

Energie et transport : une esquisse de vue globale

Données du problème

- Des marchés mondiaux de l'énergie
- Des réserves de charbon doubles de celles du gaz, lui-même le double du pétrole
- Une croissance de la demande forte en l'absence de hausse des prix
- Substituabilités plus ou moins importantes selon les usages
- Elasticités prix très différentes de la demande

Réserves

- Réserves prouvées, nettes de la consommation du passé
- Ordres de grandeur
- Pétrole : 1500 à 2000 G éq. barils
- Gaz : environ 2000 G éq. barils
- Charbon : 4000 à 8000 G éq. Barils

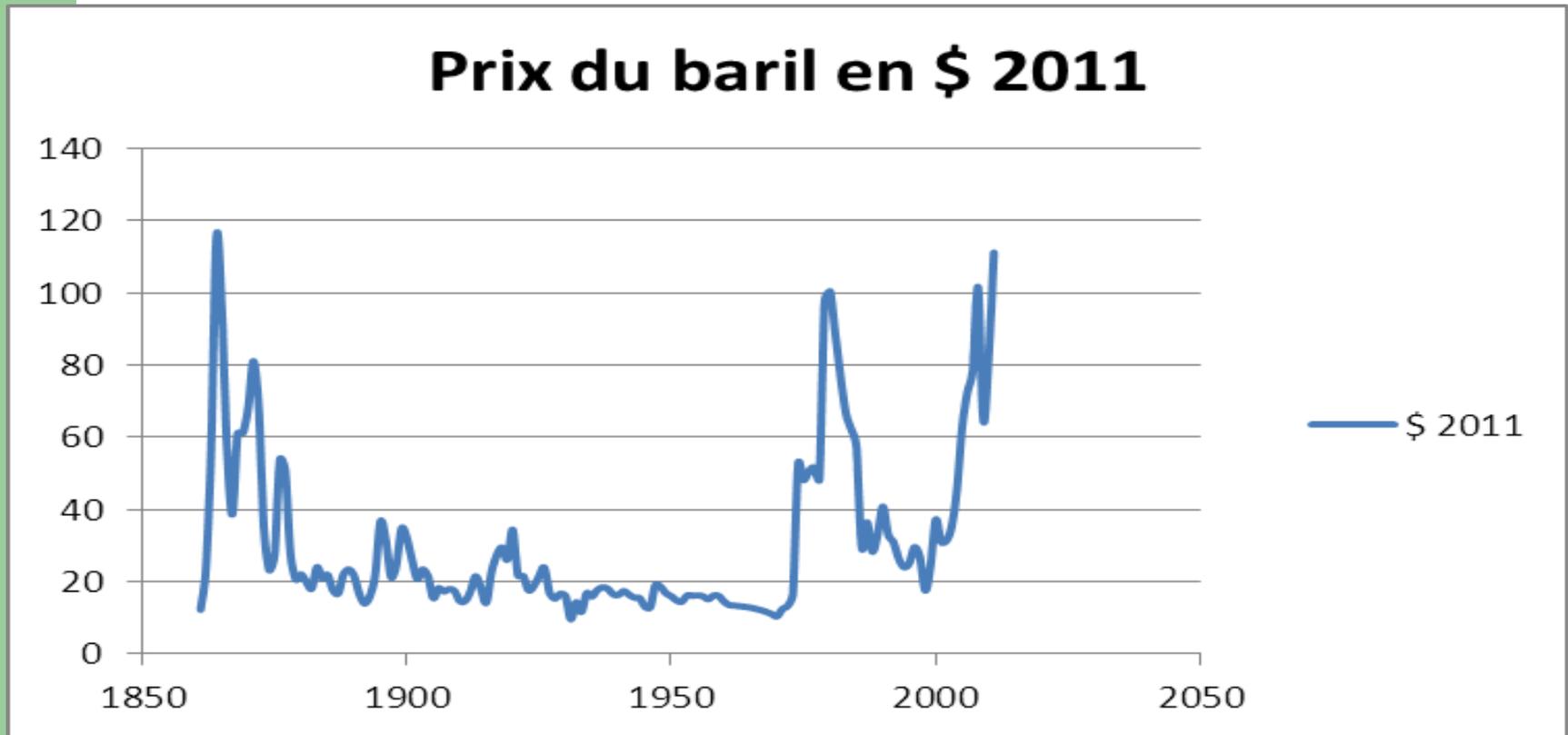
Transports

- Les véhicules automobiles devraient rester majoritaires pendant longtemps compte tenu des contraintes posées par les modes collectifs aux utilisateurs
- Pour les véhicules automobiles, l'idéal est une source d'énergie avec fort pouvoir calorifique par kg et de préférence liquide pour en simplifier la logistique
- Le pétrole convient très bien, mais d'autres carburants peuvent faire l'affaire : Coal to liquid, gaz to liquid, biocarburants
- Véhicule hybride rechargeable pour les usages du quotidien pourrait permettre une solution à coût pas trop déraisonnable (batteries en quantité raisonnable)
- Enjeu fiscal lourd du fait du poids de la TIPP (4eme impôt, 25 GE/an environ)

Pétrole

- Aujourd'hui presque la moitié du pétrole est utilisée pour d'autres usages que les transports
- Les usages autres que transports et pétrochimie sont plus facilement substituables
- Réserves/production = 50 ans mais le « Peak oil » est probablement assez proche (2015-2030)

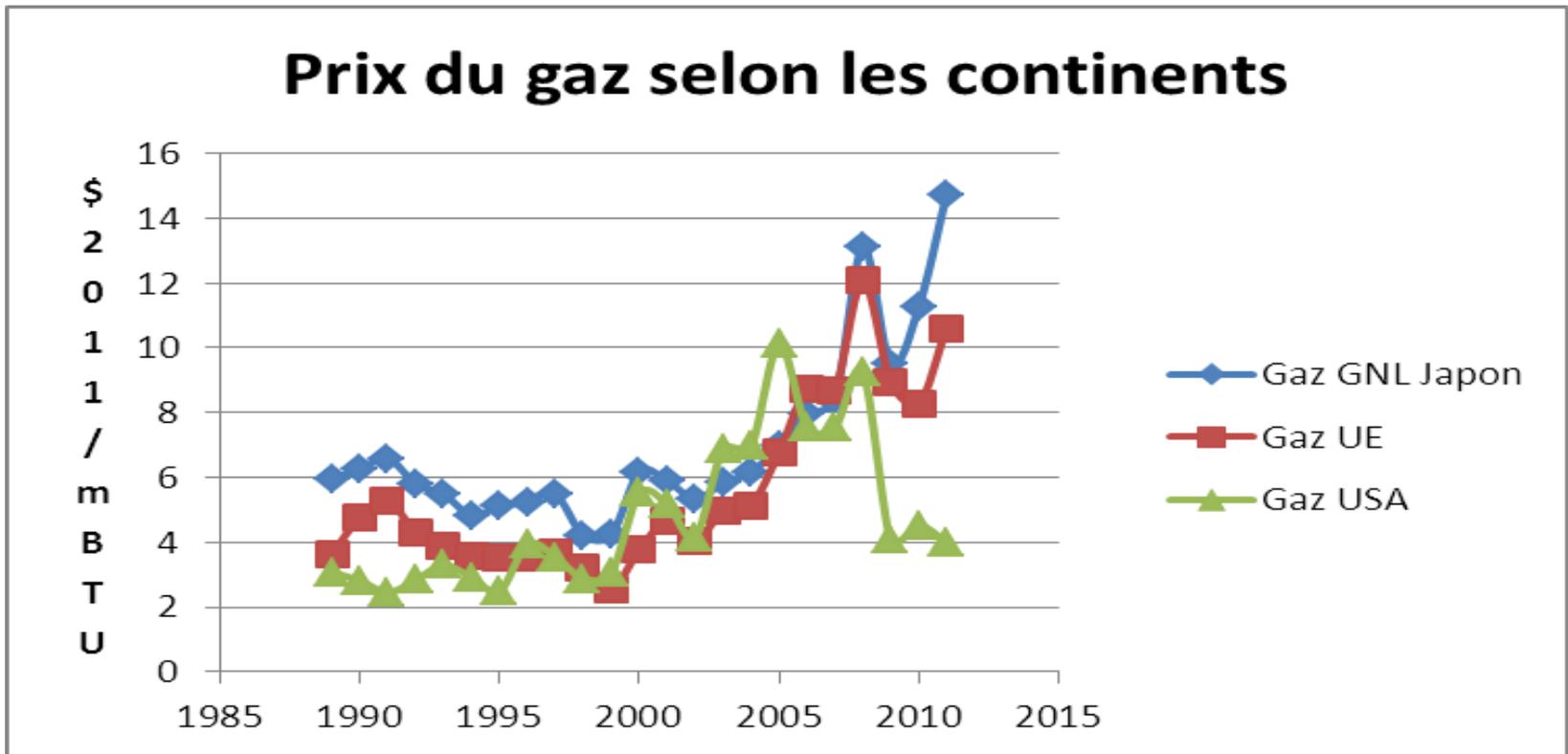
Des prix du pétrole à la hausse malgré la crise économique



Gaz

- Des réserves plus importantes, réserves/production = 60 années
- Mais, un « peak gaz » probablement « plat » du fait des contraintes logistiques (gazoducs), vers 2030 environ
- Pas de marché mondial du fait de la faible part du GNL (gaz naturel liquéfié)
- Abondance en Amérique du Nord (gaz de schiste), d'où effondrement des prix

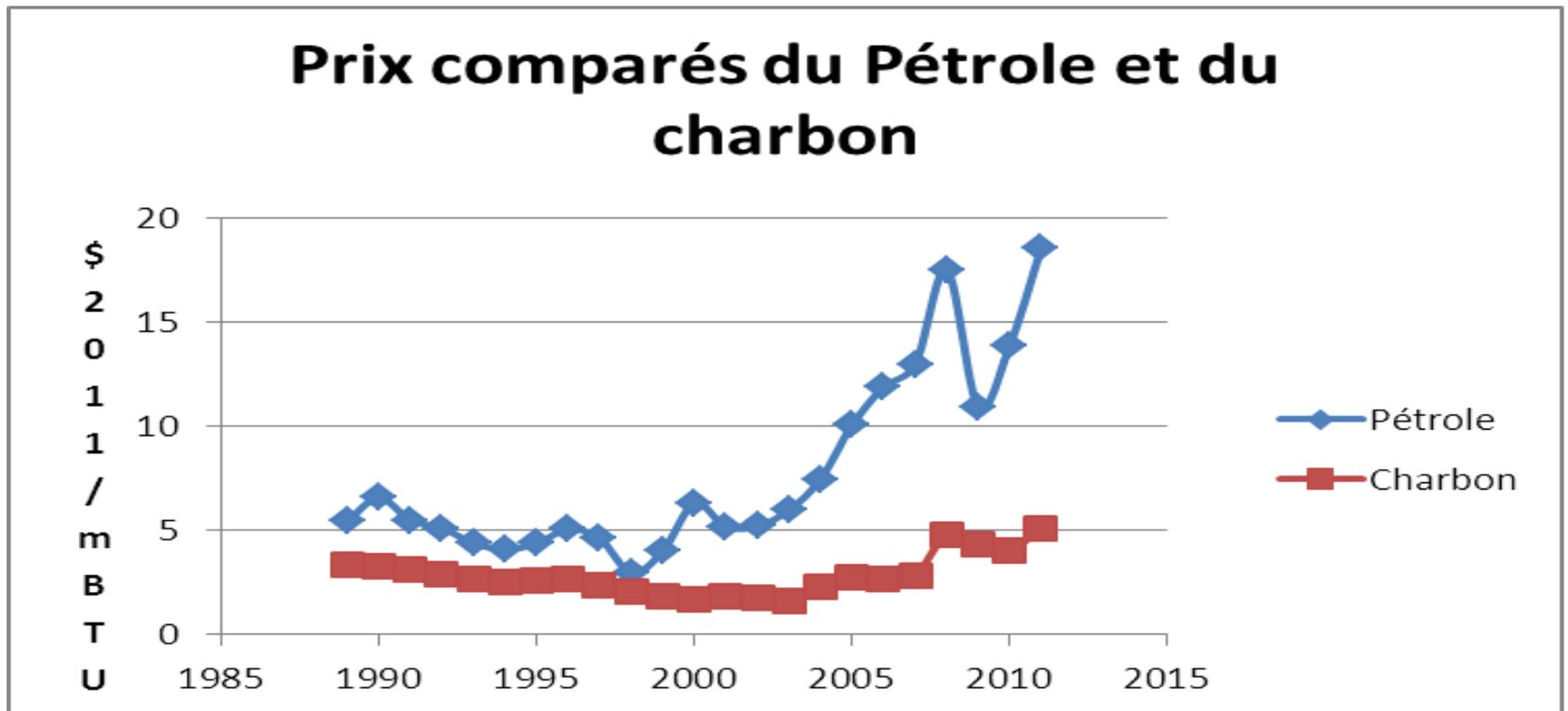
Evolutions contrastées du prix du gaz selon les continents



Charbon

- Les plus importantes réserves de combustible fossile et de loin (réserves/production > 1 siècle)
- Mais le plus polluant aussi...
- Surtout les variétés de type Lignite (brown coal)
- Transformable en liquide (CTL) si besoin dans les transports ou autres usages spécifiques
- Mais « Peak coal » vers 2050 environ compte tenu de l'intensification probable de son usage
- « Peak Anthracite » avant; il ne restera plus vraisemblablement que les variétés mauvaises (faible pouvoir calorifique par tonne, présence d'impuretés...)

Différence de prix pétrole charbon Multipliée par 6 en 20 ans



Matrices énergie usage

- Reconstitue les consommations d'énergie primaire par source et par usage
- Au plan mondial
- Permet de prendre en compte les évolutions de la demande, les contraintes de chaque source et de chaque usage principal

Energie usage en 2003

G barils / an	Pétrole	Gaz	Charbon	Nucléaire	Hydroelec	Renouv.	Total
Transports et agriculture	14	0	0	0	0	0	14
Chauffage	8	7	5	1	0,5	4	25,5
Electricité spécifique	2	3	5	3	3	0,5	16,5
Industrie et chimie	2	3	5	1	0	0,5	11,5
Autres usages	1	1	1	0	0	1	4
Total	27	14	16	5	3,5	6	71,5

Ultra-dépendance du pétrole pour les transports

La moitié du pétrole est consommée hors des transports

Un tiers de l'énergie part en chauffage, souvent pour chauffer la rue...

Energie usage en 2011

G barils / an	Pétrole	Gaz	Charbon	Nucléaire	Hydroelec	Renouv.	Total
Transports et agriculture	16,5	0,5	0,5	0	0	0	17,5
Chauffage	8	8,5	7	1	0,5	5	29,5
Electricité spécifique	2	3,5	7,5	3	4	1	21
Industrie et chimie	2	3,5	7,5	1	0	0,5	14,5
Autres usages	1	1,5	1,5	0	0	1	5
Total	29,5	17,5	24	5	4,5	7	87,5

Ultra-dépendance du pétrole pour les transports, mais émergence gaz, charbon

Réduction de la part du pétrole consommée hors des transports

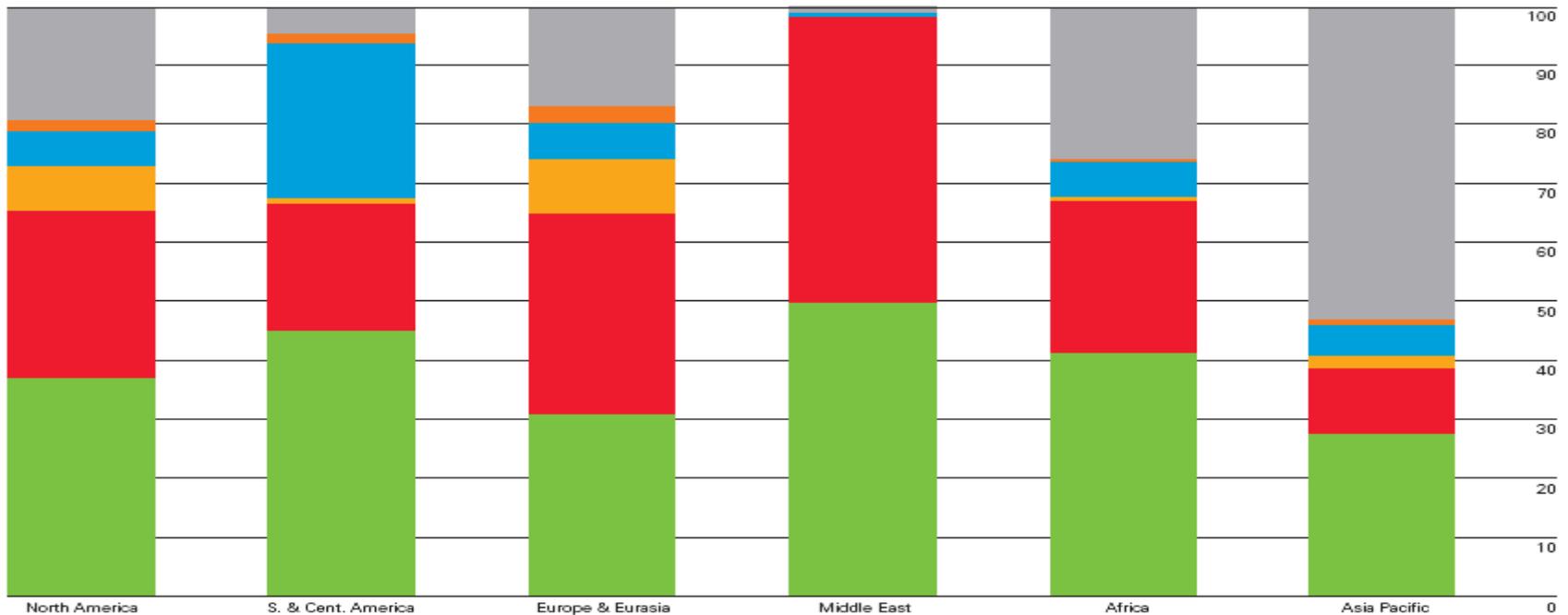
Forte croissance du charbon (+8 G barils)

Croissance moyenne du gaz et faible du pétrole

Mix énergétique très contrastés par région

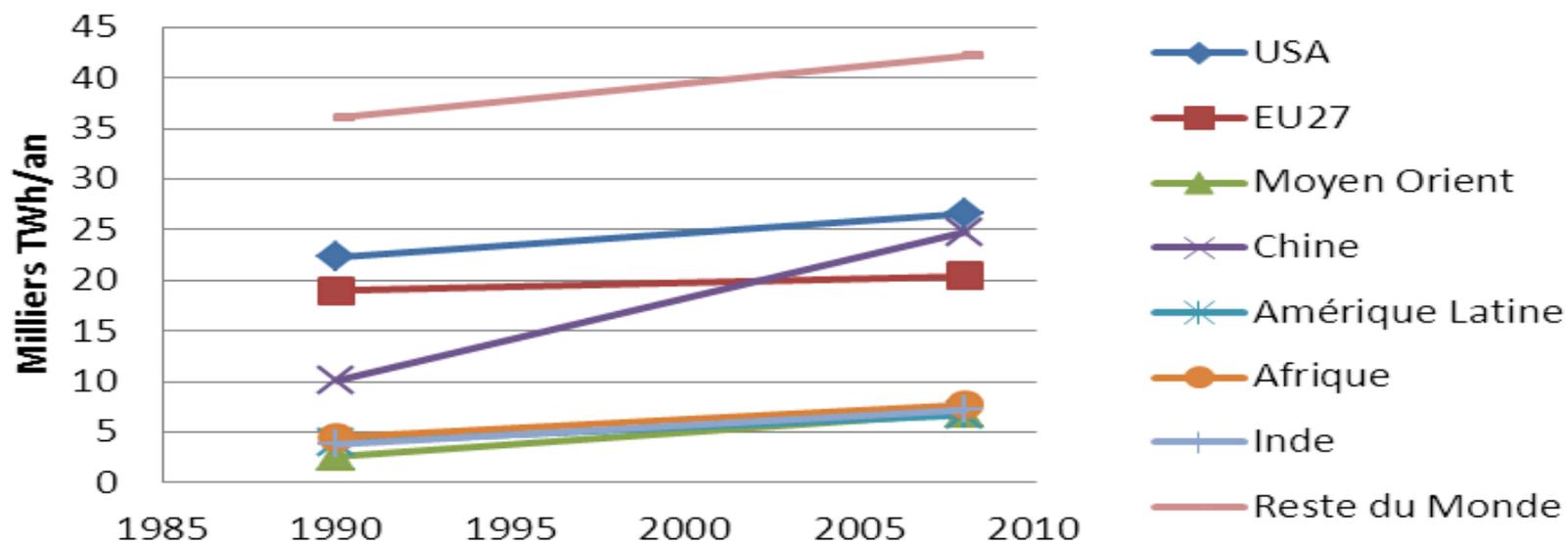
- Coal
- Renewables
- Hydroelectricity
- Nuclear energy
- Natural gas
- Oil

Regional consumption pattern 2011
Percentage



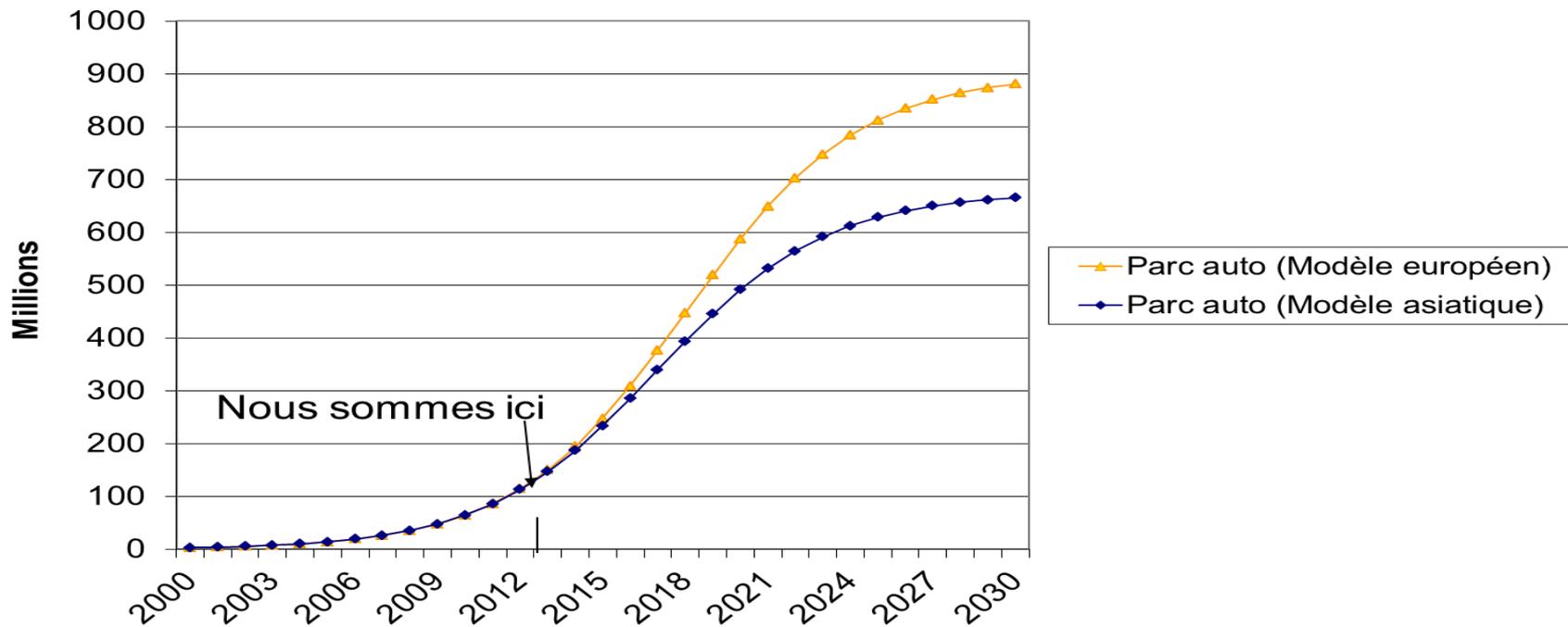
La soif énergétique chinoise

Evolution de la consommation énergétique selon les zones



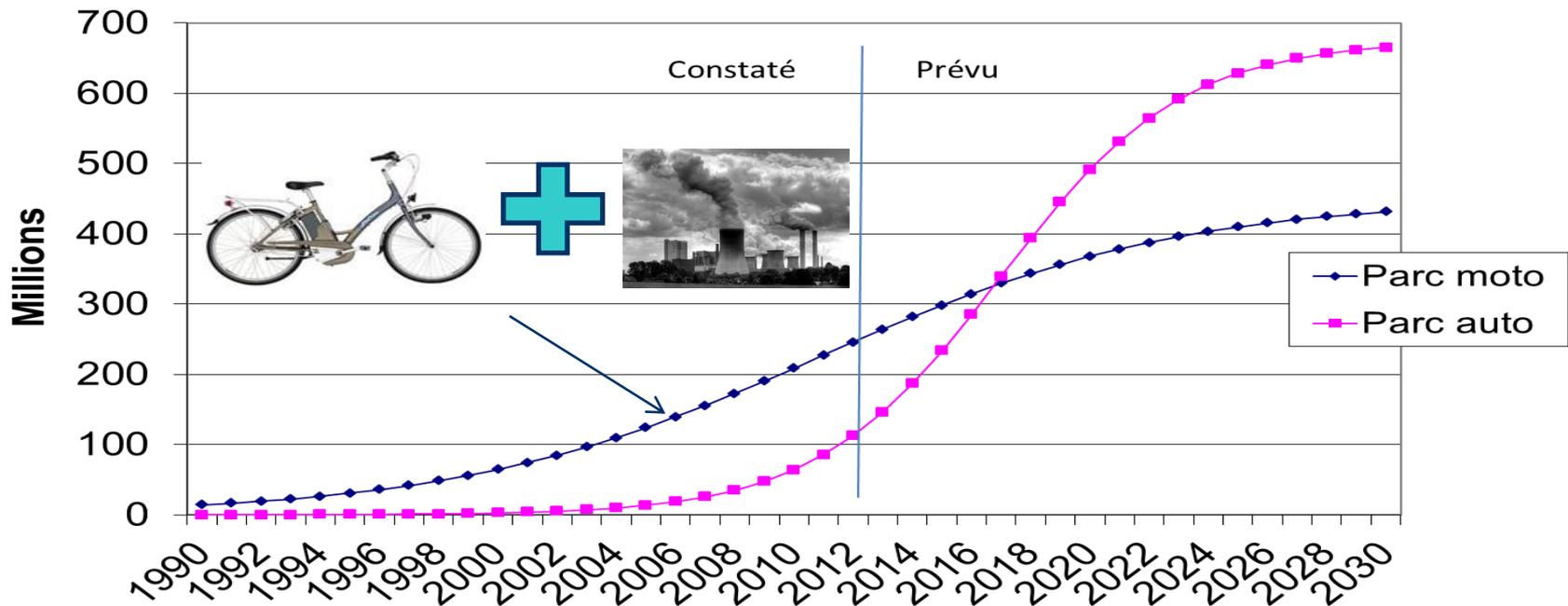
Le parc automobile chinois

Projections du parc automobile chinois

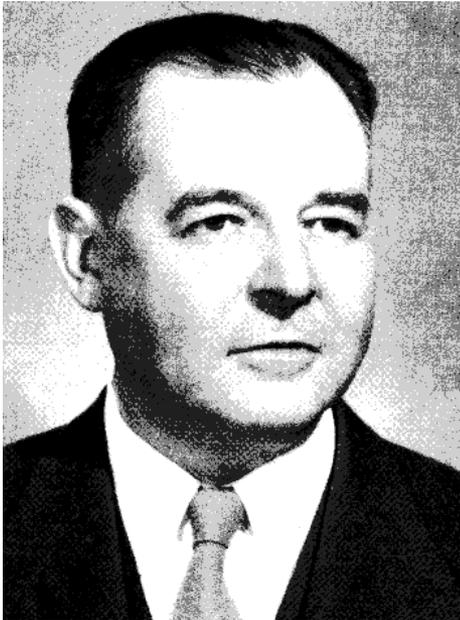


Mais l'auto n'est pas le moyen de transport majoritaire en Chine

Parc automobile et motocyclette électrique en Chine



Harold Hotelling (1895-1973)



$$P'/P=r$$

Valeur actualisée du profit
constante dans le temps

Règle de Hotelling (1931)

- Le prix (au-delà du coût marginal) de la ressource non renouvelable augmente comme le taux d'intérêt
- A la fin du monde, la dernière goutte est utilisée
- Principales hypothèses : Pas de risque, concurrence parfaite
- Raisonnement : arbitrage entre extraction et placement monétaire (cf. annexe)

Limites de la règle de Hotelling

- Incertitudes sur les quantités de ressources, la croissance future, la substituabilité des énergies, les technologies, l'acceptabilité du charbon et du nucléaire, ...
- Concentration géographique de certaines ressources (pétrole au Moyen-Orient, gaz en Russie ...) : possibilités de rentes de monopole
- A l'inverse, le charbon est réparti de manière équilibrée et ses coûts marginaux d'extraction maîtrisés

Le prix du pétrole peut-il monter indéfiniment ?

- A moyen long terme :
- Prix énergie dans les transports (pétrole) doit être inférieur au minimum des 3 :
- Prix énergie solide (charbon) + Coût de la transformation CTL (+ Malus environnemental)
- Prix énergie gaz + coût de la transformation GTL
- Prix de substitution des autres usages du pétrole
- → Mais possibilités d'épisodes tendus de quelques années le temps de mettre en place des capacités de production

Un scénario pour le prochain siècle

- Des usages plus ou moins élastiques au prix :
- Transports : peu élastique ($e = - 0,2$)
- Electricité spécifique : peu élastique ($e = - 0,2$)
- Autres usages (chauffage, industrie,...) plus élastiques : ($e = - 0,6$)
- Raisonnement en Energie primaire

Hypothèses utilisées

- Respect des réserves prouvées pour les combustibles fossiles
- Transition utilisant les réserves de pétrole, gaz et charbon, puis renouvelables
- Un peu de nucléaire, croissant, incertain en quantité mais probablement pas déterminant

Renouvelables



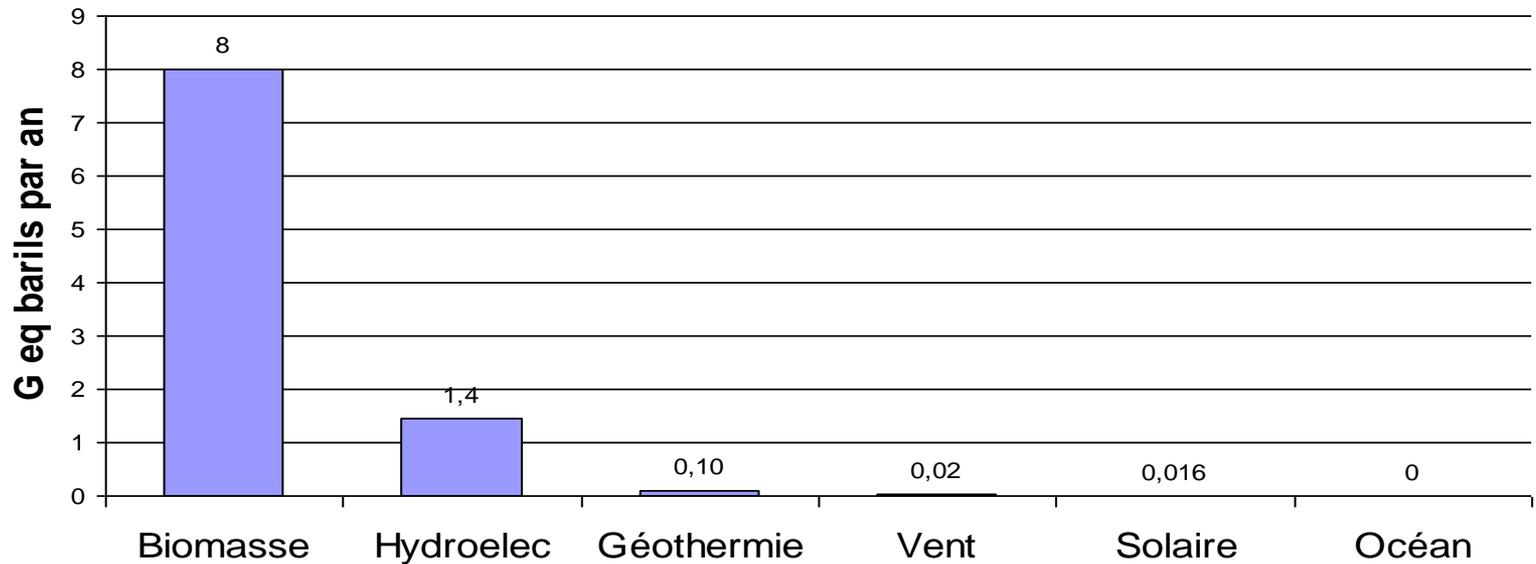
- Aujourd'hui, c'est essentiellement le bois à plus de 80%
- Un potentiel énorme mais...
- Peu utilisé aujourd'hui car nettement plus cher que l'énergie fossile
- Double effet de la baisse des coûts des renouvelables (masse critique, recherche) et de la hausse des prix des énergies fossiles devrait rendre les renouvelables plus compétitives

Incertitudes sur les renouvelables

- Pourra-t-on produire assez d'énergie renouvelable ?
- Projet KombiKraftWerk.de démontre la faisabilité à l'échelle 1/10000 de la production électrique allemande entièrement renouvelable (solaire, vent, bio-gas, + stockage + intelligence)
- Passage à l'échelle 1 ?
- Sur la planète : 1 heure de soleil = consommation énergétique fossile annuelle
- Mais il faudra passer à une échelle industrielle
- Récupérer, mais surtout équilibrer offre-demande, stocker et concentrer

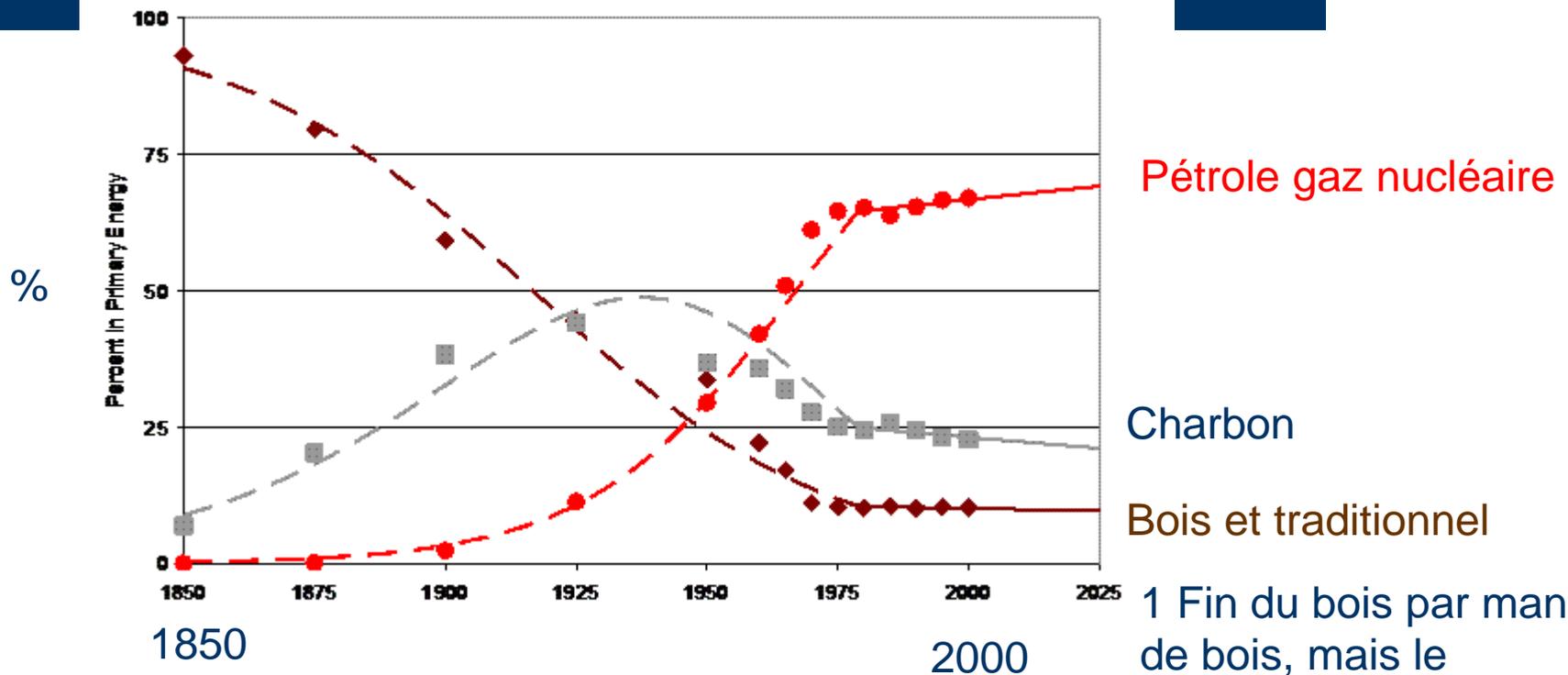
Renouvelables : surtout le bois

Energies renouvelables en 2003



La biomasse (surtout bois) reste de très loin la première source d'énergie renouvelable

Ce n'est pas la première transition énergétique

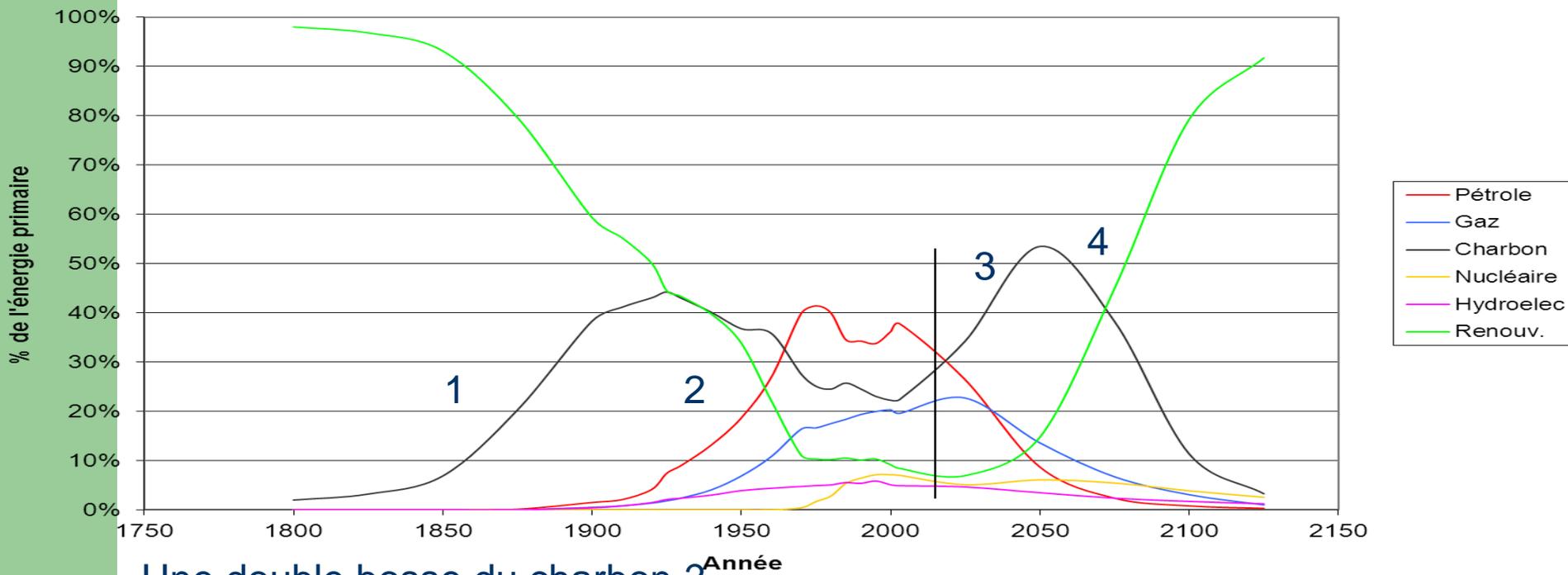


Source : Arnulf Gruebler

1 Fin du bois par manque de bois, mais le
2 Déclin du charbon n'est pas lié au manque de charbon
Alain Sauvart

4 transitions énergétiques

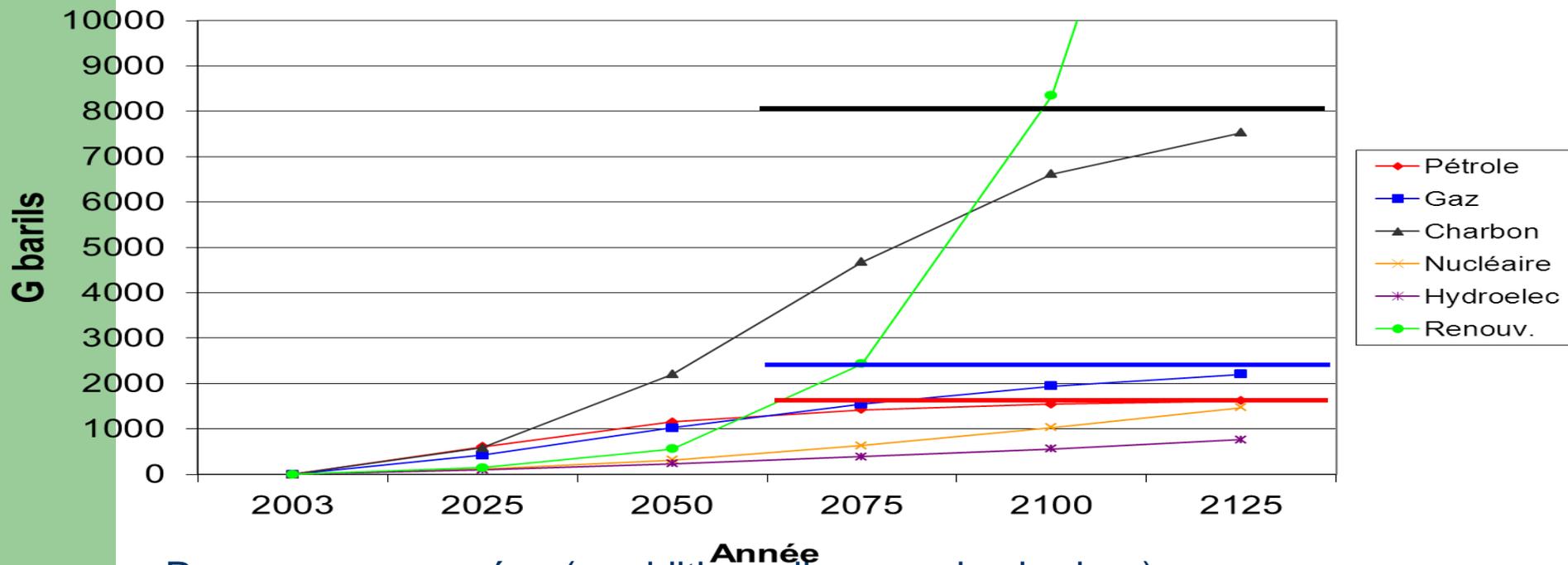
Mix énergétique (primaire)



Une double bosse du charbon ?

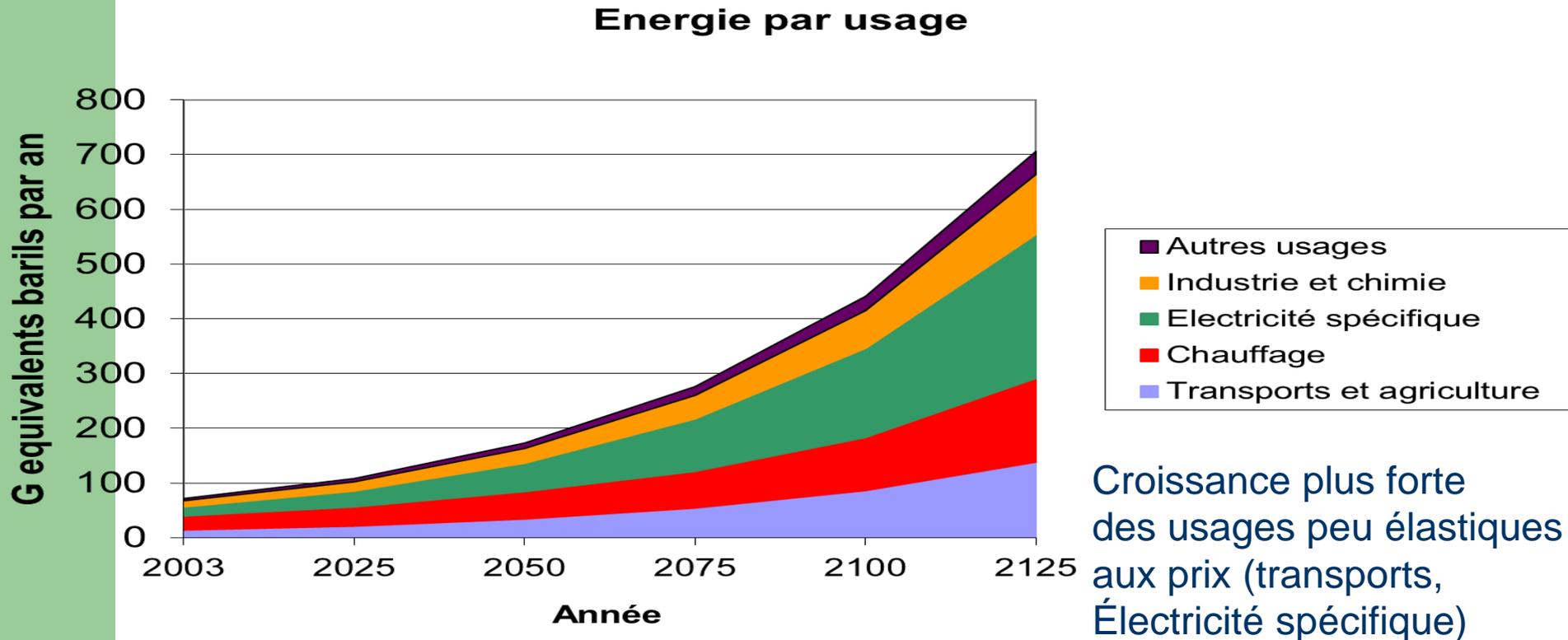
Contraintes ressources fossiles

Energie cumulée depuis 2003



Ressources prouvées (+ additionnelles pour le charbon)

Energie par usage



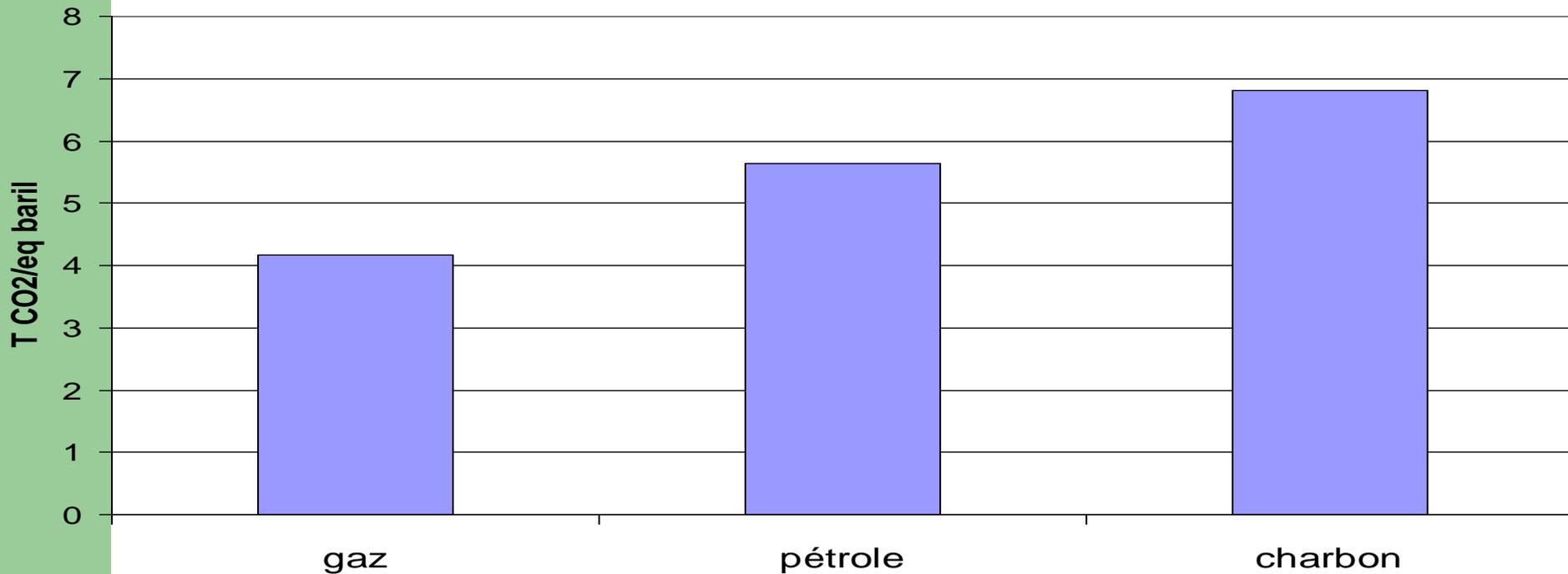
Croissance plus forte des usages peu élastiques aux prix (transports, Électricité spécifique)

Scénario de Séquestration du carbone

- Coût de la séquestration du carbone : environ 30 \$ par eq. baril (sources fixes)
- Part croissante : 0% aujourd'hui
- 20% en 2025 (un tiers du charbon)
- 60% en 2050 (l'essentiel du charbon, un tiers du gaz, un peu du pétrole)
- Une vaste logistique de transport, de stockage, de surveillance ...

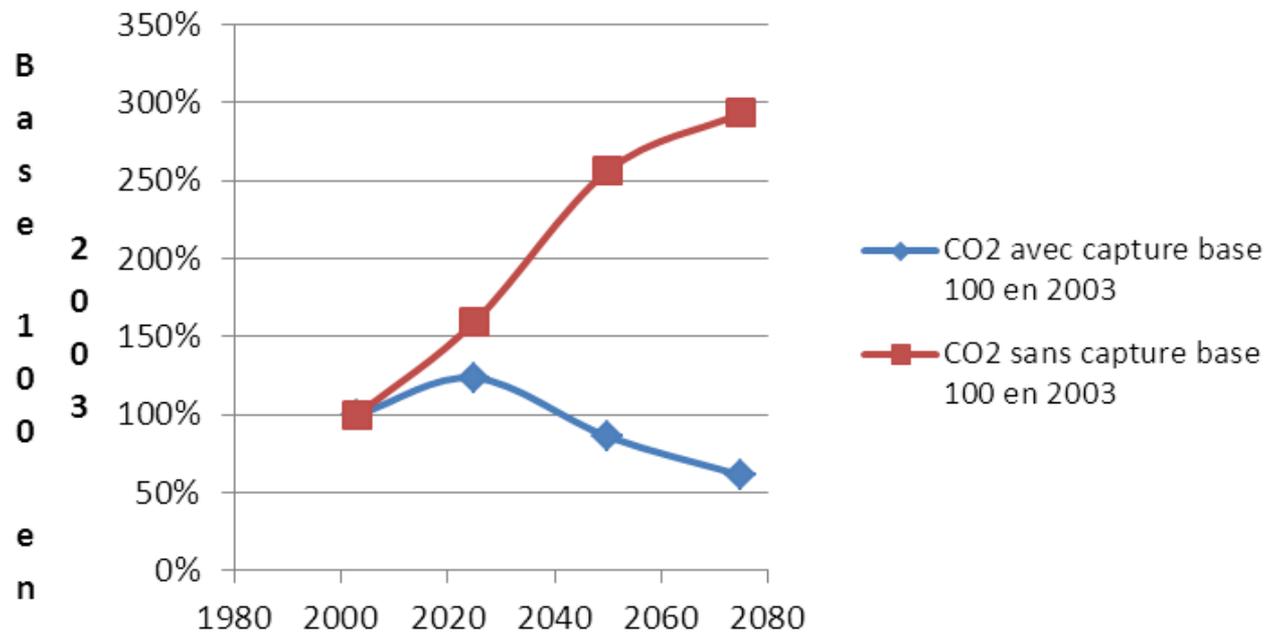
CO2 par unité d'énergie : avantage au gaz parmi les énergies fossiles

Effet de serre par énergie fossile



Même avec la capture du CO2, la décroissance du CO2 émis reste difficile

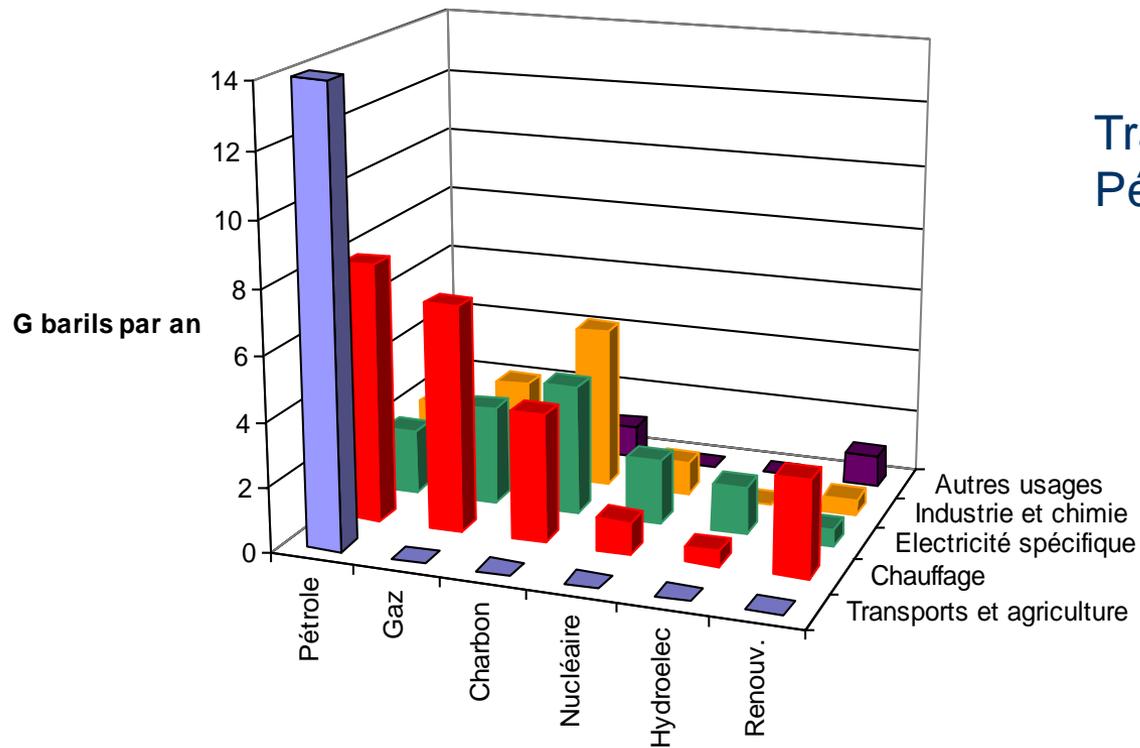
Evolution des tonnes de CO2 émises



Séquestrer le carbone, C'est 20 centimes pour l'énergie d'un litre de super

Energie et usage en 2003

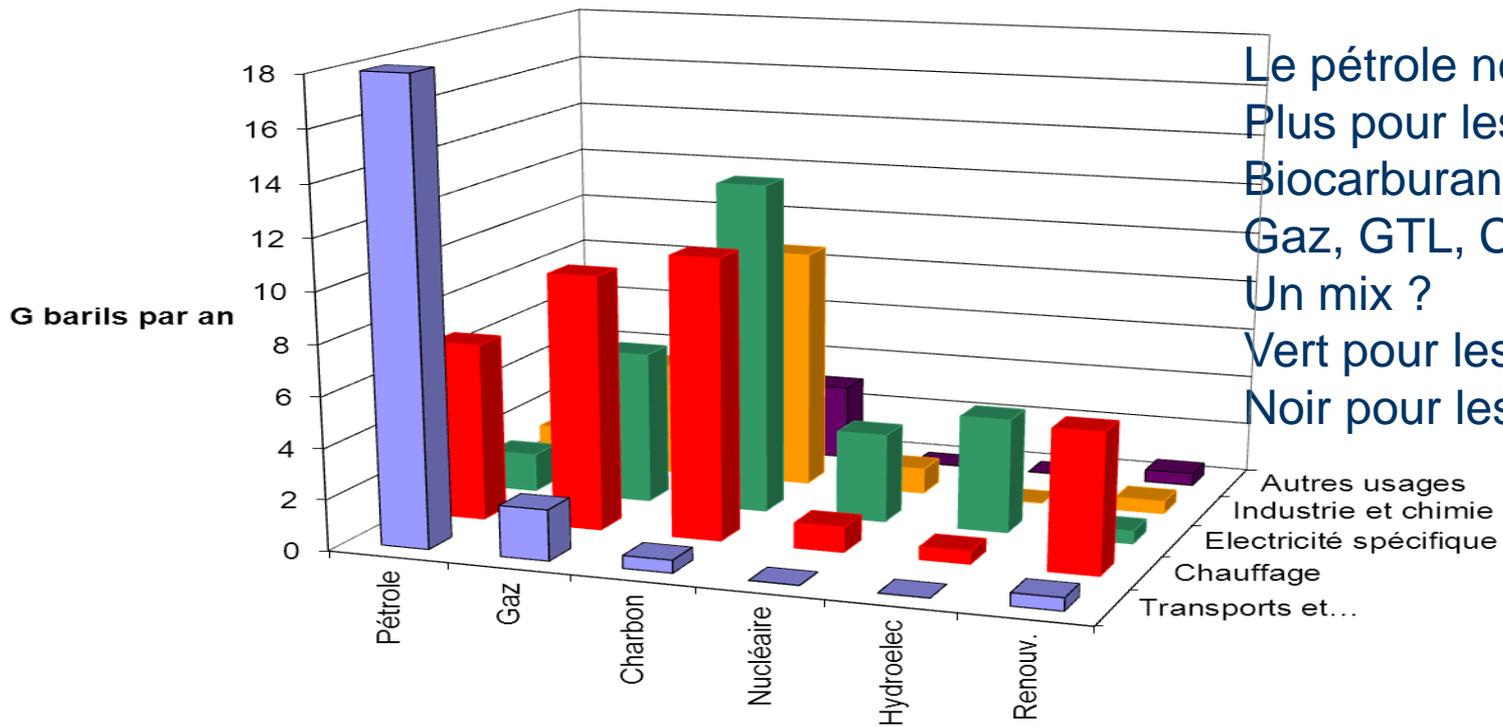
Energie * Usage en 2003



Transports ->
Pétrole

Energie et usage en 2025

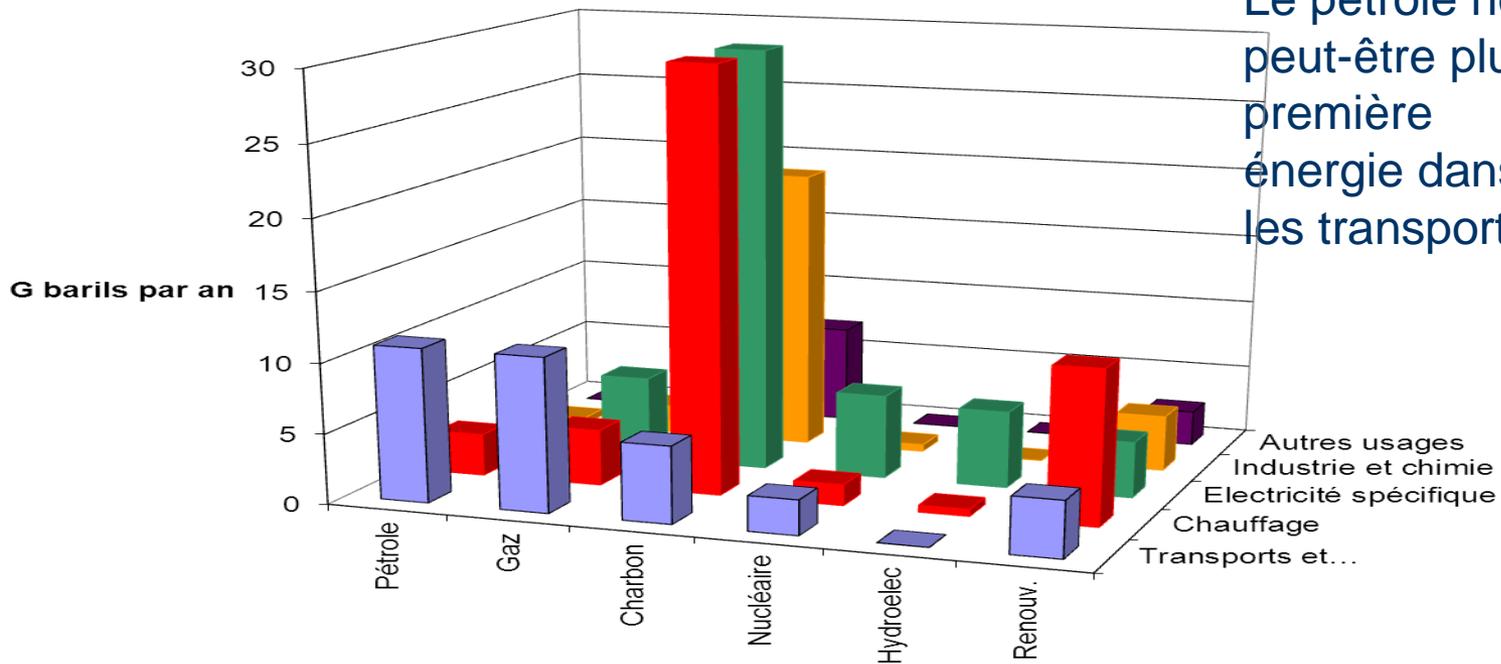
Energie * Usage en 2025



Le pétrole ne suffira
Plus pour les transports
Biocarburants
Gaz, GTL, CTL ?
Un mix ?
Vert pour les riches ?
Noir pour les pauvres ?

Energie et usage en 2050

Energie * Usage en 2050



Le pétrole ne sera peut-être plus la première énergie dans les transports

Enseignements du scénario

- Des prix croissants, mais à un rythme moyen lié à la loi de Hotelling
- Probable croissance du différentiel de prix entre énergies liquides (pétrole) et solides (charbon)
- Retour du charbon
- Tension forte sur le CO₂, même avec capture conséquente

Enseignements pour les transports

- Les transports devront consommer un mix avec d'autres énergies que le pétrole
- Gaz, GTL, CTL, bio/agro-carburants, hybrides rechargeables, ... ?
- Vers un mix de carburants liquides dans un premier temps (agro-carburants à ce stade)
- Des surcoûts mais pas considérables
- Une part transports de l'énergie consommée (avec l'électricité spécifique) croissante, ainsi que du CO2 émis
- Difficultés particulières pour capturer le carbone dans les transports (petites sources mobiles)

Quelques idées

- Peu de frein vraisemblable à la « mondialisation » des marchandises, du fait du très faible coût du transport maritime
- Frein à la croissance des modes rapides, car plus consommateurs d'énergie (à moins de trouver la massification adéquate) (avion long courrier)
- Avantage tendanciel pour les modes peu consommateurs d'énergie
- Hydrogène, fusion, ... : pourquoi pas à long terme, mais en général les technologies simples marchent mieux (à la portée de n'importe qui), effets collatéraux plus maîtrisables

De fortes incertitudes néanmoins

- Chemin probablement plus chaotique année par année que par quart de siècle
- Des ruptures de tendance qui peuvent être mal vécues
- Réserves fossiles mal connues
- Technologies pour le renouvelable à grande échelle, et leur prix
- Technologies pour la capture du carbone
- Technologies d'extraction (notamment gaz, pétrole non conventionnel)
- Croissance de la demande incertaine
- Degré de substituabilité des sources par usage
- Part du nucléaire finalement peu déterminante
- Géopolitique (pouvoir de monopole de certains pays producteurs, coercition en vue de la réduction des émissions de gaz à effet de serre,...)

Que peuvent les pouvoirs publics ?

- Pas grand-chose et beaucoup à la fois
- Accompagner le changement, en préparant les acteurs économiques, en les aidant à anticiper
- Corriger la myopie des marchés, mais éviter la tentation des éléphants blancs...
- Pour des externalités collectives (exemple l'effet de serre) décider des mécanismes et de l'effort des nations et des agents
- Répartition de la pénurie entre acteurs, nations, guerre et paix, manger ou rouler

Quelques lectures possibles

- Matthew Simmons : Twilight in the desert (sur le « peak oil »)
- James Howard Kunstler : The long emergency (sur la possible crise énergétique du XXIème et ses conséquences)
- Jared Diamond : Collapse (sur les exemples de développement non durable)
- BP statistical review 2012

Problème posé (Hotelling)

- Max $\int [p(t)q(t) - C(q(t), R(t))] \exp(-a \cdot t) dt$ de 0 à T
- a : taux d'actualisation
- Avec $\int q(t) \leq R(0)$ (de 0 à T) (contrainte Stock)
- $dR(t)/dt = -q(t)$
- $q(t) \geq 0$
- p prix, q quantité extraite, C coût d'extraction, R ressource, T horizon

Solution mathématique : Hamiltonien

- $H=[p(t)q(t)-C(q(t),R(t))]*\exp(-a*t)-\mu(t)q(t)$
 - $R(t)$ variable d'état
 - $q(t)$ variable de contrôle
 - $\partial H/\partial q=(p-\partial C/\partial q)*\exp(-at)-\mu=0$
 - $-\partial H/\partial R=(\partial C/\partial R)*\exp(-at)=d\mu/dt$
 - $\partial H/\partial \mu=-q(t)$
- et à la fin $H(T)=0$