

Les grands enjeux de l'énergie aujourd'hui et demain



Christophe Laux

Département d'Energétique
Ecole Centrale Paris

Plan

1. Etat des lieux de la situation actuelle

Définitions, consommation énergétique mondiale et française, état des lieux en France

2. Les contraintes

Démographiques, économiques, climatiques, réglementaires (Kyoto, Grenelle,...), épuisement des ressources fossiles, effet Fukushima

3. Les sources d'énergie

Solaire thermique, photovoltaïque, éolien, ...

Nucléaire (génération II, III, IV, fusion)

4. Quelques scénarios

Quelle énergie demain ? Evolution de la consommation énergétique, Sortir du nucléaire ?

5. Quelques pistes

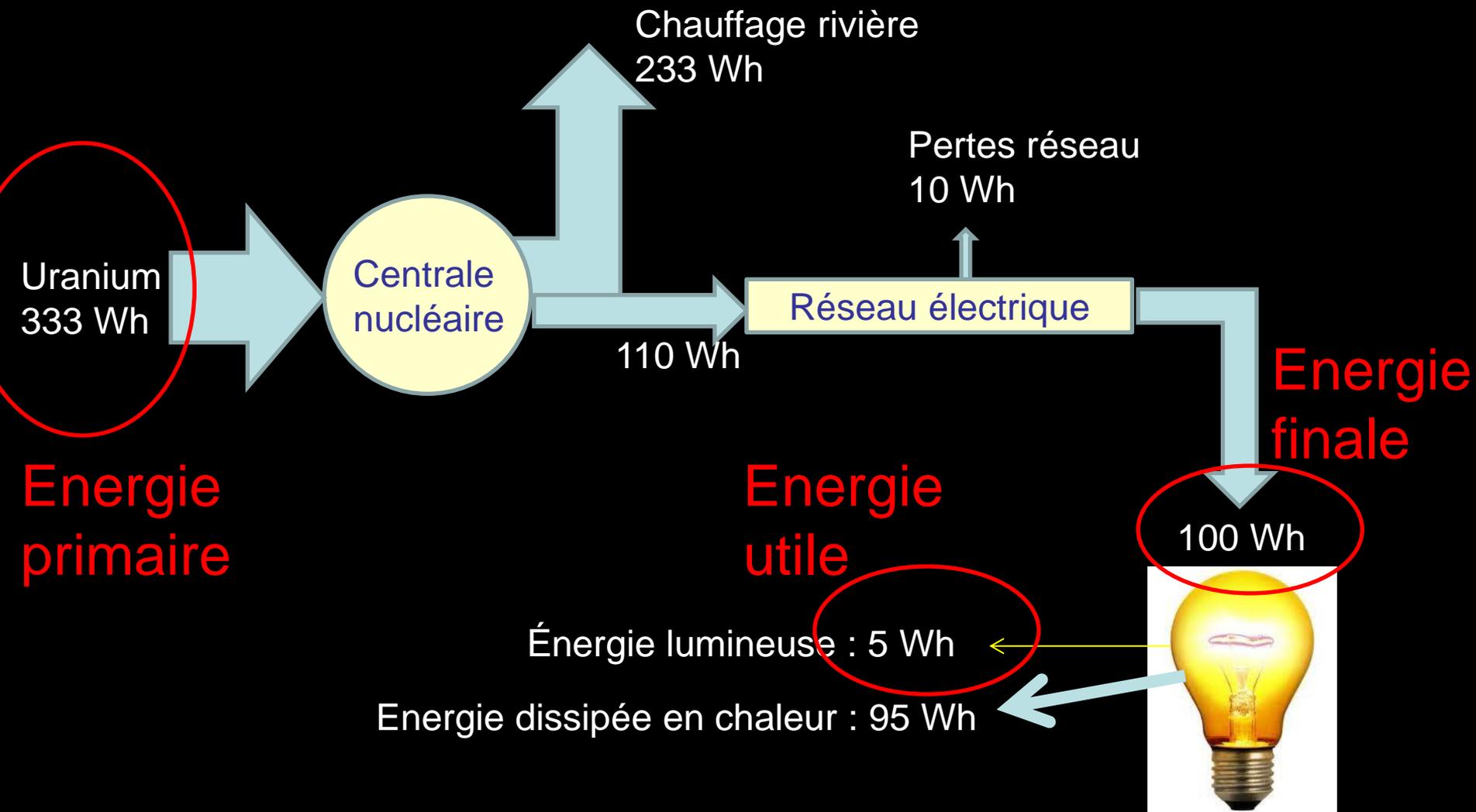
1. ETAT DES LIEUX

Définitions, La consommation énergétique mondiale et française, par secteur, par ressource, par habitant, l'efficacité énergétique

Définitions

- **consommation primaire :**
énergie potentielle totale de la ressource utilisée
ex : inclut les 66% de pertes thermiques d'un réacteur nucléaire
- **consommation finale :**
énergie effectivement fournie à l'utilisateur
ex : litre d'essence, kWh électrique
- **consommation utile :**
énergie effectivement utilisée à la fin recherchée
ex : énergie mécanique transmise à un véhicule

Un exemple: l'ampoule à incandescence



Unités d'énergie

- Les unités usuelles :
 - ✓ Le kWh, le MWh , le GWh, le TWh
- L'unité des énergéticiens :
 - ✓ La Tonne Equivalent Pétrole (Tep) : $1 \text{ Tep} = 11\,630 \text{ kWh}$
- Consommation d'énergie finale en France en 2009 :
 - ✓ 156 Mtep

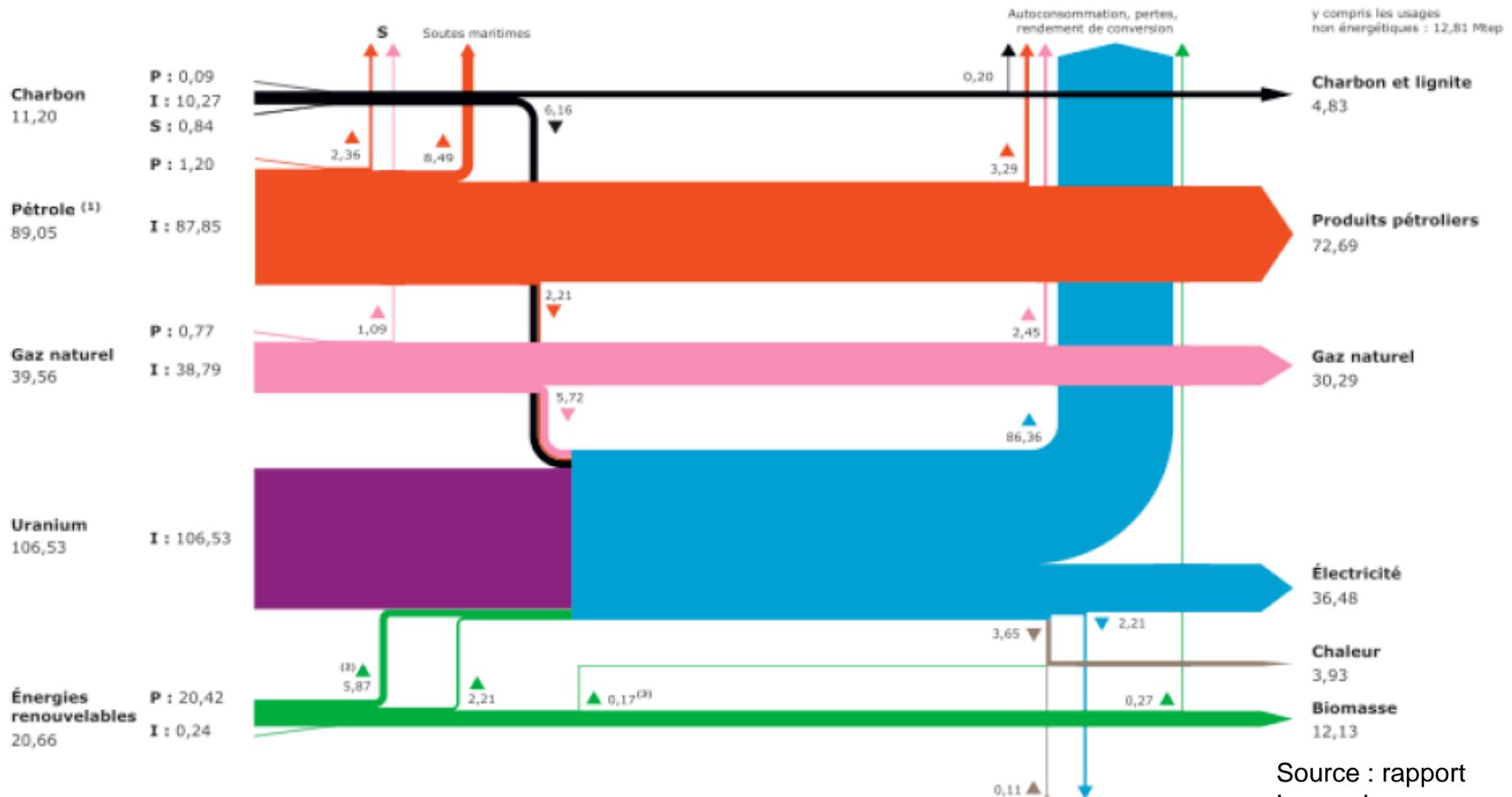
Chiffres clés

(consommation énergie primaire en 2009)

- Monde : 1.8 tep/habitant/an
- France : 4,4 tep/habitant/an (2,3% du total pour 1% de la population)
- USA : 7,7 tep/habitant/an (20% du total pour 5% de la population)
- Chine : 1.8 tep/habitant/an (20% du total pour 20% de la population)

Bilan Energétique de la France 2009 (Mtep)

ÉNERGIE PRIMAIRE



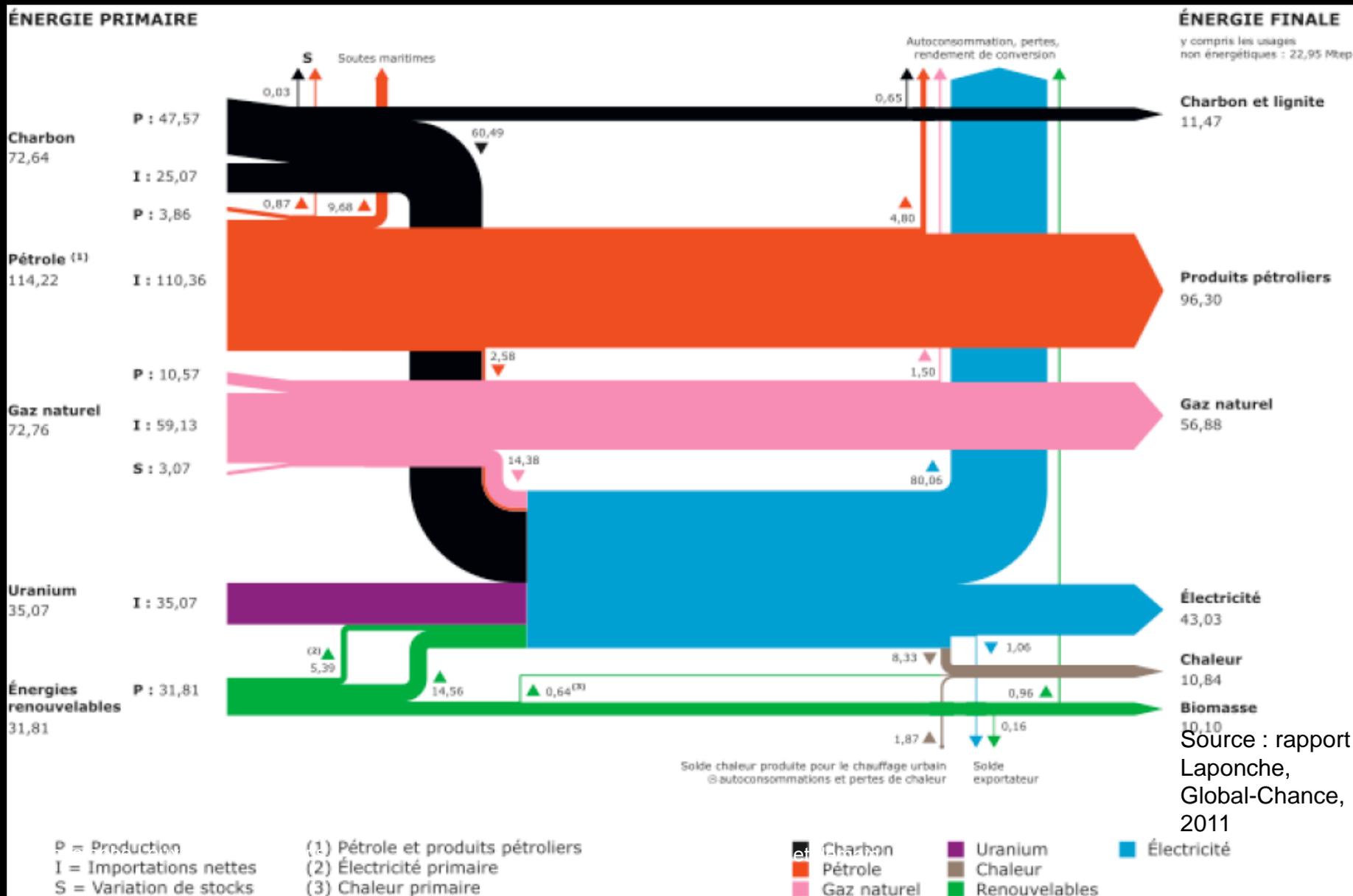
Source : rapport Laponche, Global-Chance, 2011, P. 28

P = Production
I = Importations nettes
S = Variation de stocks

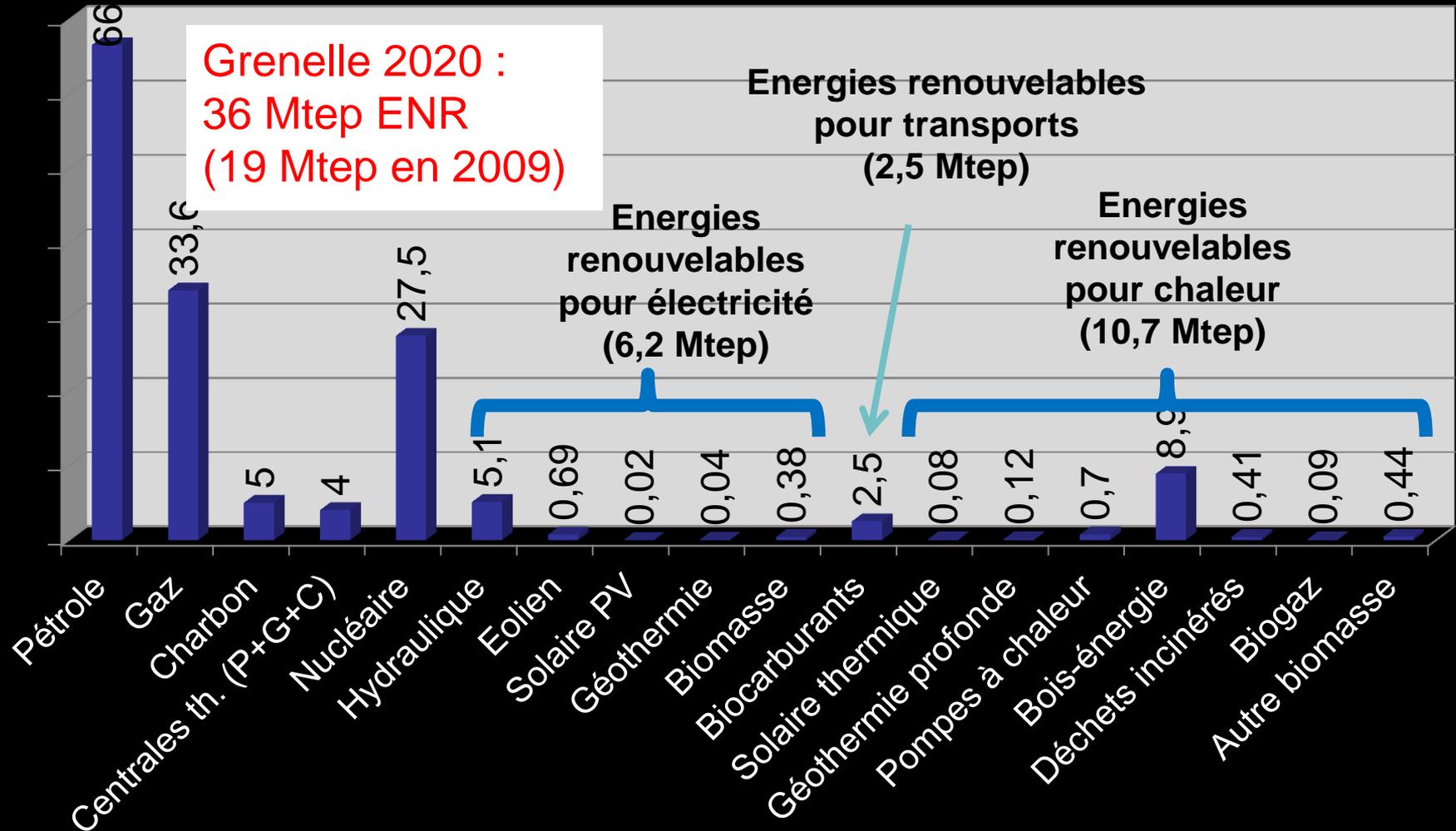
(1) Pétrole et produits pétroliers
(2) Électricité primaire
(3) Chaleur primaire

Charbon
Pétrole
Gaz naturel
Uranium
Chaleur
Renouvelables
Électricité

Bilan énergétique de l'Allemagne 2009 (Mtep)



Consommation d'énergie finale en France en 2009 (156 Mtep)



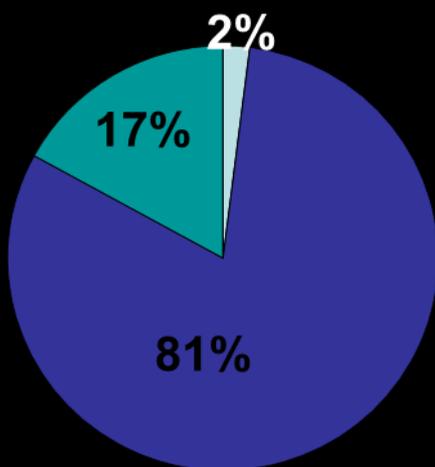
RENOUVELABLE = BOIS + HYDRO

Pour fixer les idées...

France (2009)

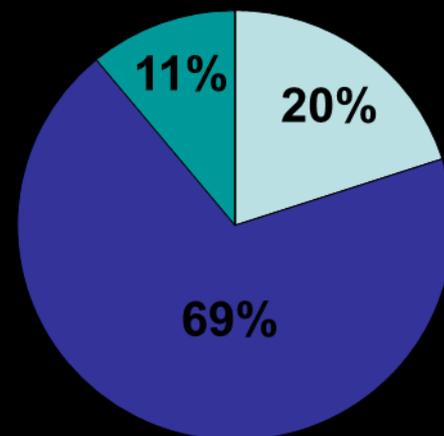
- **Nucléaire :**
 - ✓ 74% de l'électricité
 - ✓ 18% de l'énergie finale
- **Renouvelable :**
 - ✓ 16% de l'électricité (12% hydro + 2% éolien + 1% biomasse + 1% autre)
 - ✓ 12% de l'énergie finale (6% bois + 3% hydro + 1,6% biocarb + 1,4% autre)

Ventilation de la consommation finale d'électricité (2009)

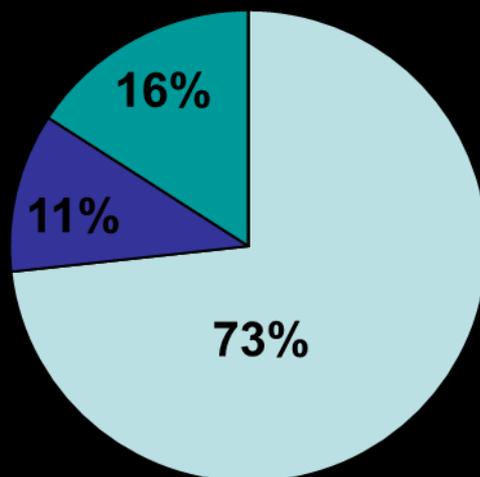


Chine

- Nucléaire
- Fossile
- Renouvelable



Etats-Unis



France

2. LES CONTRAINTES

Accroissement des besoins

Contraintes climatiques

Epuisement des ressources fossiles

Effet Fukushima

Contraintes démographiques et économiques

Accroissement des besoins 2010-2050

- **France :**

- ✓ Population augmente à 72,3 millions (+11%) (INSEE)
- ✓ Consommation primaire par habitant : 4 tep/an en 2011
- ✓ **Besoins énergétiques : à peu près constants**

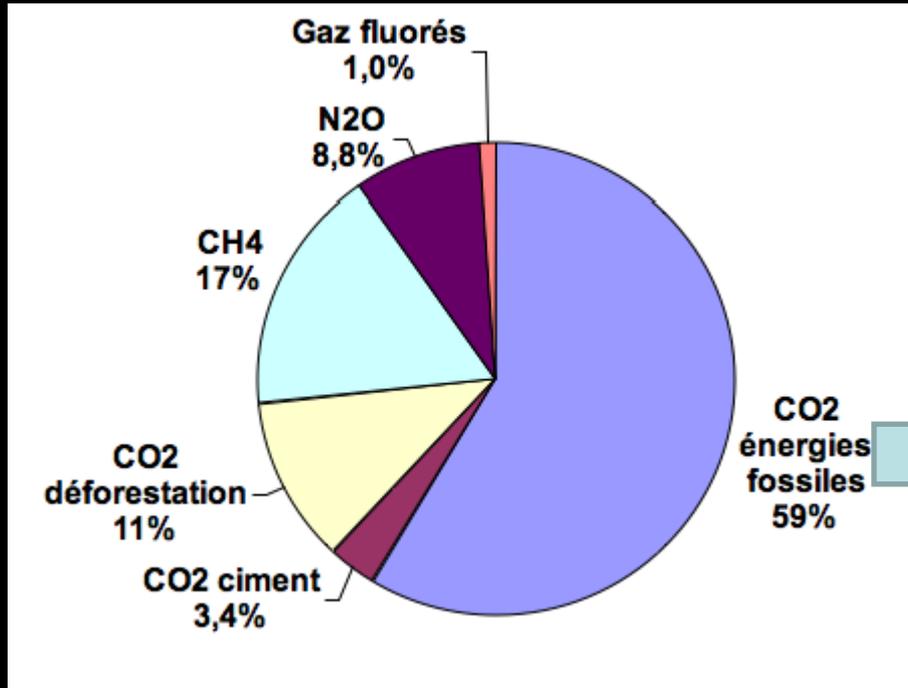
- **Monde :**

- ✓ Population augmente à 9 milliards d'habitants (+30%)
- ✓ Consommation par habitant : 1,8 tep/an
Mais 1,2 tep/an/habitant en moyenne sur l'Inde, la Chine, le Brésil qui représentent 40% de la population mondiale.
- ✓ **Besoins énergétiques globaux : X 2 ou X 3 ?**

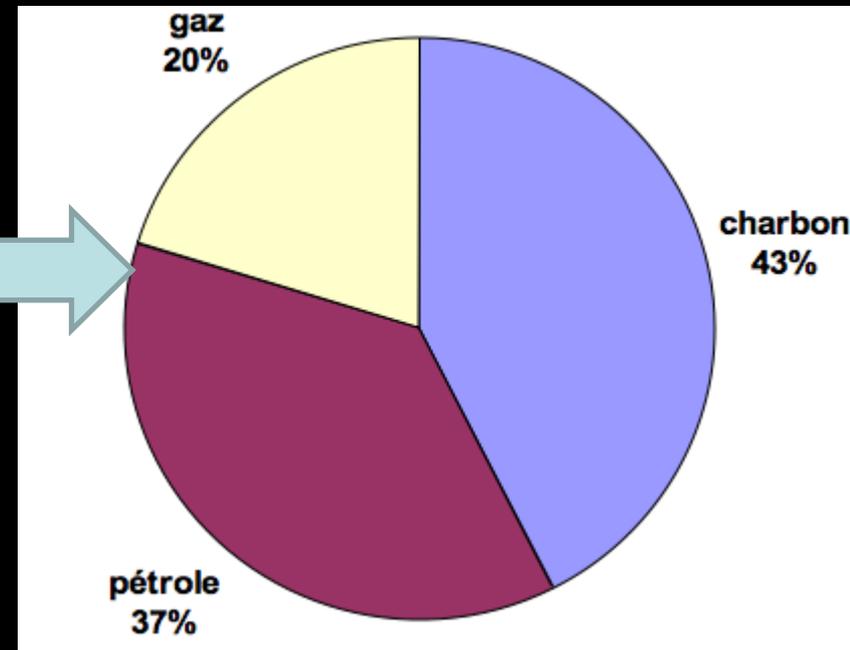
Contraintes climatiques

Les gaz à effet de serre

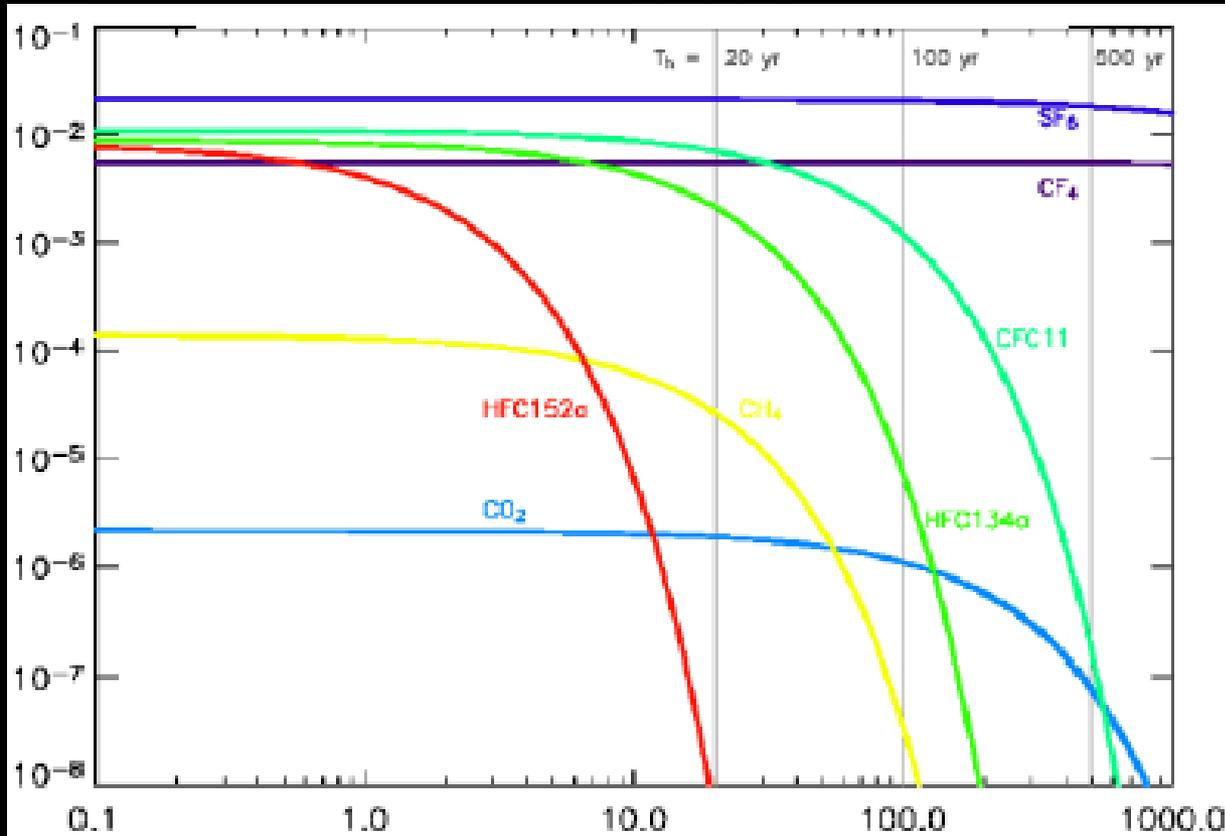
Gaz qui contribuent à l'effet de serre



Emissions de CO₂ par combustible



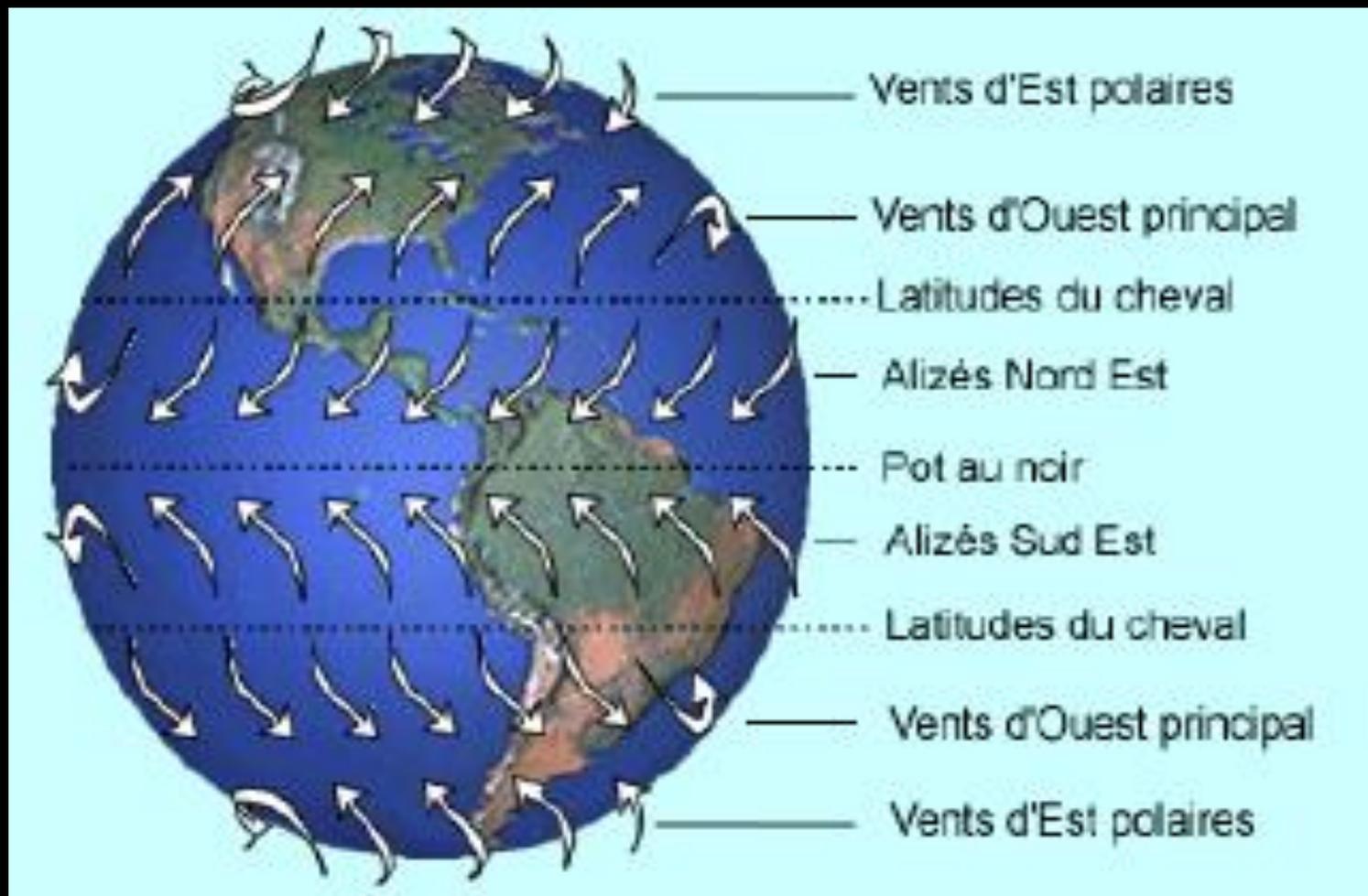
Une fois produits, les gaz à effet de serre disparaissent TRES lentement



CO_2 : 100 ans

Methane : 20 ans

... et se répartissent sur toute la planète



Le lieu d'émission est sans importance pour l'avenir climatique

Source : J.-M. Jancovici

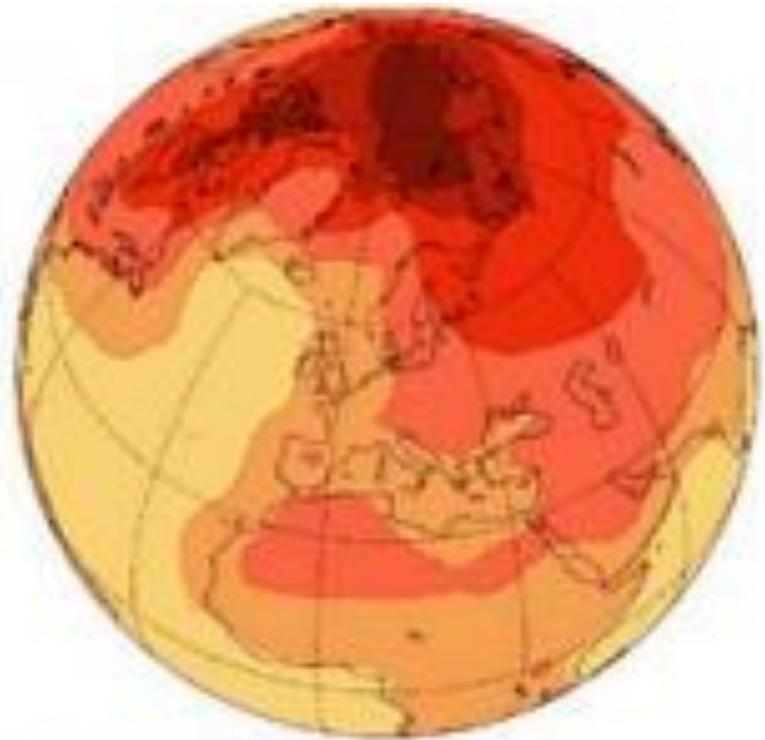
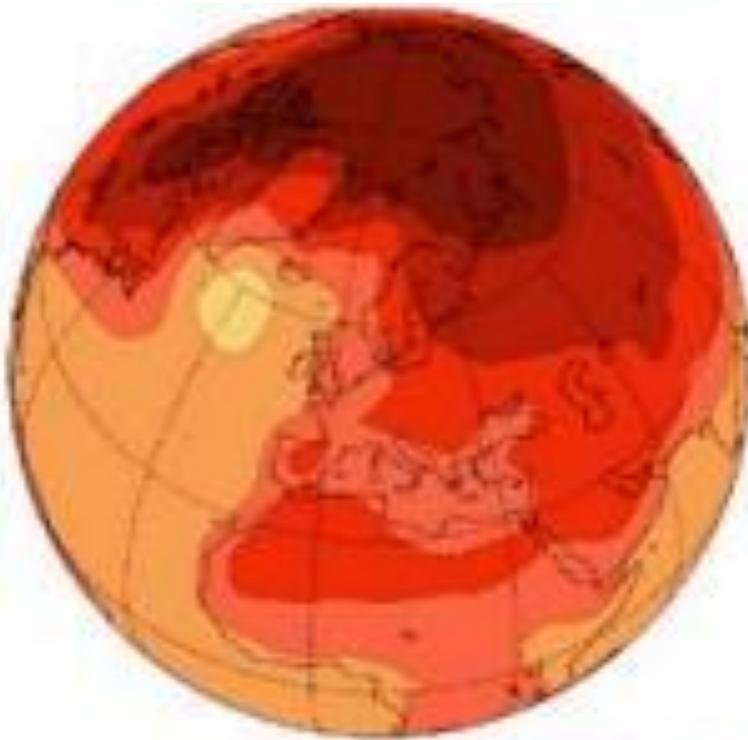
Les conséquences sur le réchauffement

- **Scénario « Business as usual » :**
 - ✓ de 3,5 à 6°C d'augmentation de la température en un siècle
- **Scénario vertueux:**
 - ✓ + 1,5° à 3°C (on a déjà eu 0,8°C depuis un siècle)
- **Conséquences d'une augmentation globale de 2°C :**
 - ✓ Niveau des océans : +30 à 80 cm
 - ✓ Température moyenne en France : + 3°C

Changement des températures d'ici à 2100

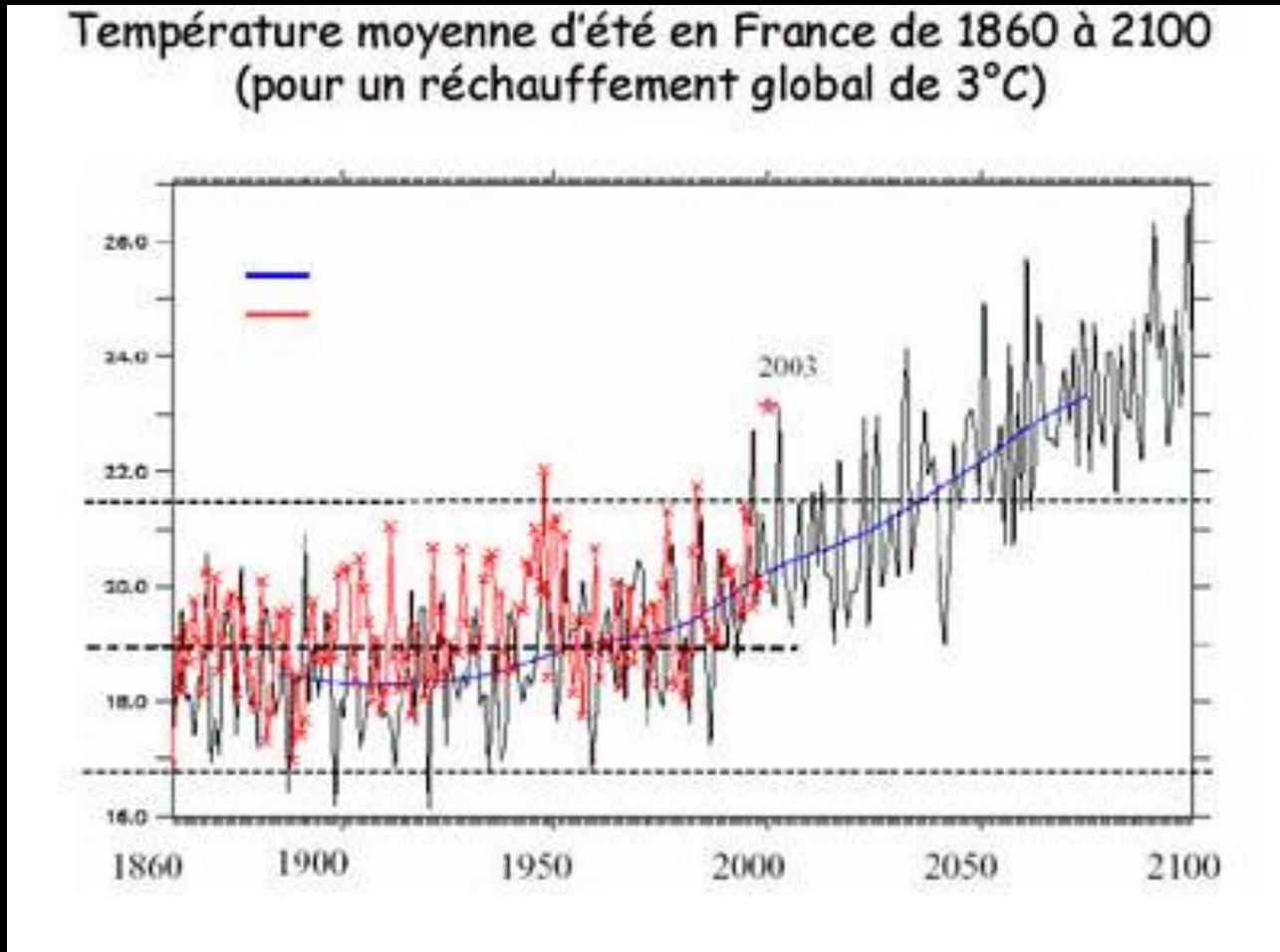
« **Business as usual** »

Scénario vertueux



Source : Valérie Masson-Delmotte, climatologue

Effet d'un réchauffement global de 3°C en France (scénario vertueux)



Source : Valérie Masson-Delmotte, climatologue

A qui la faute ? Emissions de CO₂

La France produit 1,4% des émissions mondiales de CO₂

- Quantité par habitant en 2009 (en tonnes de CO₂) :

France	Allemagne	Chine	Etats-Unis	Inde	Monde
6	10	6	18	1	4

✓ La planète peut « digérer » 1,5 tonne/hab/an (stockage forêts/océans)

Emissions de CO₂

- Un chiffre parlant :

✓ 1 litre de carburant = 2.5 kg de CO₂

Ex: Voiture, 10 000 km par an, 6L/100km
= 1,5 tonnes de CO₂

Épuisement des ressources fossiles « faciles »

Réserves de ressources fossiles

- **Réserves prouvées :**
 - ✓ forte probabilité (>90%) d'existence et pouvant être extraite de façon rentable du sous sol
- **Réserves additionnelles :**
 - ✓ ressources probables (>50%) et susceptibles d'être extraites si les technologies nécessaires deviennent rentables + ressources à découvrir

	Réserves Prouvées	Durée potentielle (hypothèse : 2,6% de croissance/an)	Réserves Additionnelles	Durée supplémentaire
Pétrole	161 Gtep	35 ans*	300 Gtep	50 ans
Gaz	172 Gtep	36 ans*		
Charbon	486 Gtep	60 ans	2540 Gtep	300 ans
Uranium	55 Gtep	43 ans (1800 ans)**		

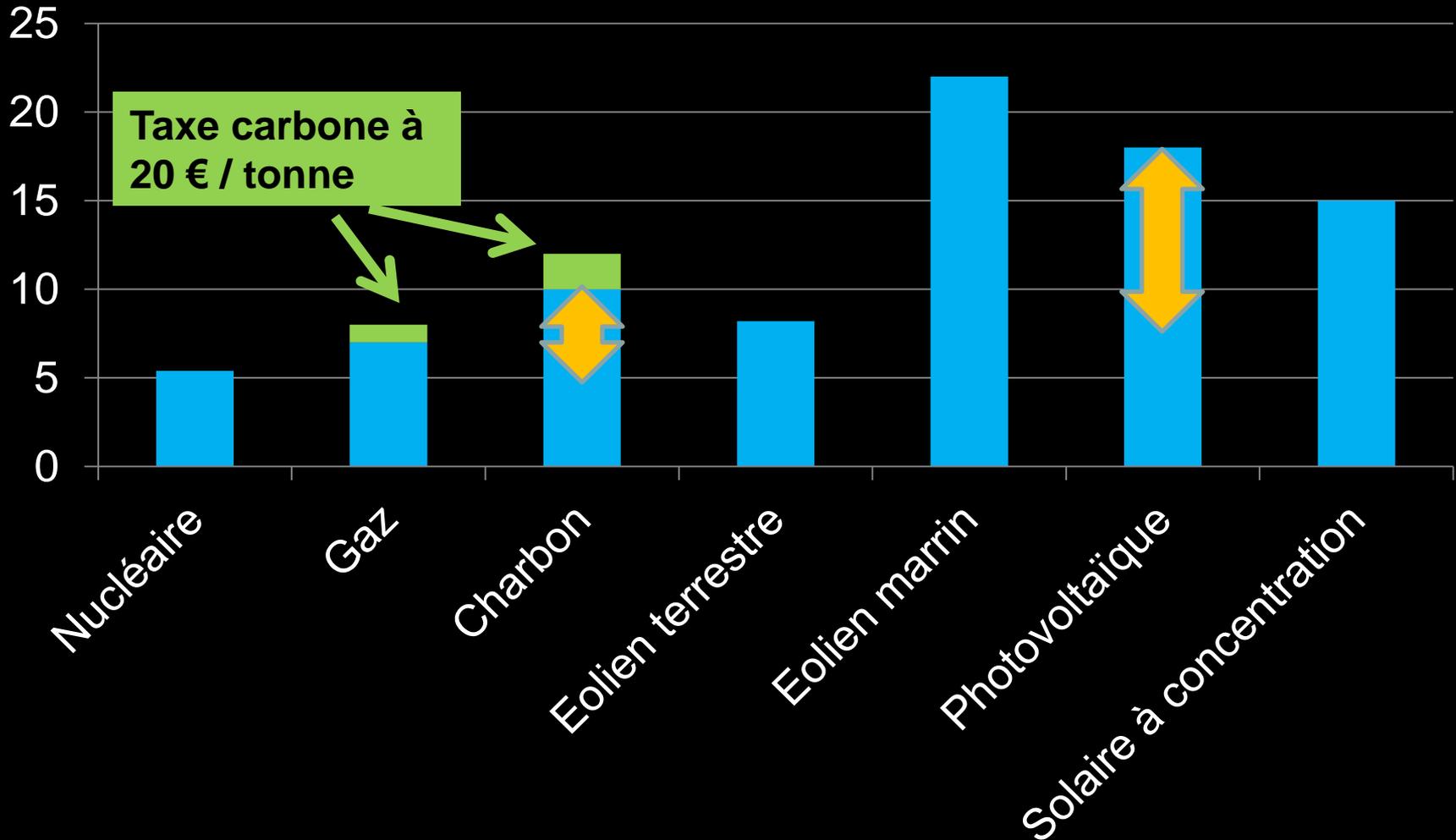
*+ quelques années avec le pétrole et le gaz non conventionnel (schistes)

** Génération IV

Source : lacona, Taine, 2011

Contraintes économiques

Prix de revient de l'électricité en c€/kWh



Cour des comptes 2012

Effet Fukushima

Effet Fukushima

- Accident du 11 mars 2011
 - ✓ 30 000 morts dûs au Tsunami
 - ✓ Quelques irradiés mais aucun mort à cause du nucléaire
- Conséquences
 - ✓ Remise en question du nucléaire dans certains pays :
 - Sortie du nucléaire en Allemagne (17 réacteurs)
 - Réduction en Italie, Suisse (5 réacteurs)
 - Fermeture de 24 des 58 réacteurs français avant 2025 ???
 - ✓ Pas de remise en question du nucléaire :
 - Chine, Inde, Corée du Sud, Royaume-Uni, Pologne, Pays-Bas, qqs pays d'Europe de l'Est, ...

3. LES SOURCES D'ENERGIE

Eolien, photovoltaïque, solaire thermique, ...

Nucléaire (génération II, III, III+(Mox), IV, fusion)

L'éolien



- **Avantages :**
 - ✓ Technologie mature, pas de CO₂
- **Inconvénients :**
 - ✓ Intermittent (environ 23% de la puissance crête), dispersé
- **Objectif 2020 (Grenelle) : 10% de la consommation électrique**
 - ✓ 8000 éoliennes de 3 MW en moyenne
 - ✓ Puissance crête totale : 25 GW (dont 6 GW en mer)
 - ✓ 4,7 Mtep/an (rappel: nucléaire = 27,5 Mtep/an)
- **Installations actuelles (2013):**
 - ✓ Environ 4000 éoliennes en France (2 MW en moyenne)
 - ✓ Puissance crête : 8 GW (0,24 GW en mer)
 - ✓ 1,3 Mtep/an, soit **3,5% de l'électricité en 2013**

Sources : Observer 2013

Le solaire photovoltaïque



Pays-Bas, 2,3 MWc, 400 familles

- **Avantages :**
 - ✓ Pas de CO₂, ressource quasi illimitée (Soleil)
- **Inconvénients :**
 - ✓ Intermittent, déphasé temporellement par rapport à la demande : stockage ???
 - ✓ Coût, panneaux polluants, faible rendement (17% en 2013)
- **Installations actuelles en France (sept. 2013):**
 - ✓ Environ 300 000 installations
 - ✓ Puissance crête : 4,5 GW
 - ✓ 0,4 Mtep/an (**1% de la production électrique en France**)
- **Objectif 2020 (Grenelle) : 1% de la consomm. électrique**
 - ✓ 0,47 Mtep/an (rappel: nucléaire = 27 Mtep/an)
 - ✓ (Objectif 2020 en Allemagne : 4,4 Mtep/an)

Sources : Observer et Photovoltaïque
.info – Chiffres clés
PriceWaterhouseCoopers

Le nucléaire - fission

- Réaction : $^{235}\text{U} + \text{neutron} \rightarrow 2 \text{ noyaux plus légers} + \text{énergie}$
- L'uranium naturel :
 - ✓ Métal présent dans l'écorce terrestre (3 grammes / tonne de roche)
 - ✓ Contient 3 isotopes : ^{238}U (99,28%), ^{235}U (0,71%), ^{234}U (0,0054%)

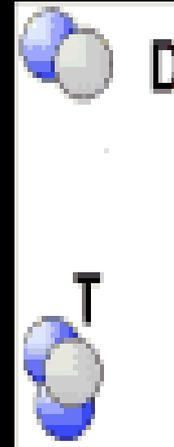
Les types de réacteurs de fission

- Réacteurs de 2^{ème} génération (centrales actuelles) :
 - ✓ Réacteurs à neutrons lents, appelés REP (Réacteurs à Eau Pressurisée)
 - ✓ Utilisent de l'uranium enrichi à 3,5% en isotope ^{235}U
 - ✓ ^{238}U = déchet
- Réacteurs de 3^{ème} génération (Flamanville, Finlande, Chine)
 - ✓ Appelés EPR (*European Pressurized Reactor*) :
 - ✓ Même principe que ceux de 2^{ème} génération, mais plus puissants et plus de sécurité :
 - Absorbent d'hydrogène (suite à l'accident de Three Miles Island)
 - Réceptacle en corium pour résister à une fusion du cœur de réacteur (Tchernobyl)

Les types de réacteurs de fission

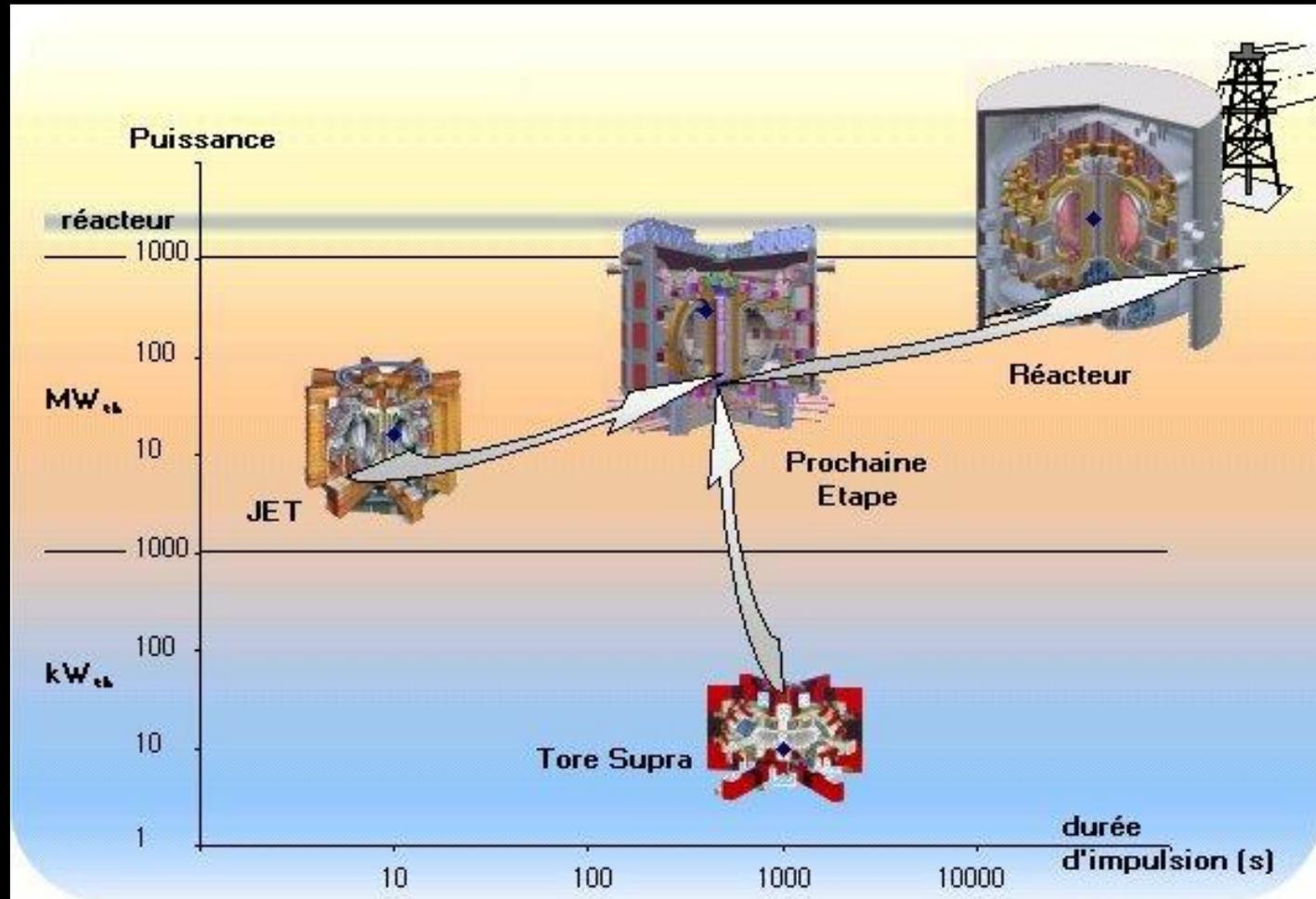
- Réacteurs de 3^{ème} génération +
 - ✓ Utilisent du MOx (7% de Plutonium + 93% uranium – Mixed Oxide Fuel)
 - ✓ Certains réacteurs de génération 3 l'utiliseront aussi
- Réacteurs de 4^{ème} génération (envisageables à partir de 2040)
 - ✓ Visent à utiliser ^{238}U (50 fois plus de réserves)
 - ✓ Réacteurs à neutrons rapides
 - ✓ Le fluide caloporteur ne peut pas être de l'eau
 - Sodium : Phénix (Marcoule) et Superphénix (Creys-Malville)
 - ✓ Aussi appelés « surgénérateurs » car ils permettent aussi de transformer des noyaux ^{238}U en ^{239}Pu , fissile
 - ✓ Plus sûrs, meilleur rendement, plus faibles coûts, moins de déchets

Le nucléaire - fusion



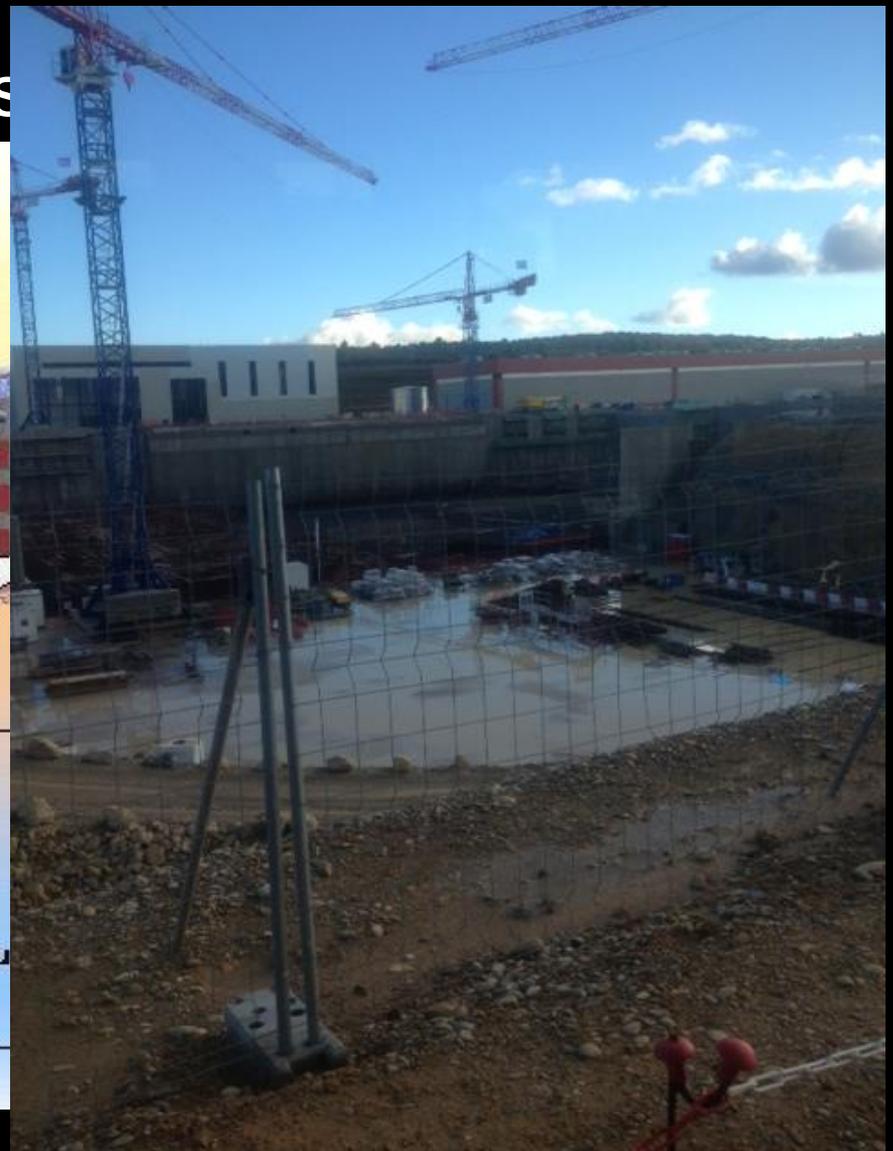
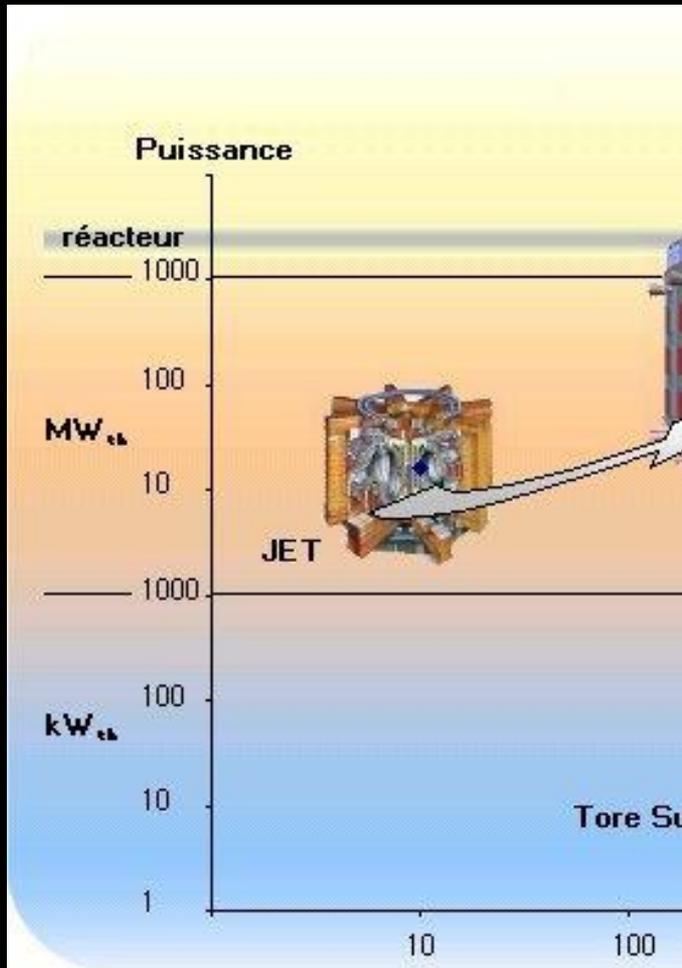
- **Avantages :**
 - ✓ Combustible quasi inépuisable et très énergétique (1 gramme Deuterium = 21 tonnes Pétrole)
 - ✓ Sûreté de fonctionnement
 - ✓ Facilité de traitement des déchets
- **Mais énormes défis scientifiques et technologiques :**
 - ✓ L'objectif est d'atteindre l'allumage : $Q = P_{\text{fusion}} / P_{\text{injectée}} > 1$

Les espoirs d'ITER...



Peut-être envisageable pour le XXIème siècle ?

Les espoirs



Peut-être envisageable pour le XXIème siècle ?

4. LES SCENARIOS

Evolution de la consommation énergétique
Grenelle, sortie du nucléaire (?), Négawatt

En résumé

Aujourd'hui



Dans 40 ans



Dans 80 ans



SORTIR DU NUCLEAIRE ?

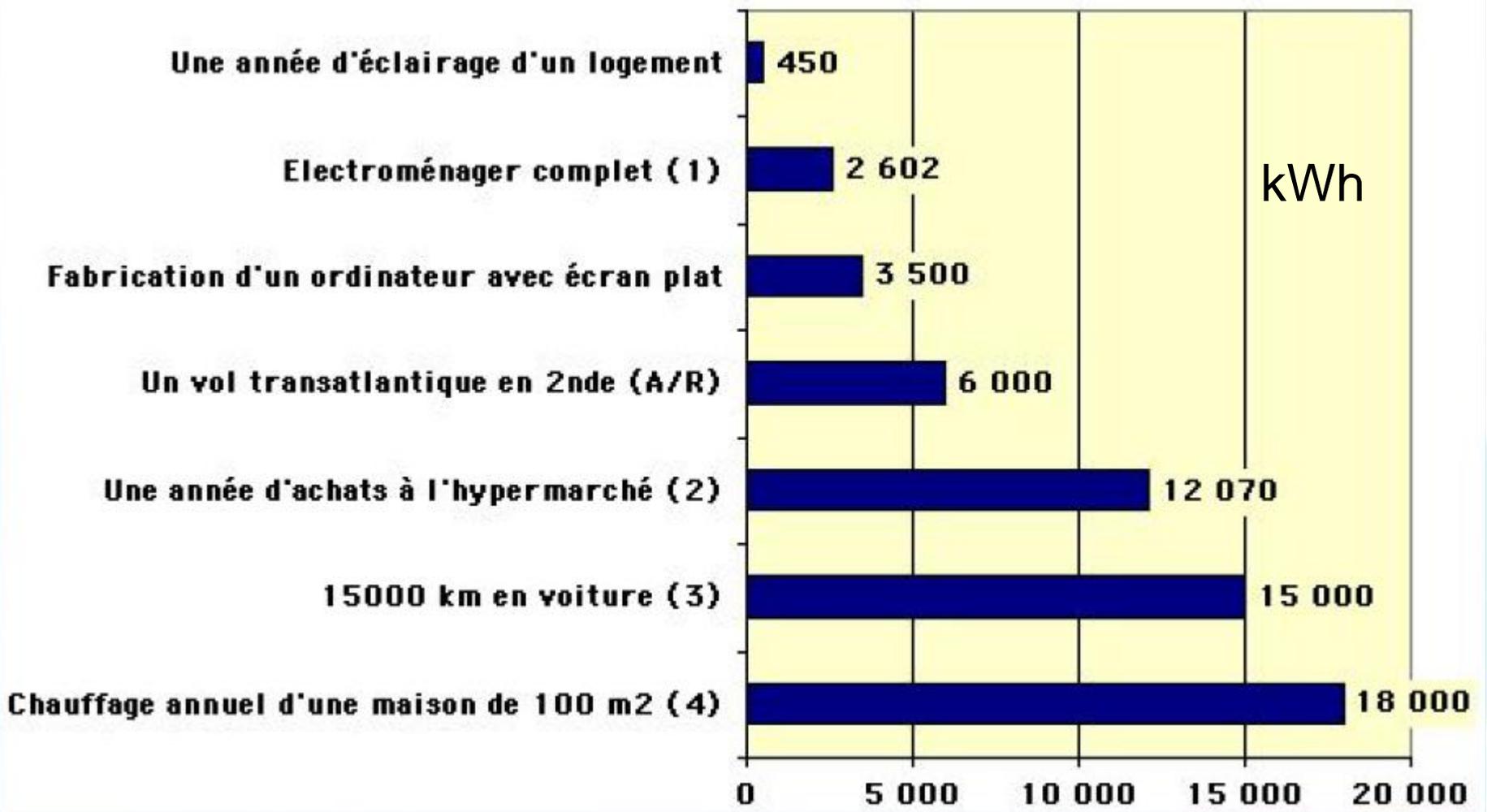
Sortir du nucléaire ?

- Regardons les chiffres (Mtep) :
 - ✓ Nucléaire = 28
 - ✓ Pétrole = 67
 - ✓ Gaz = 34
 - ✓ Charbon : 5
 - ✓ Centrales thermiques : 4
 - ✓ Renouvelable : 36 en 2020 et ? en 2050
 - ✓ +11% de population en 2050
 - ✓ 156 Mtep par an

« un bon watt est un watt non consommé »

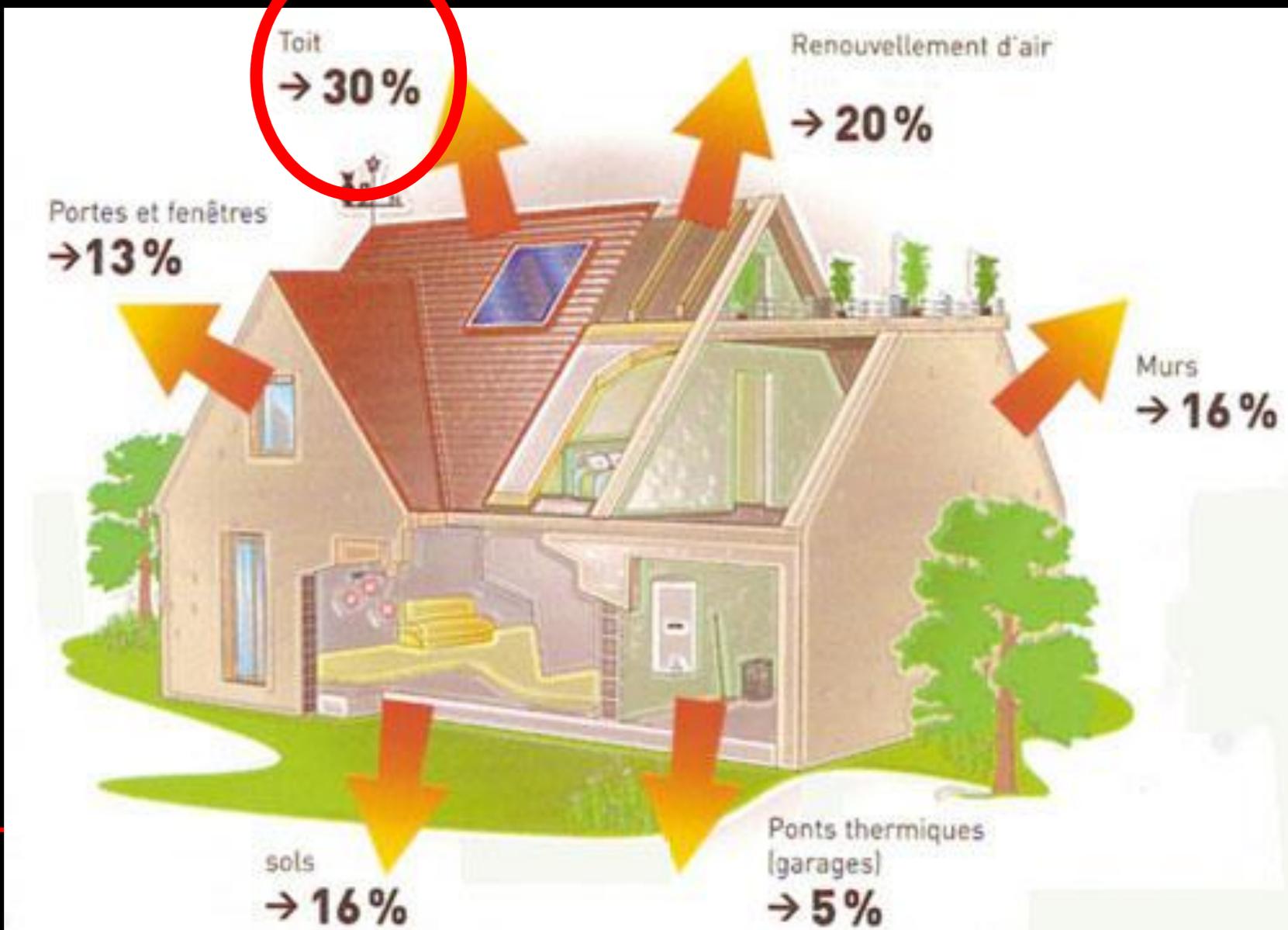
QUELQUES PISTES

Mais où part toute cette énergie ???



Note: un français consomme environ 50 000 kWh/an d'énergie primaire

Guider sur les priorités : par où commencer ?



1. Commencez par isoler les combles

- Rentable : 30% des pertes par le toit
- Facile et économique : 15-30 € / m² (même livré-posé !)
- Valeur patrimoniale : +1 en DPE

Le saviez-vous ?

- Une laine de verre fine, écrasée, poussiéreuse, mouillée isole peu
 - Une laine de verre de 10 ans d'âge a perdu 30 à 40% de son pouvoir d'isolation
-

2. Réglez le chauffage

Chauffage central



- 10 à 20% d'économie
- Facile à installer
- Obligatoire en rénovation

Chauffage électrique



(avec ou sans fil)

3. Installez double vitrage, menuiseries

- 10 à 15% des pertes



4. Isolez les murs, les sols

- Rentable : 16 à 20 % d'économies

Le saviez-vous ? 10 cm de laine de verre ($R = 3.5$) isole autant que :

- 6 mètres de béton
 - 4 mètres de brique
 - 50 cm de pin
 - 40 cm de béton cellulaire
-

5. Chauffe-eau thermodynamique

- 70% d'économie d'électricité par rapport à un ballon d'eau chaude classique

....Lorsque les prix auront baissé < 1000 €

Nos jeunes anciens...



Panneaux solaires
thermiques + photovoltaïques

Fondateurs:
Jérôme Mouterde (2009)
Laetitia Brottier (2009)



Nos jeunes anciens...

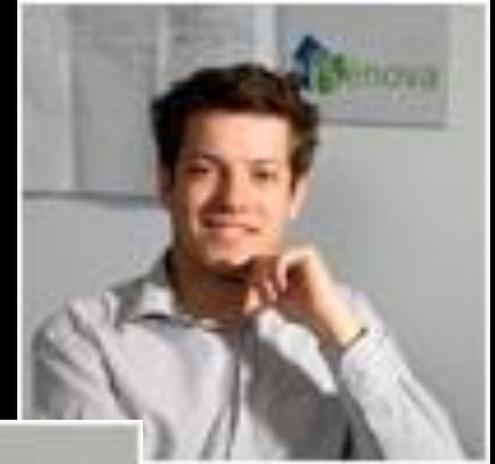


Bureau d'études thermiques spécialisé

Fondateurs:

Dimitri Molle (2009)

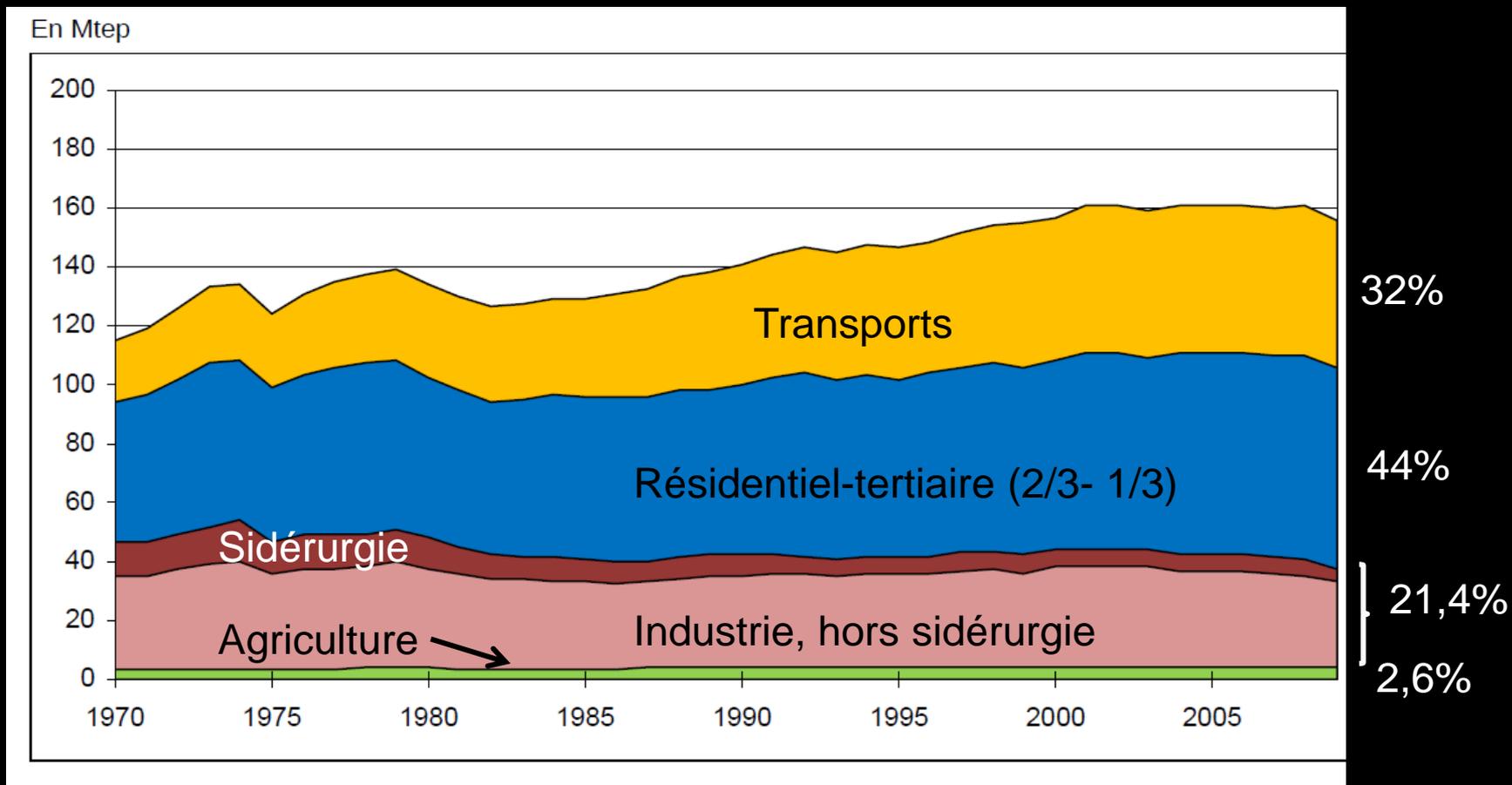
Pierre-Manuel Patry (2009)



Thank you for your attention!

Annexes

Evolution de la consommation d'énergie finale en France (hors non-énergétique)

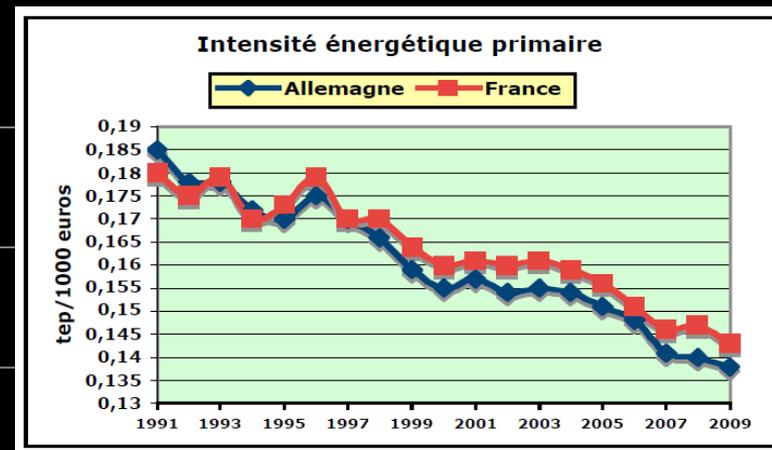
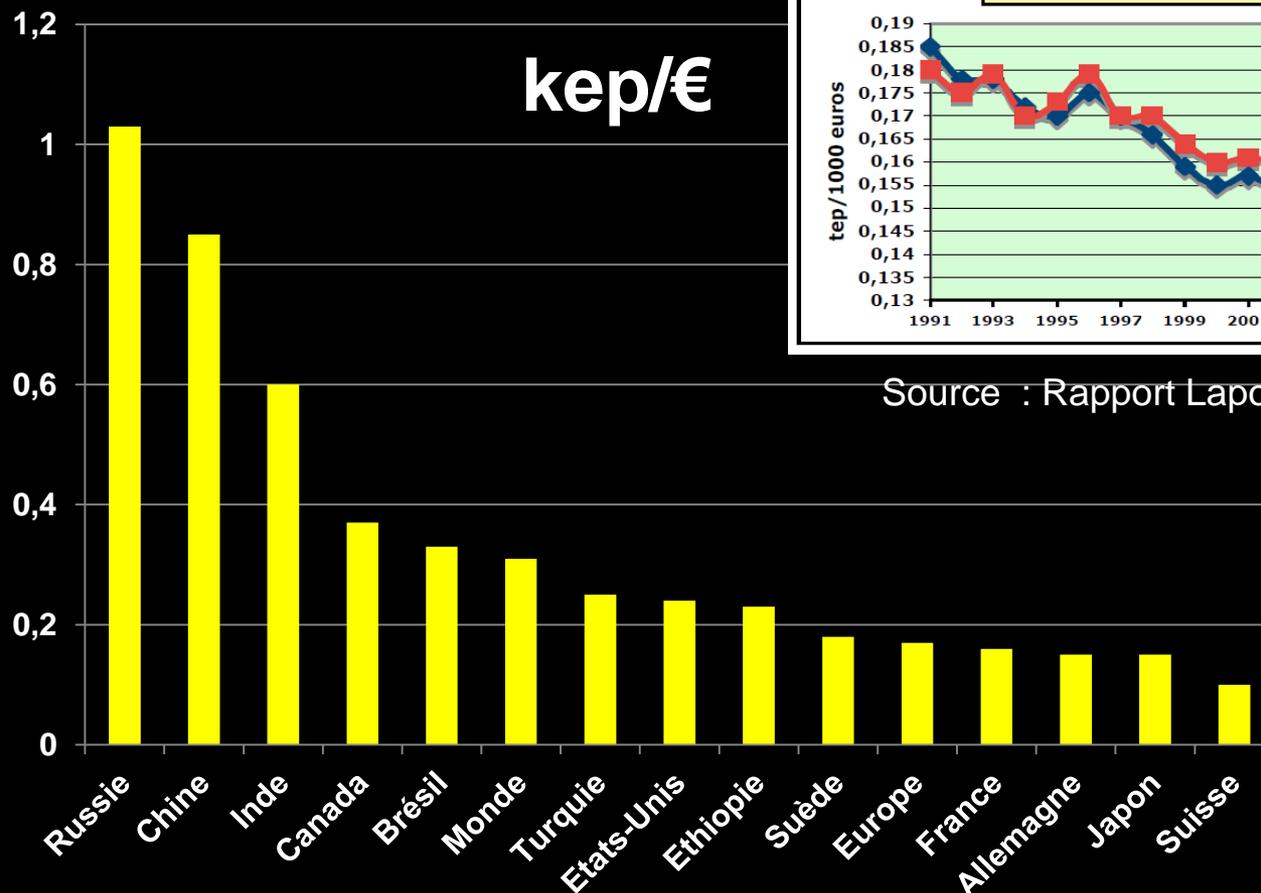


Source : SOeS, cité dans RéférenceS, Commissariat Général au Développement Durable, Juin 2010, p.36

L'intensité énergétique

- Intensité énergétique =
$$\frac{\textit{Consommation d'énergie}}{\textit{PIB}}$$
 - ✓ Affectée par le climat, le niveau de vie, l'efficacité des installations énergétiques, ...
- Mesure l'efficacité énergétique d'un pays
 - ✓ Une intensité élevée correspond à une économie « gourmande » en énergie

Intensité énergétique en 2009



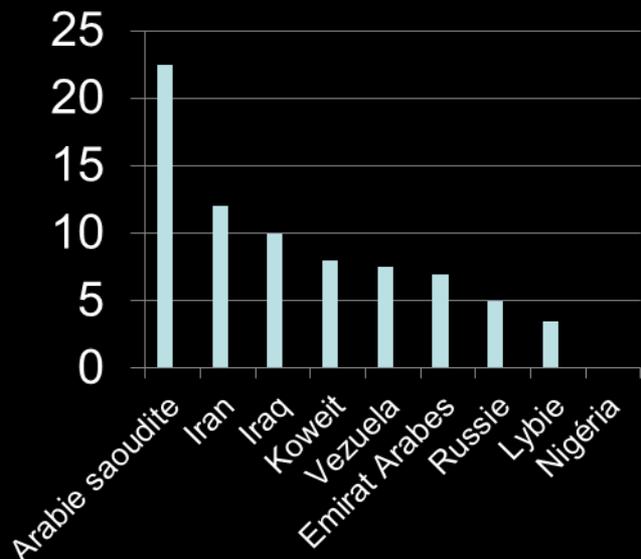
Source : Rapport Laponche, 2011, . 12

Source : EIA 2011: Information Energy Administration , DOE, www.doe.eia.gov, 2011

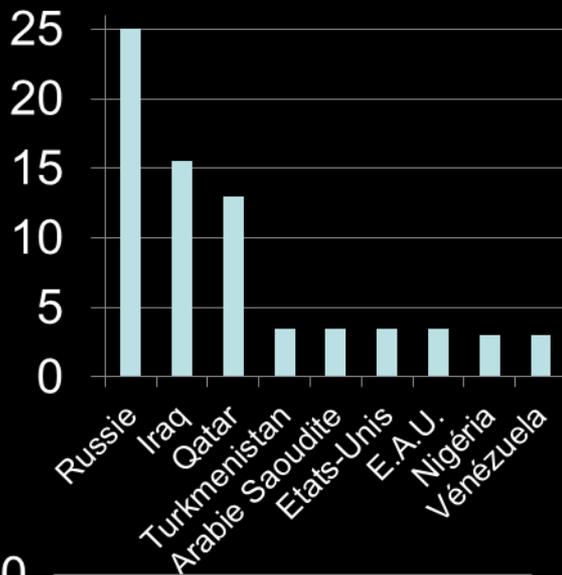
Indépendance énergétique

Pourcentage des réserves mondiales prouvées

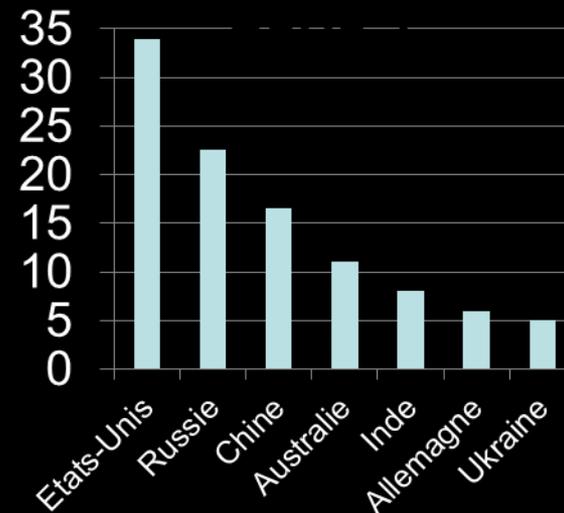
Pétrole



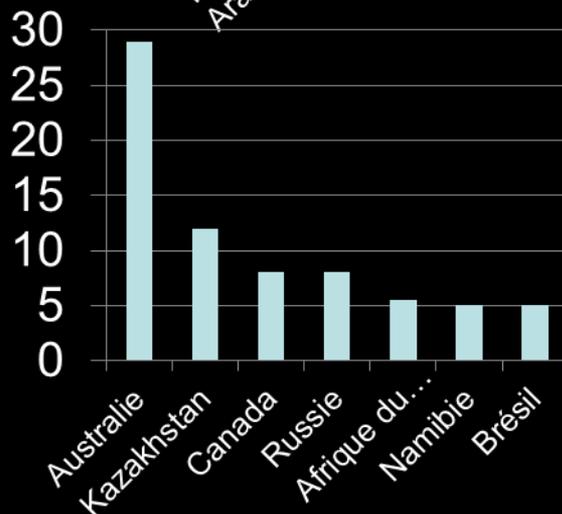
Gaz naturel



Charbon

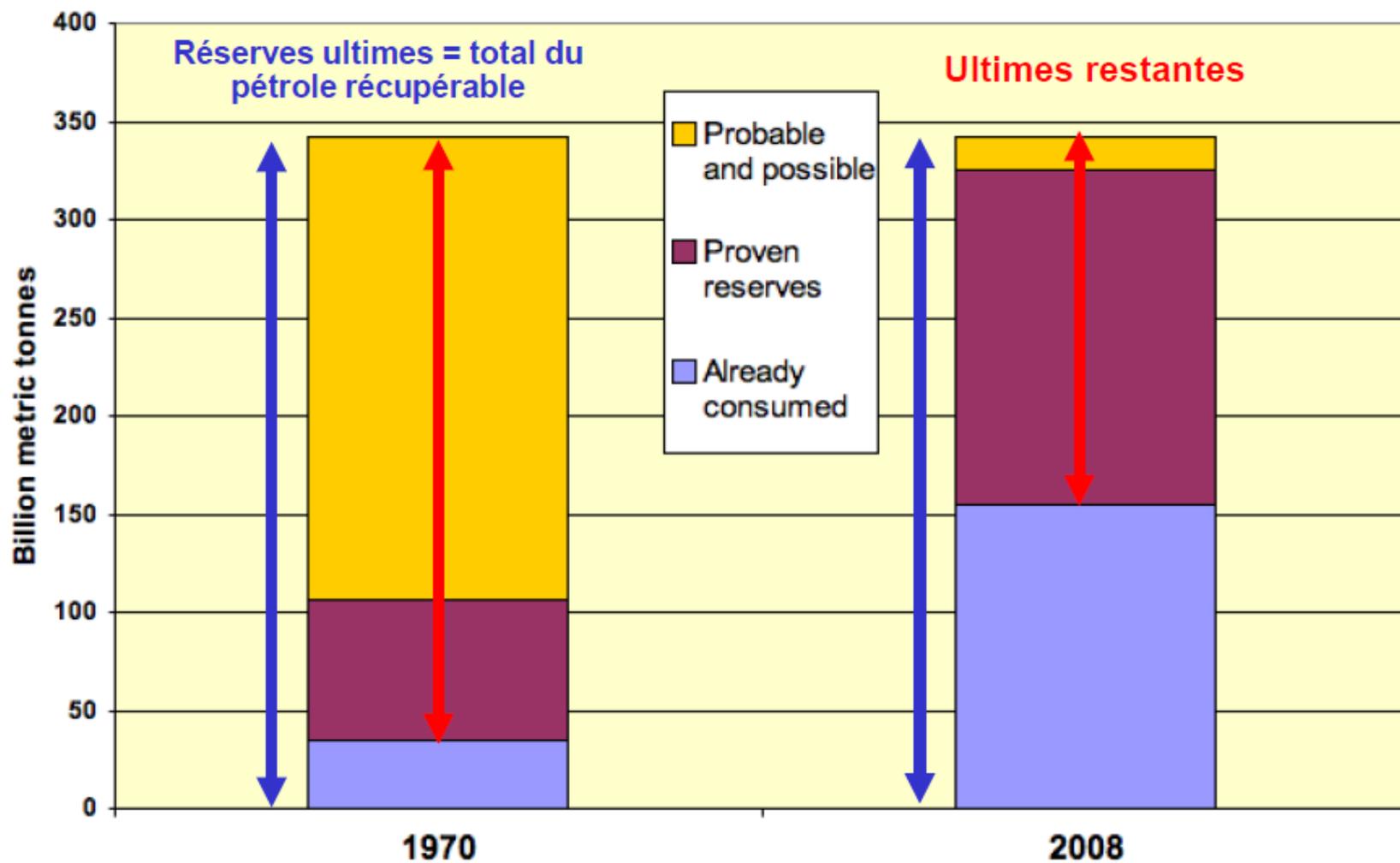


Uranium



Source : lacona, Taine, 2011

Réserves de pétrole



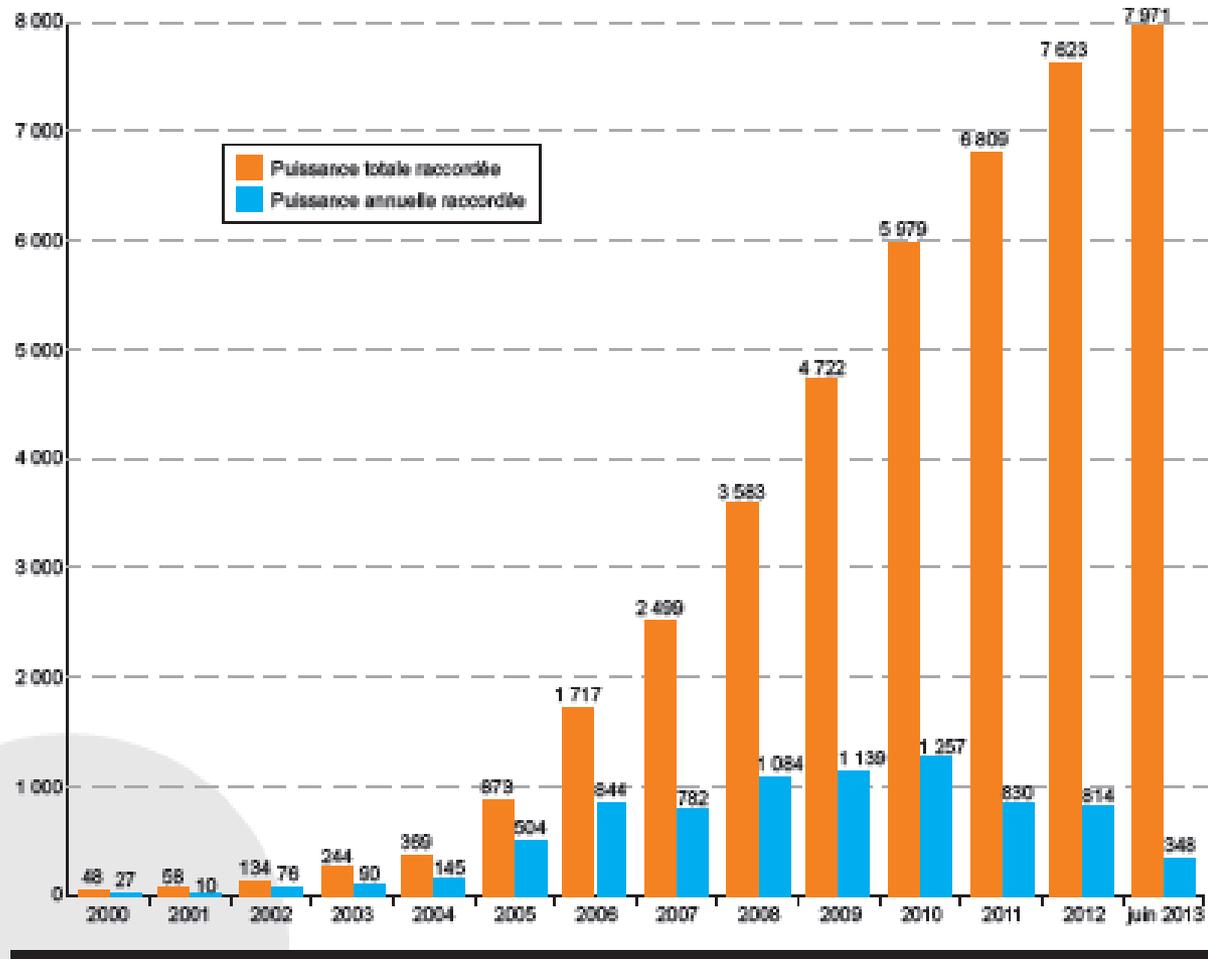
L'augmentation des réserves prouvées est un trompe-l'œil : ce qui compte, ce sont les **ultimes restantes**... qui ont bien diminué.

Jancovici, 2010, d'après BP Stat 2009, Schilling et al 1977 ; ultimes = 2500 milliards de barils

Graph. n° 1

Evolution de la puissance éolienne raccordée depuis 2000 (en MW)

Source : SOeS 2013



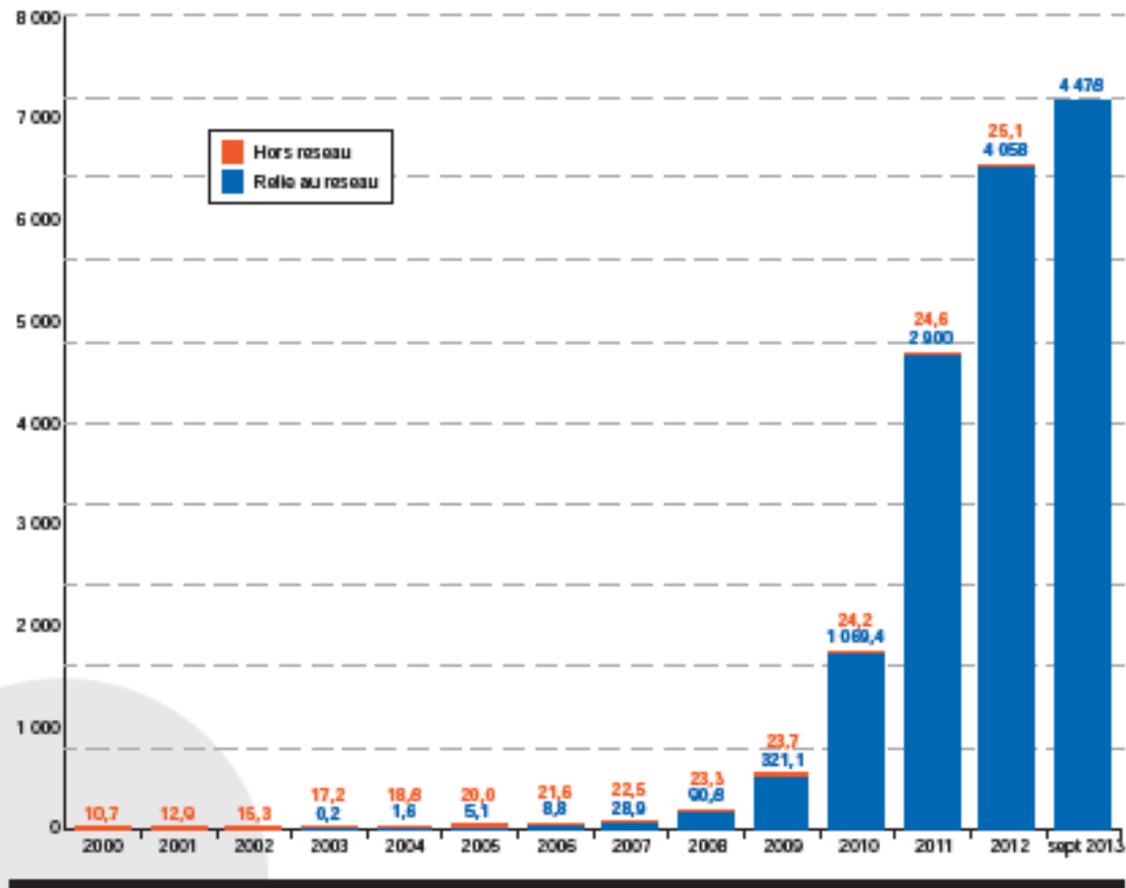
Observ'ER

Le Baromètre 2013
des énergies renouvelables
électriques en France

Graph. n° 1

Puissance totale cumulée installée en France (métropole + DOM) en MWc à fin septembre 2013

Source : SOeS 2013



17

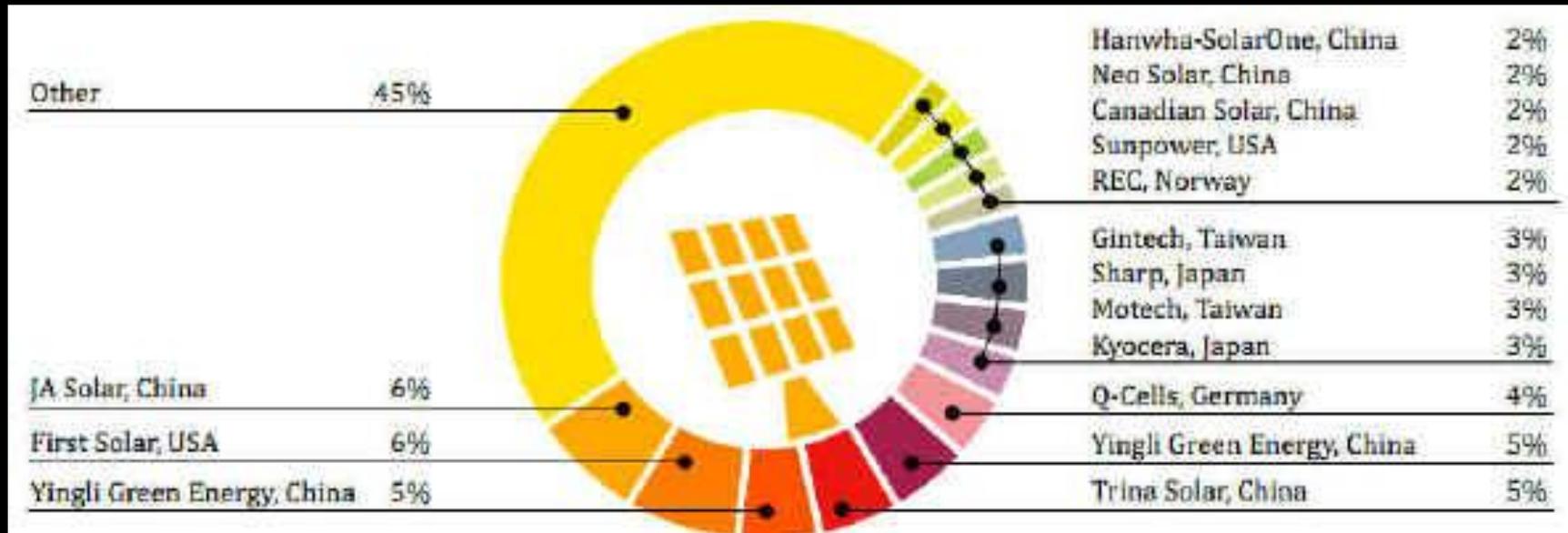
Observ'ER

Le Baromètre 2013
des énergies renouvelables
électriques en France

Solaire photovoltaïque

Principaux fabricants et leurs parts de marché fin 2010

Source : Programme des Nations Unies pour l'Environnement REN21



Grenelle - électricité renouvelable : où en est-on ?

Filière	Objectif 2020	Situation actuelle	Commentaire
Éolien	19 000 MW sur terre	7 971 MW fin sept. 2013	Objectif très incertain. Depuis 3 ans, les puissances annuellement installées sont en recul.
Hydraulique	28 300 MW	25 388 MW fin 2012	Objectif très incertain. Cela dépendra de la réussite de la relance de la filière et du renouvellement des concessions hydrauliques.
Biogaz	4 230 GWh	1 284 GWh en 2012	L'objectif peut être atteint. Cela dépendra de l'efficacité des tarifs d'achat appliqués.
Énergies marines	6 800 MW (dont 6 000 MW d'éolien en mer)	240 MW fin 2012	Objectif inatteignable. L'éolien en mer a pris du retard et l'avancée des projets des autres technologies est lente.
Photo-voltaïque	5 400 MWc	4 478 MWc fin sept. 2013	L'objectif pourrait être atteint dès 2015. Le seuil visé n'est pas ambitieux, comparé au potentiel de la filière.
Déchets et biomasse solide	1,2 Mtep produites	0,35 Mtep en 2012	Objectif très incertain. Cela dépendra de la réussite des appels d'offres CRE pour la biomasse solide et de l'amélioration énergétique des sites d'incinération actuels.
Géothermie	80 MW	17,2 MW fin 2012	L'objectif peut être atteint. De nouveaux projets se concrétisent mais leur avancée est lente.
Solaire thermo-dynamique	540 MW	1,01 MW	Objectif très incertain. L'enjeu de la filière n'est pas au niveau de la production nationale mais à l'export.