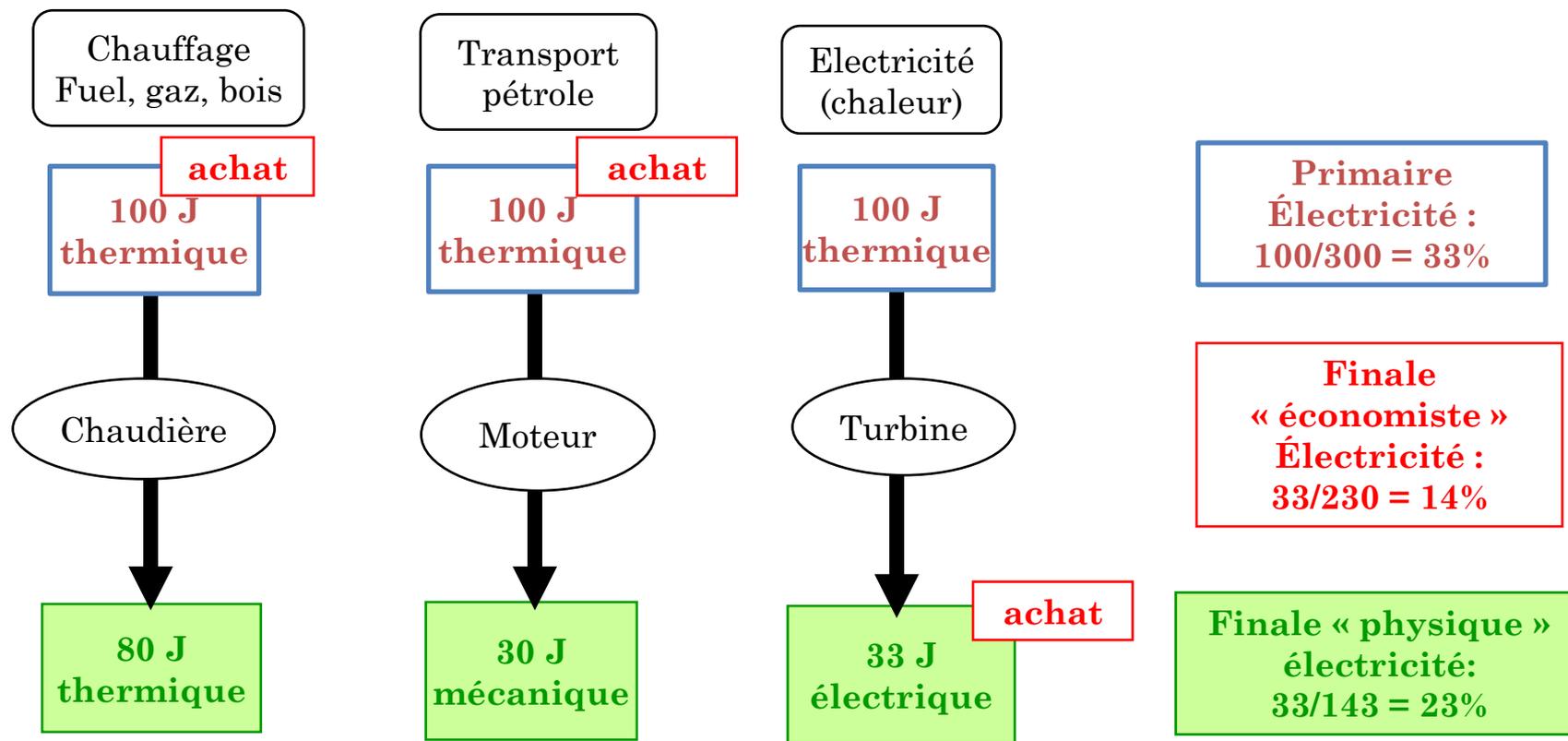
440 → 1750 réacteurs entre 2030 et 2050 : ~2000 réacteurs à construire en 30 ans

Population concernée : urbains des pays développés et émergents = 6 Ghab

Ramené à la France : 20 réacteurs en 20 ans

- Électricité et notion de tep
- Avant 2002 (sans doute la meilleure unité)
 - Pétrole qu'il aurait fallu consommer pour produire une certaine quantité d'électricité
 - 1 MWh = 0,22 tep qqsoit la source
- Depuis 2002...
 - énergie primaire convertie en unité 42GJ = 1tep
 - La conversion dépend donc de la source !
 - Convention :
 - Nucléaire : $E_{\text{prim}} = 3 \times E_{\text{élec}}$ 1 MWh = 0,26 tep
 - PV, éolien, hydro : $E_{\text{prim}} = E_{\text{élec}}$ 1 MWh = 0,086 tep
 - Géothermie : $E_{\text{prim}} = 10 \times E_{\text{élec}}$ 1 MWh = 0.026 tep

SI L'ÉNERGIE PRIMAIRE POSE SOUCIS, PASSONS À L'ÉNERGIE FINALE, C'EST ENCORE PIRE...



Par exemple, la part du nucléaire dans le mix énergétique français :

78% de l'électricité finale, 85% de l'électricité primaire

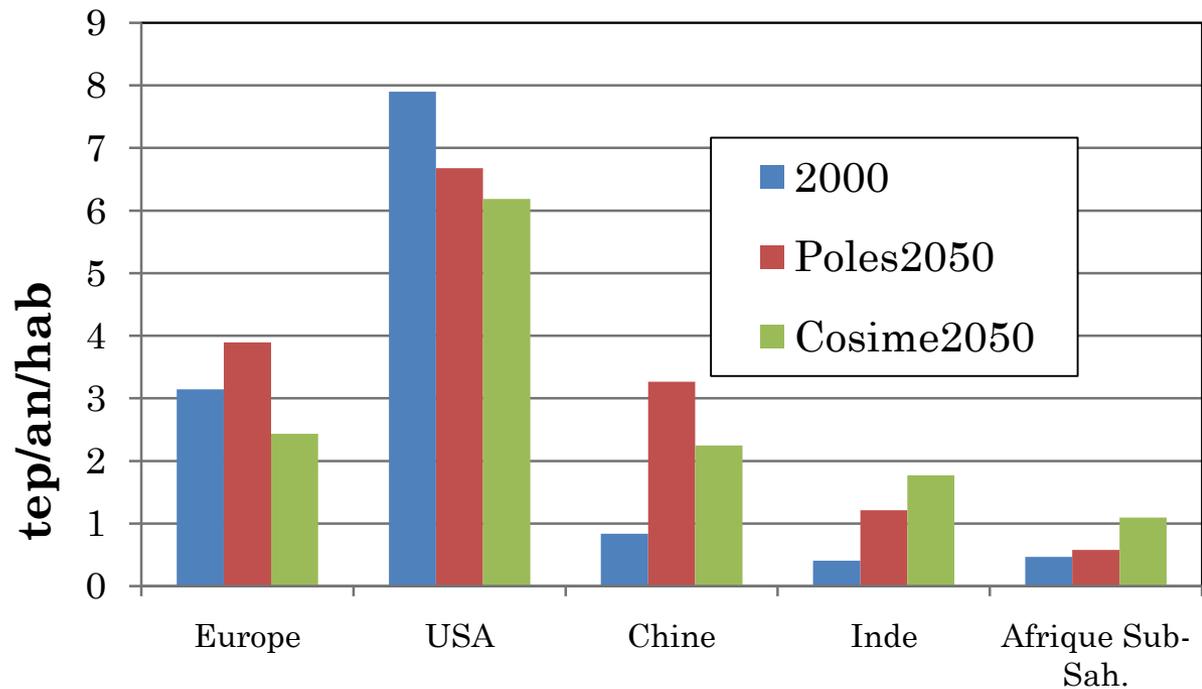
39% de l'énergie primaire

26% de l'énergie finale « physique »

17% de l'énergie finale « économique »

Scénario POLES (LEPII, Grenoble)

- Le scénario BaseLine Poles, E monde = 20,6 Gtep/an
- Poles : très forte croissance de la Chine sur 50 ans
- Léger rééquilibrage US/Europe



DES SCÉNARIOS MONDIAUX DE RÉFÉRENCE

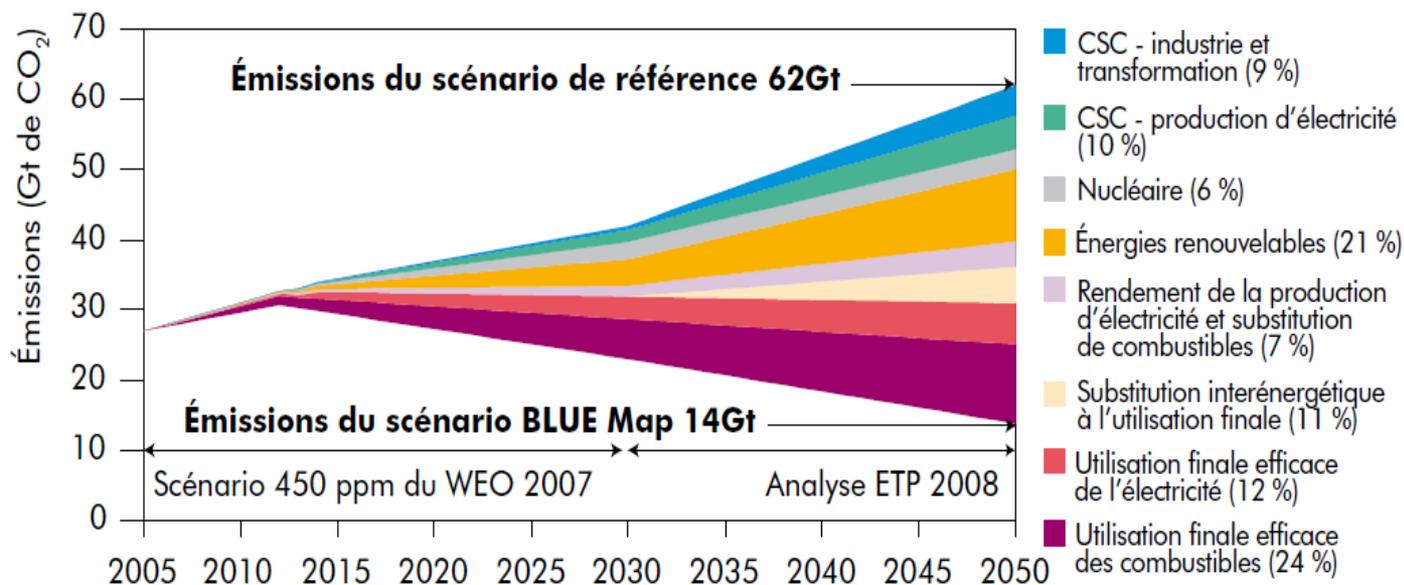
Scénario AIE ETP 2008

D'un point de vue général, les scénarios sans contrainte climatique envisagent des consommations d'énergie au-delà de 20 ou 25 Gtep/an

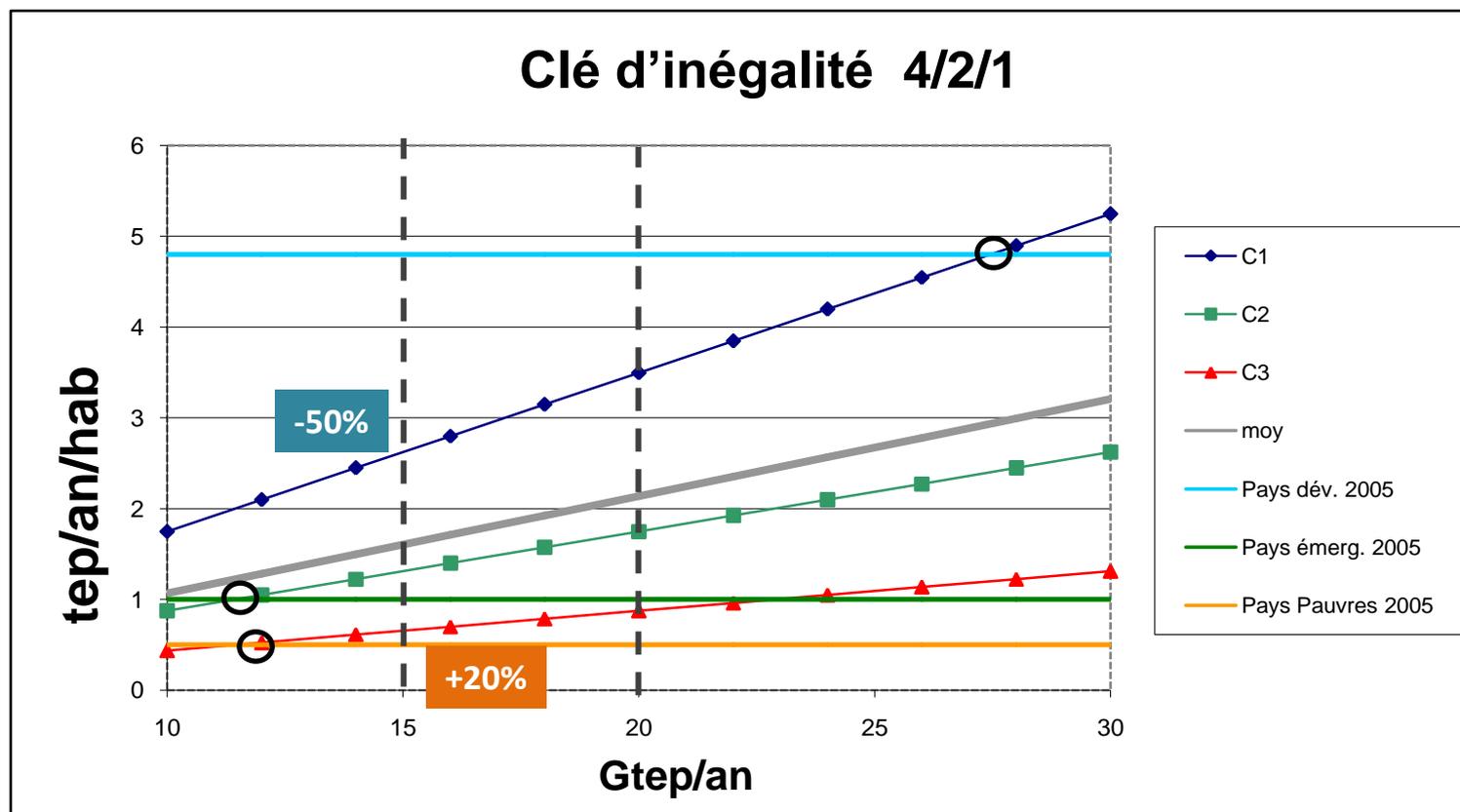
La contrainte climatique fait peu appel à la substitution énergétique, mais plutôt à une réduction de consommation

Cela provient souvent du fait que le nucléaire est « simulé » pour ne pas se développer, par un prix intangible reflétant la non acceptabilité

Figure ES.2 ► Comparaison du scénario de stabilisation à 450 ppm du *World Energy Outlook 2007* et du scénario BLUE Map, 2005-2050



Sensibilité à la consommation totale d'énergie



Dans ces conditions, sera-t-il acceptable et accepté de répondre à la contrainte climatique ?

- Consensus : une transition énergétique incontournable d'ici 2050
- Le monde aspire à consommer 25 Gtep/an au moins, 20 Gtep/an sera déjà difficilement acceptable
- Réduction des émissions de CO₂ d'un facteur ~2 à l'horizon 2050
- Nouvelle donne
 - La transition n'est plus contrainte par la nature (réserves de fossiles trop importantes pour le climat)
 - Cela demande à agir « sans contrainte » imposée
 - Le développement des pays émergents semble plus rapide que prévu, et semble durer

On ne peut plus imaginer une transition douce, gérée par le marché seul et la « finitude » des ressources fossiles

Un scénario « renouvelable » pour l'Europe



ROADMAP 2050
A PRACTICAL GUIDE TO A PROSPEROUS,
LOW-CARBON EUROPE

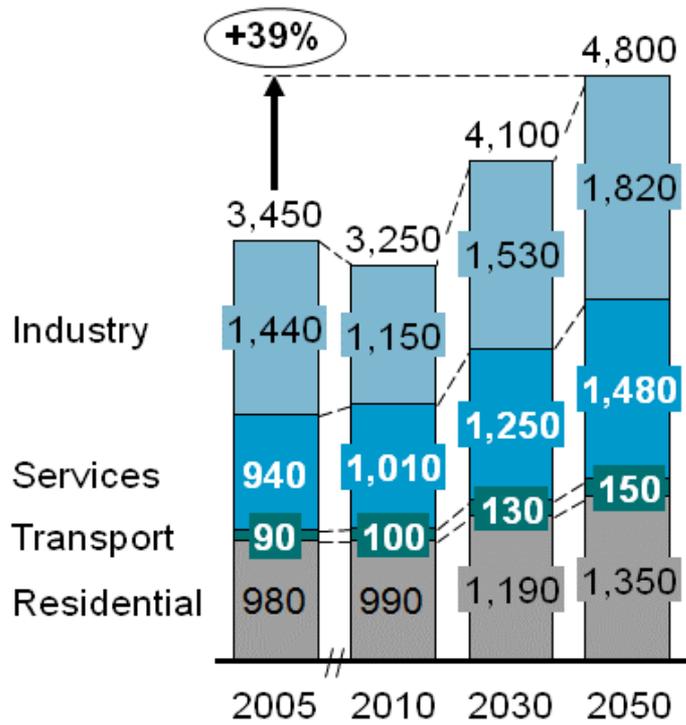
THE MISSION OF ROADMAP 2050
IS TO PROVIDE A PRACTICAL,
INDEPENDENT AND OBJECTIVE
ANALYSIS OF PATHWAYS TO ACHIEVE
A LOW-CARBON ECONOMY IN EUROPE,
IN LINE WITH THE ENERGY
SECURITY, ENVIRONMENTAL AND
ECONOMIC GOALS OF THE EUROPEAN
UNION.

European Climate Foundation

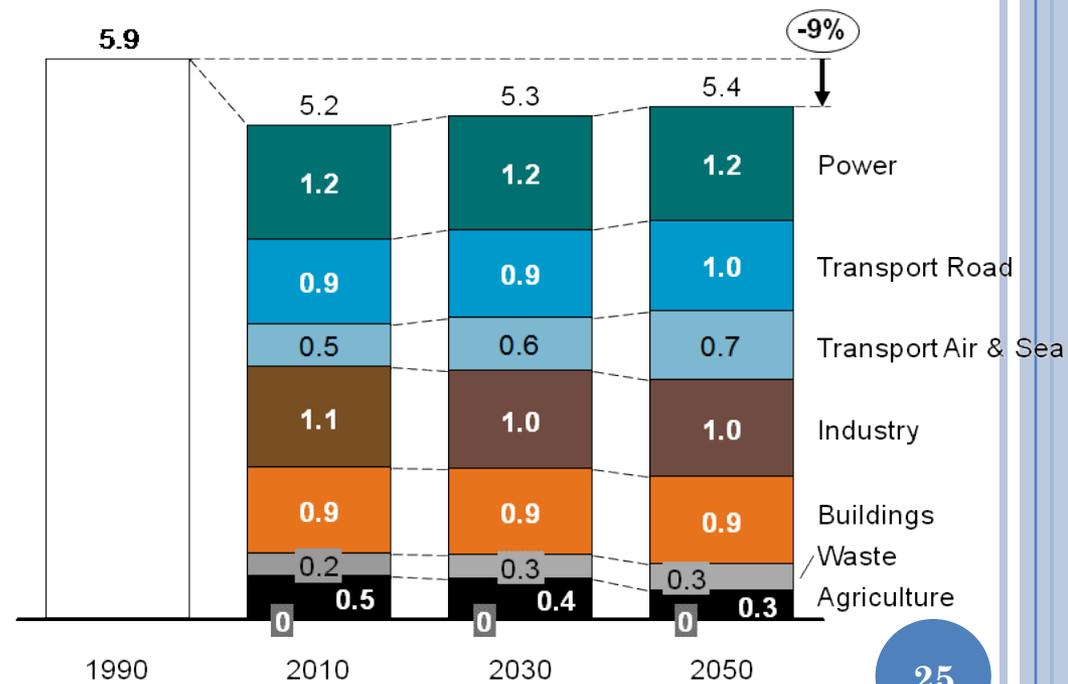
Scénario baseline pour l'électricité

Power demand

TWh per year



Émissions de CO2 Gt/an

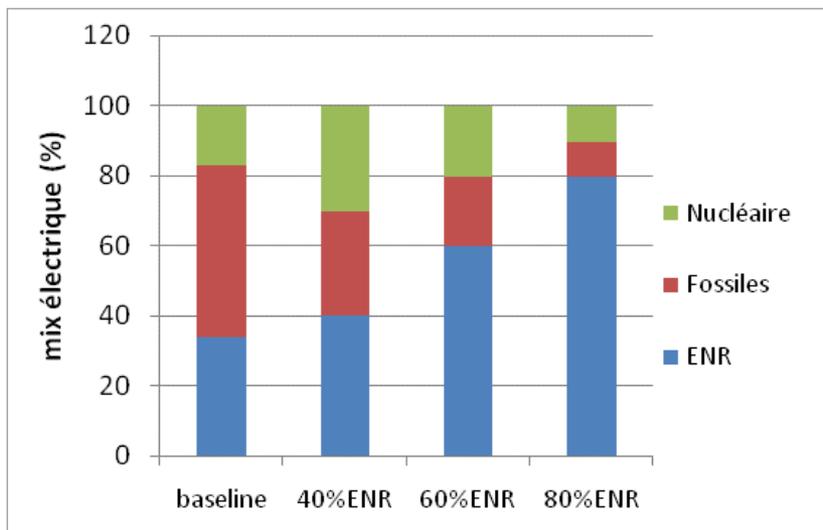


Analyse du potentiel de réduction d'émission pour chaque secteur

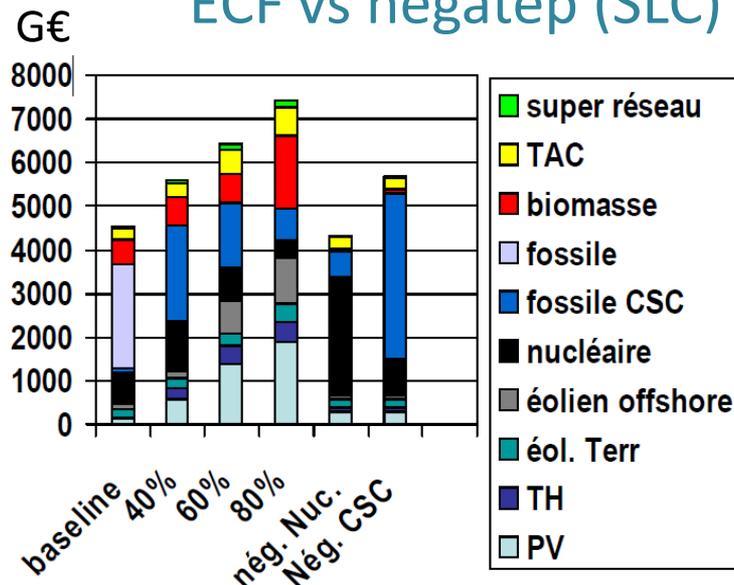


European Climate Foundation : électricité

un scénario de fort déploiement de renouvelable



ECF vs négatep (SLC)



Surcoût important
Même avec des hypothèses optimistes

(M€/GW)	ECF 2010 / 2050	Negatep 2010 / 2050
Éolien Onshore	1150 / 1050	1500 / ~1400
PV	2550 / 1000	5000 / ~2500

UN SCÉNARIO EUROPÉEN

European Climate Foundation : électricité

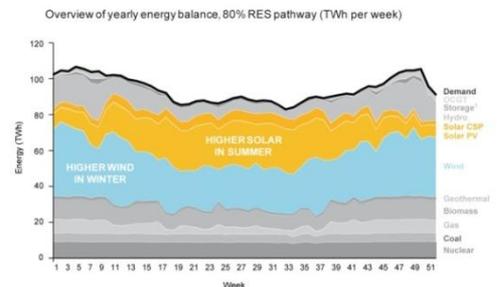
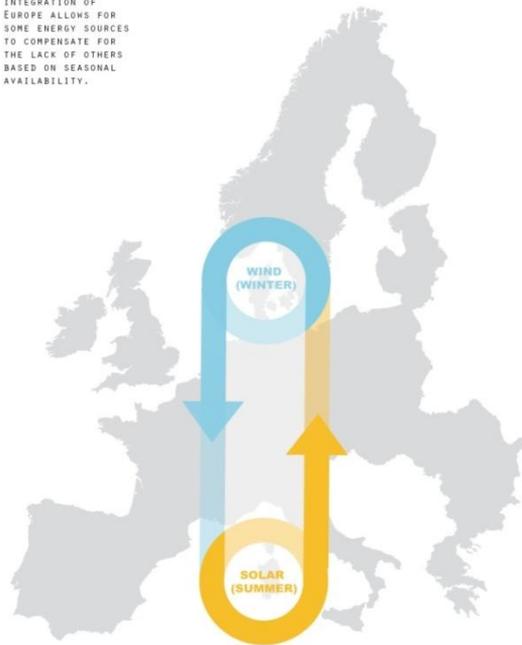
Enseignement : impact sur le réseau électrique



ROADMAP 2050
A PRACTICAL GUIDE TO A PROSPEROUS,
LOW-CARBON EUROPE

THE MISSION OF ROADMAP 2050
IS TO PROVIDE A PRACTICAL,
INDEPENDENT AND OBJECTIVE
ANALYSIS OF PATHWAYS TO ACHIEVE
A LOW-CARBON ECONOMY IN EUROPE,
IN LINE WITH THE ENERGY
SECURITY, ENVIRONMENTAL AND
ECONOMIC GOALS OF THE EUROPEAN
UNION.

OVER THE COURSE
OF THE YEAR, THE
INTEGRATION OF
EUROPE ALLOWS FOR
SOME ENERGY SOURCES
TO COMPENSATE FOR
THE LACK OF OTHERS
BASED ON SEASONAL
AVAILABILITY.



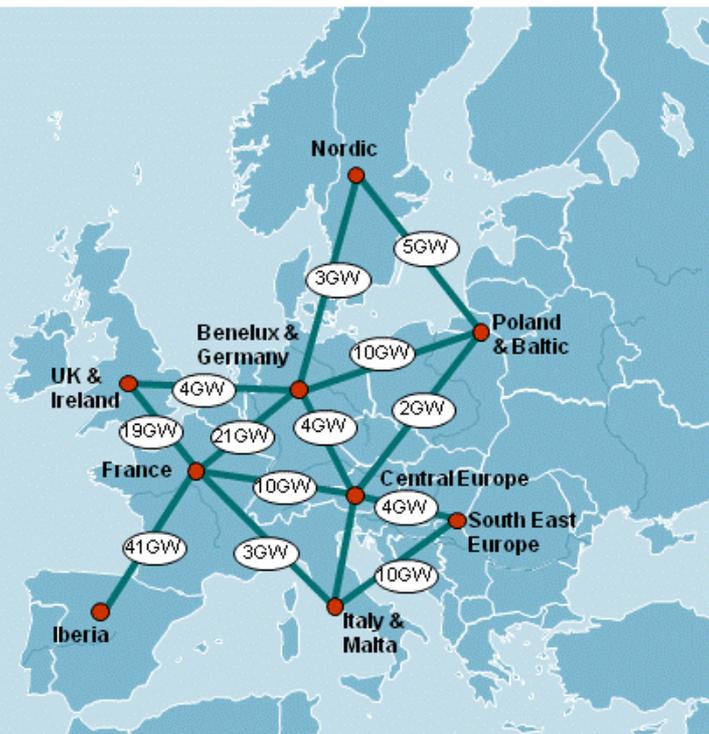
¹ Storage included in the model relates to the existing hydro storage available across the regions
SOURCE: Imperial College, IESM, Roadmap 2050 Technical Analysis

Production d'électricité

-80% d'émission CO₂

ENR 40% / 60% / 80%

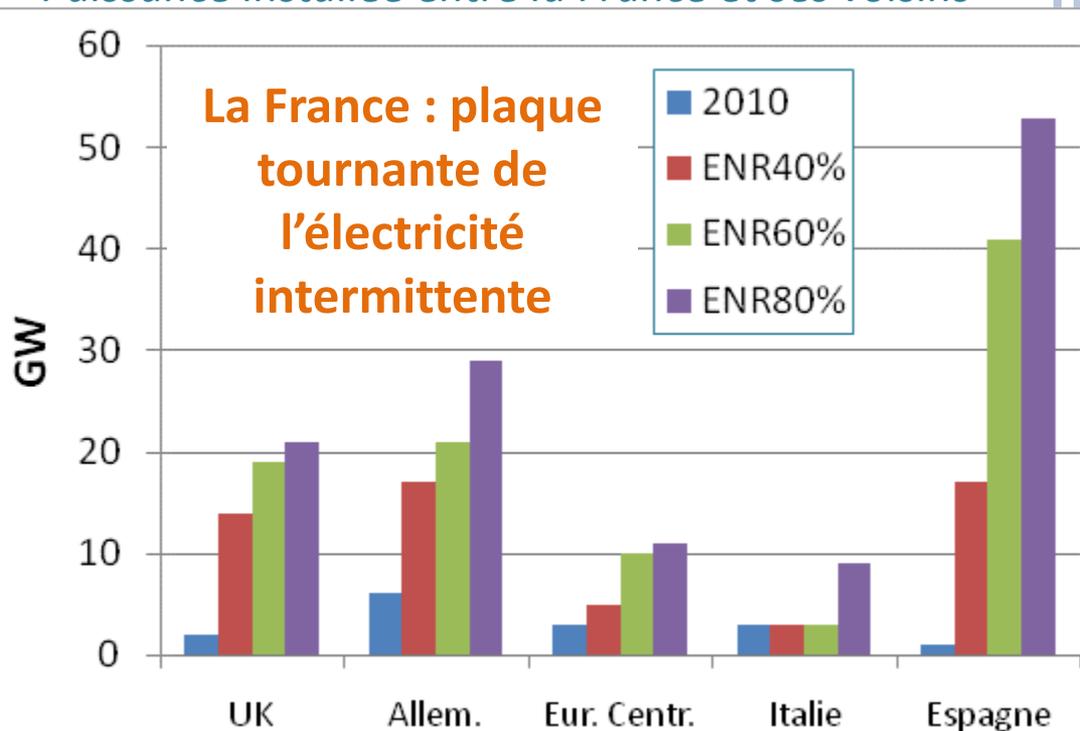
60% ENR



Un déploiement impressionnant du réseau électrique

Mais le coût reste négligeable par rapport à l'investissement pour la production

Puissance installée entre la France et ses voisins

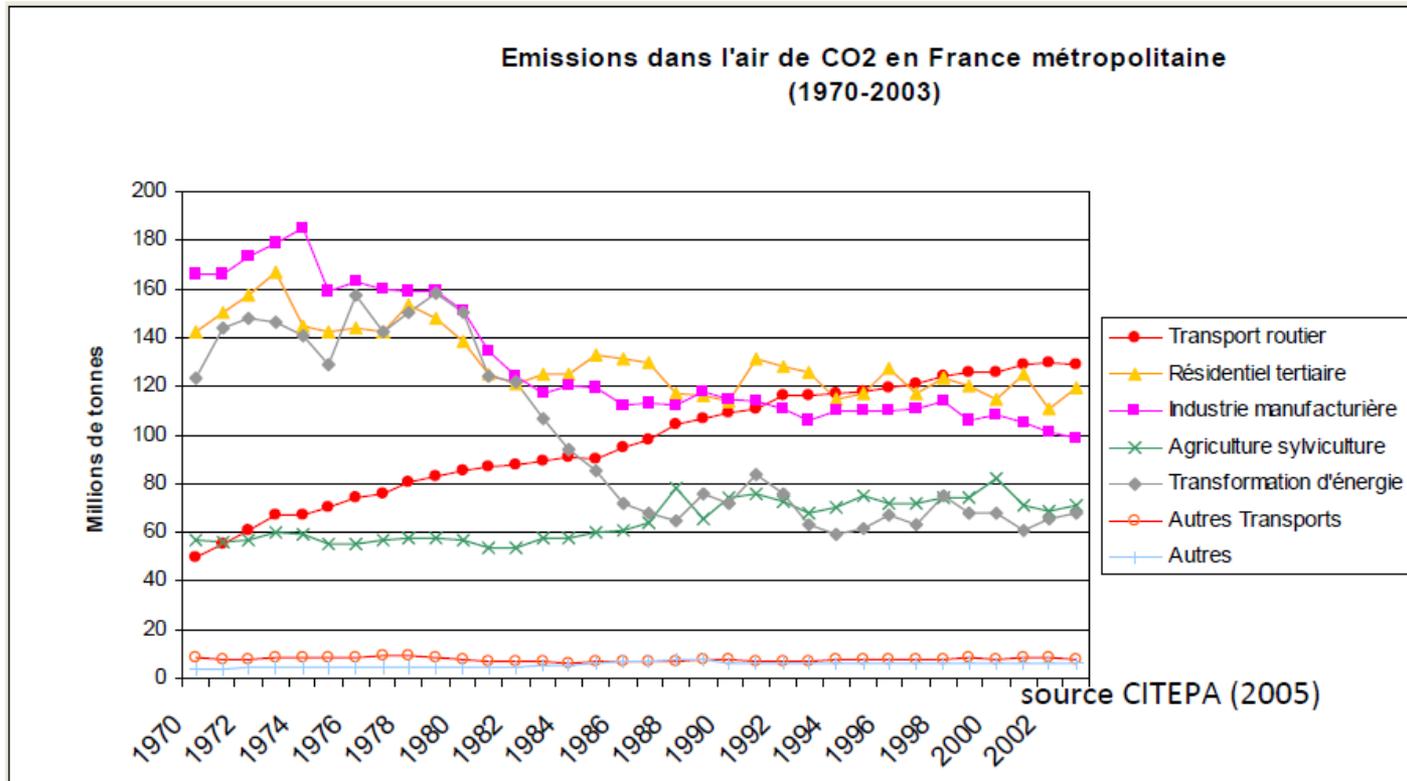




Un scénario détaillé pour le résidentiel / tertiaire

Des émissions relativement basses par rapport aux autres pays industrialisés
Nucléaire, délocalisation de l'industrie?

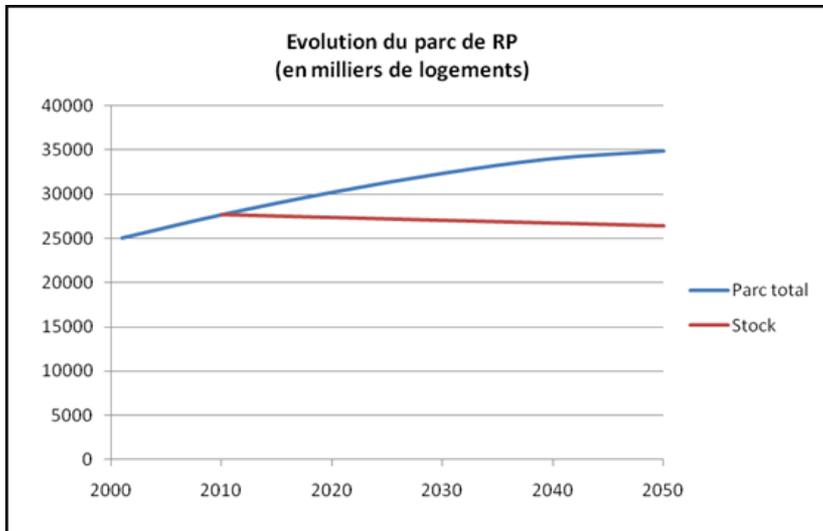
Des secteurs à fort potentiel de réduction : résidentiel / tertiaire (la consommation peut être réduite sans peser sur la croissance, importation pétrole, gaz, ...)



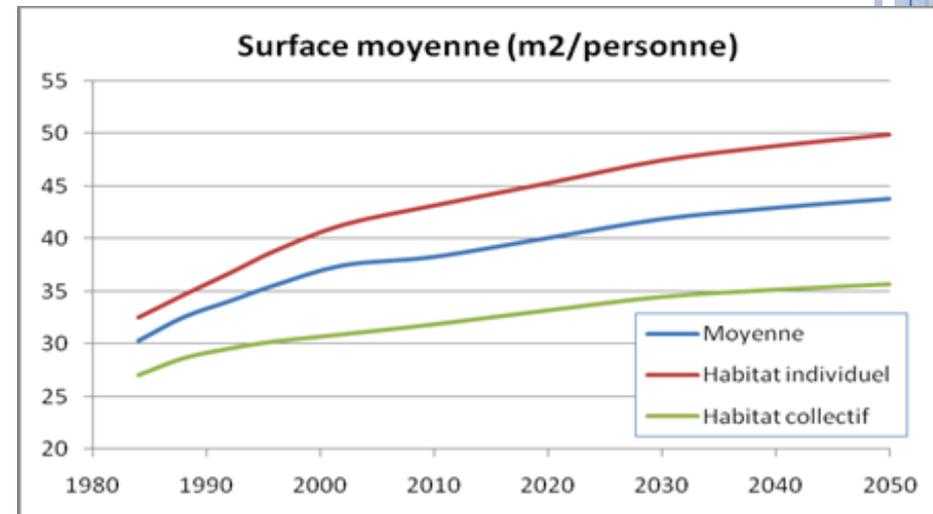
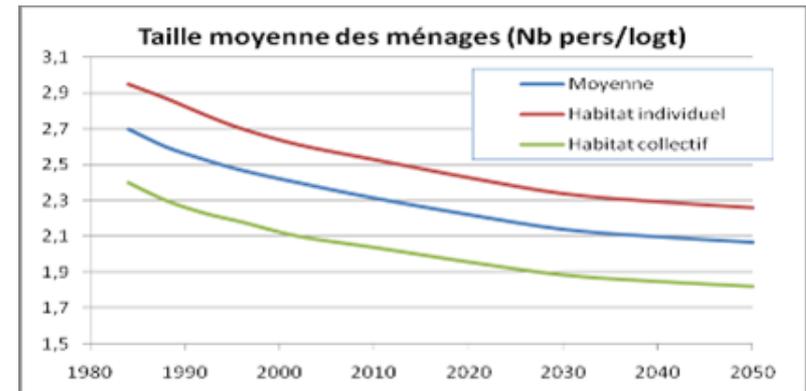
Un scénario détaillé pour le résidentiel / tertiaire

Réf : **JP Traisnel**, Cahiers du CLIP n°20, *Le facteur 4 dans l'habitat*, école Energies et Recherches 2010, <http://eer.in2p3.fr>

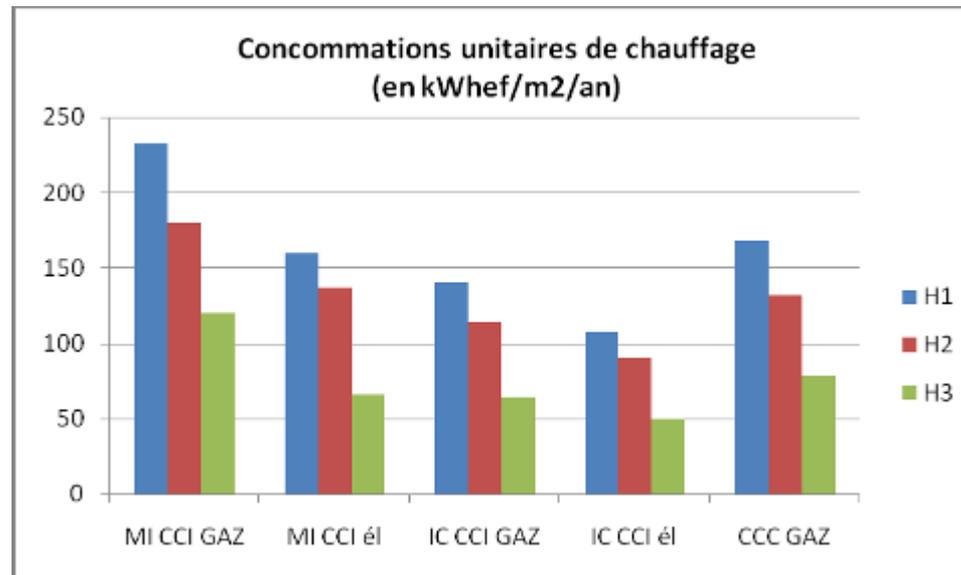
Le nombre de logement augmente
La surface / hab aussi



30 millions de logement
+300000 neufs / an
Mais seulement -30000/an



Un scénario détaillé pour le résidentiel / tertiaire



Consommations unitaires (par m² SHAB) moyennes de chauffage en 2005 selon la zone climatique, la typologie, et l'équipement de chauffage

Source : Energies Demain

MI : maison individuelle ; IC : logement en immeuble collectif

CCI : chauffage central individuel ; CCC : chauffage central collectif

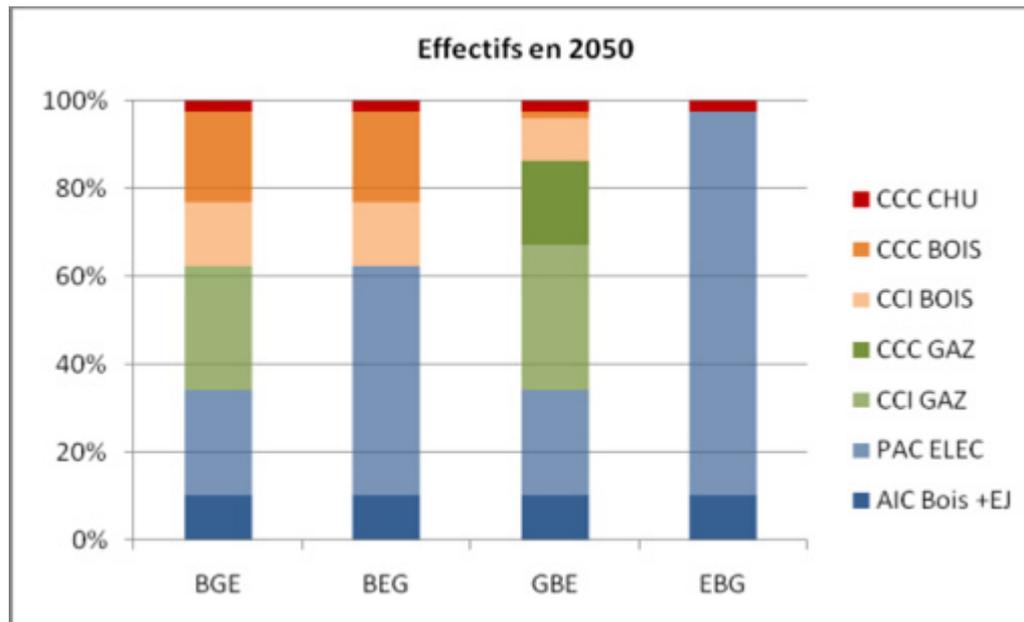
Un scénario détaillé pour le résidentiel / tertiaire

4 scénarios

- BOIS / GAZ / ELEC
- BOIS / ELEC / GAZ
- GAZ / BOIS / ELEC
- ELEC / BOIS / GAZ

Distinction urbain/rural

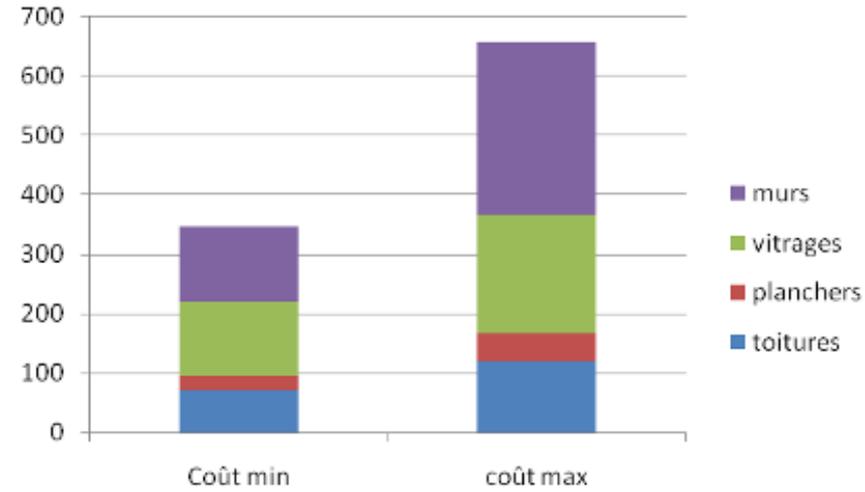
Élec : recours massif aux Pompes à chaleur



Une feuille de route
précise, détaillée, région par région
Estimation des coûts

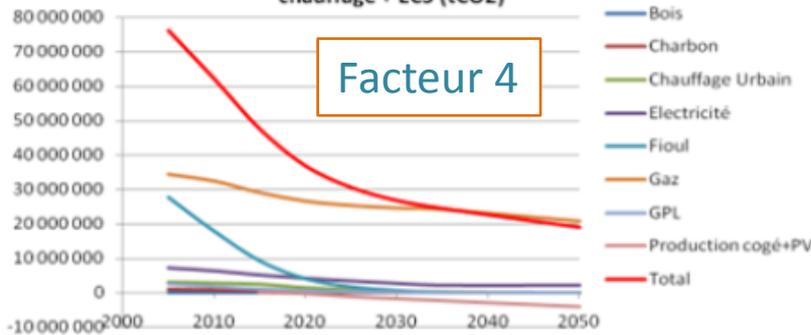
Résultat : développer le bois
et l'électricité

Coûts réhabilitation bâti en G€



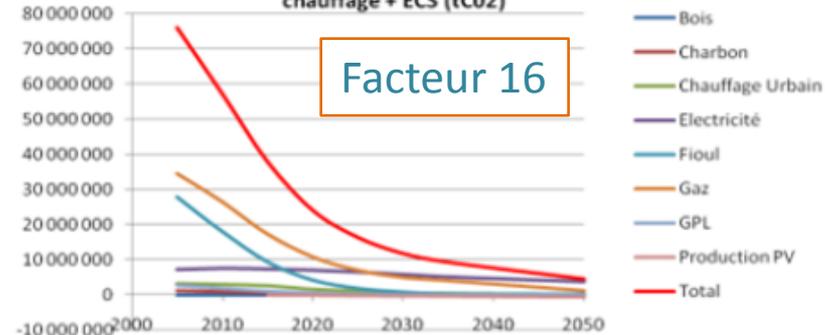
scenario bois/gaz/élec
chauffage + ECS (tCO2)

Facteur 4



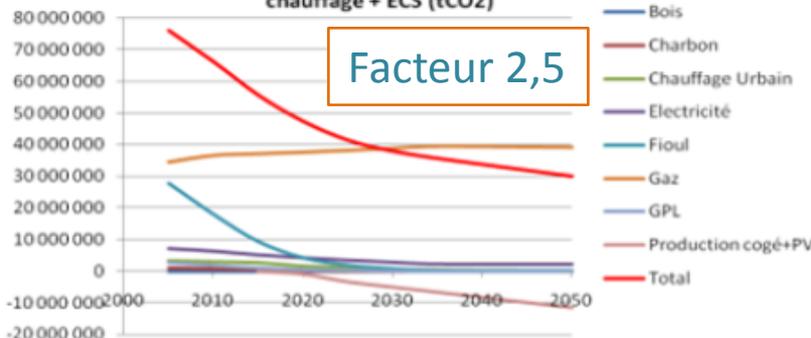
scenario bois/élec/gaz
chauffage + ECS (tCO2)

Facteur 16



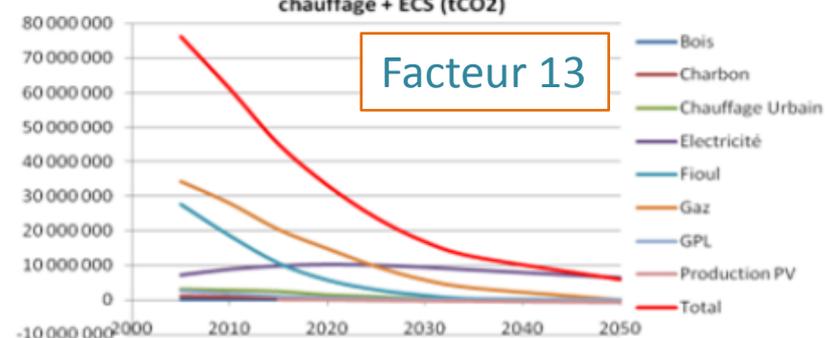
scenario gaz/bois/élec
chauffage + ECS (tCO2)

Facteur 2,5



scenario élec/bois/gaz
chauffage + ECS (tCO2)

Facteur 13



Comment « nous » convaincre de renoncer à des ressources énergétiques peu chères, faciles d'accès et faciles d'utilisation ?...

Rendre acceptable les efforts à mener sur les diverses technologies alternatives (les contraintes seront visibles, pas les avantages climatiques)

La libéralisation du marché de l'électricité vs la (tentative de) reprise en main des états (Kyoto, Copenhague, ...)

Réduire la consommation d'énergie n'est pas toujours réduire les émissions de CO2, il faut choisir la priorité et ne pas confondre les objectifs

Comment s'y retrouver ?...

Sommes-nous la vaillance, ou le dernier coquelicot ?

Alain Bashung



36