



L'énergie: critères pour une transition énergétique

Bernard Tamain

Professeur d'Université Emérite – ENSI de Caen

Membre du Conseil Scientifique de « Sauvons le Climat »

L'énergie: critères pour une transition énergétique

- l'abondance
 - peut-on produire assez ?
 - réserves de pétrole, de gaz, de charbon, d'uranium,...
 - abondance des renouvelables
 - peut-on consommer moins ?
 - en étant économes
 - en améliorant l'efficacité énergétique
- la sécurité d'approvisionnement
- la balance commerciale
- les conséquences environnementales
 - pollution
 - déchets
 - effet de serre
 - les risques
- les coûts
- le cas spécifique de l'électricité

- **Réflexions sur les scénarios**

L'énergie: critères pour une transition énergétique

- l'abondance

- peut-on produire assez ?

- réserves de pétrole, de gaz, de charbon, d'uranium,...
- abondance des renouvelables

- peut-on consommer moins ?

- en étant économes
- en améliorant l'efficacité énergétique

- la sécurité d'approvisionnement

- la balance commerciale

- les conséquences environnementales

- pollution
- déchets
- effet de serre
- les risques

- les coûts

- le cas spécifique de l'électricité

- Comparaison de scénarios



La situation d'aujourd'hui (énergie primaire 2015):

production (consommation) mondiale: 14 Gtep/an*
(14 milliards de tonnes-équivalent-pétrole par an)

soit 1,8 tep/habitant/an

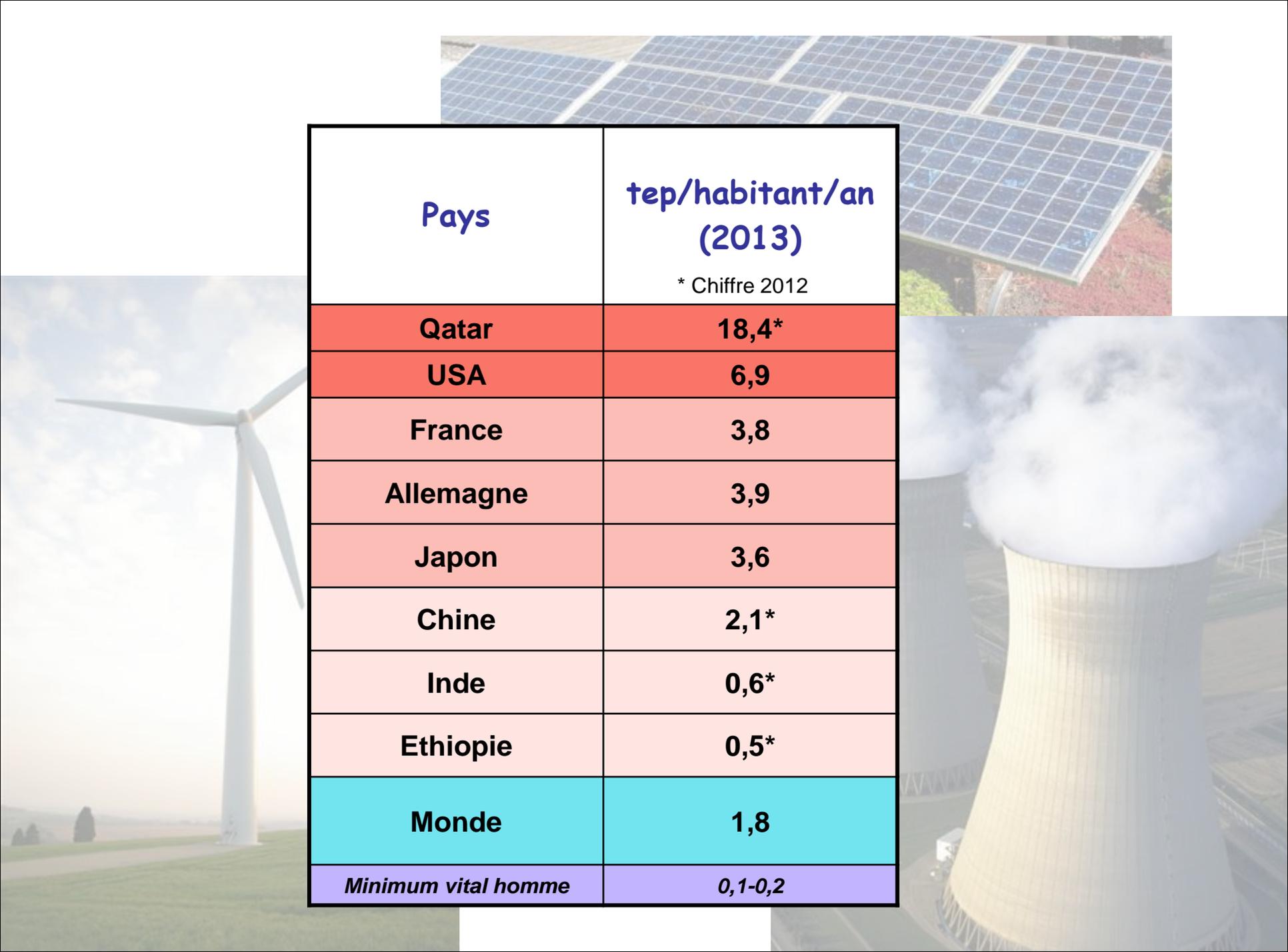
* Source Enerdata

1tep = 12000 kWh



La France consomme 3,9 tep/habitant/an

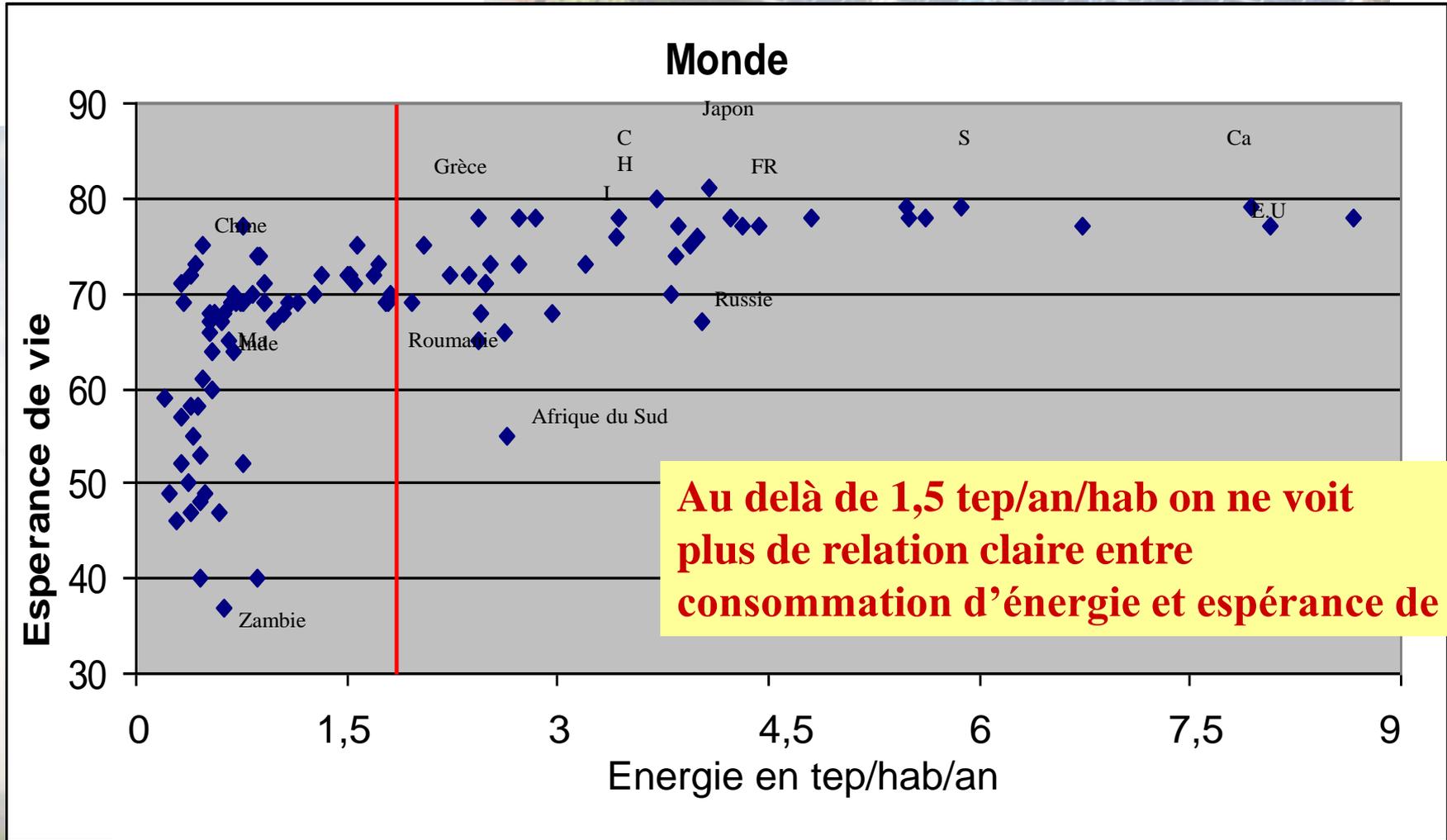


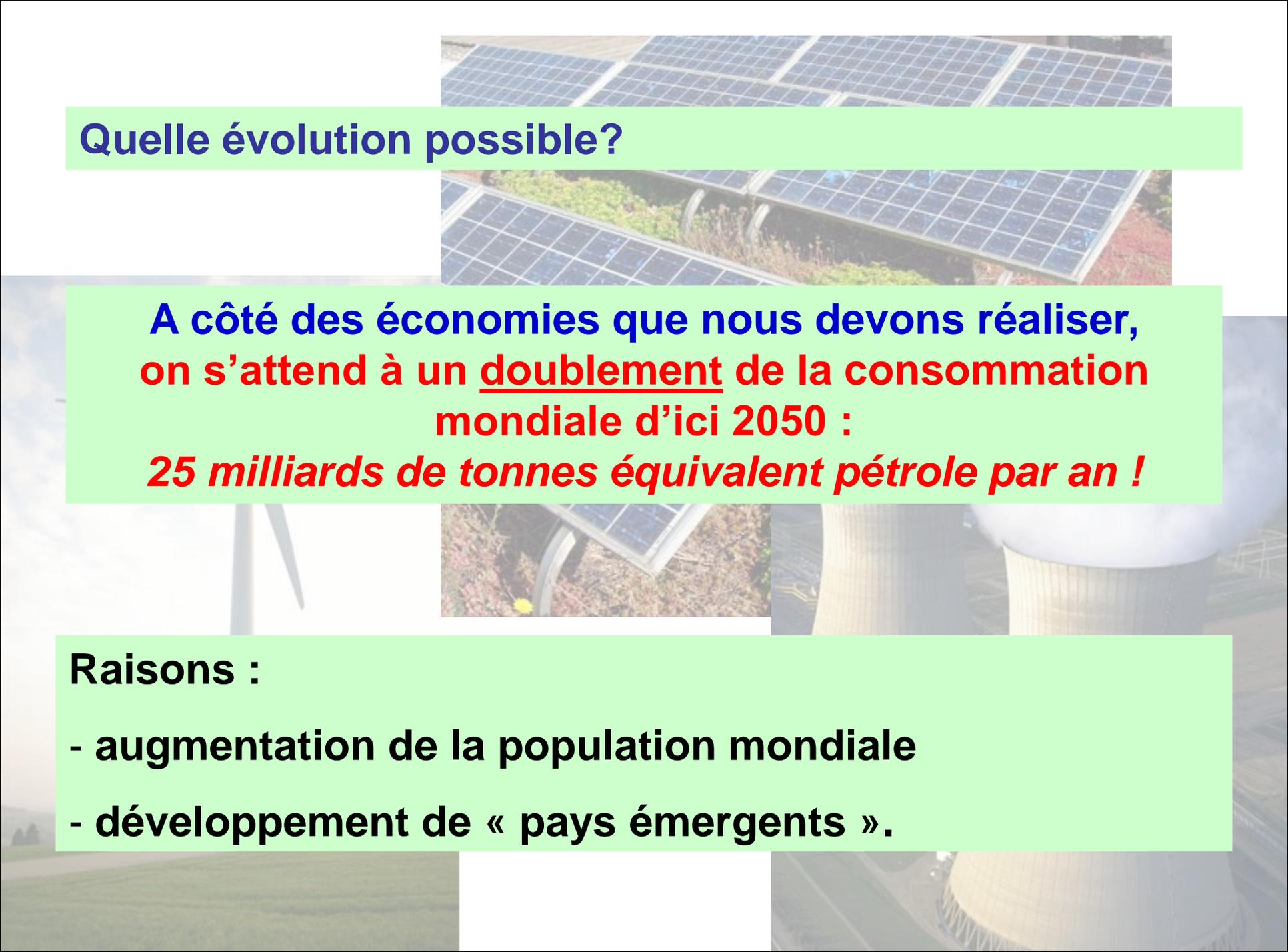


Pays	tep/habitant/an (2013)
Qatar	18,4*
USA	6,9
France	3,8
Allemagne	3,9
Japon	3,6
Chine	2,1*
Inde	0,6*
Ethiopie	0,5*
Monde	1,8
<i>Minimum vital homme</i>	<i>0,1-0,2</i>

* Chiffre 2012

La corrélation consommation-espérance de vie





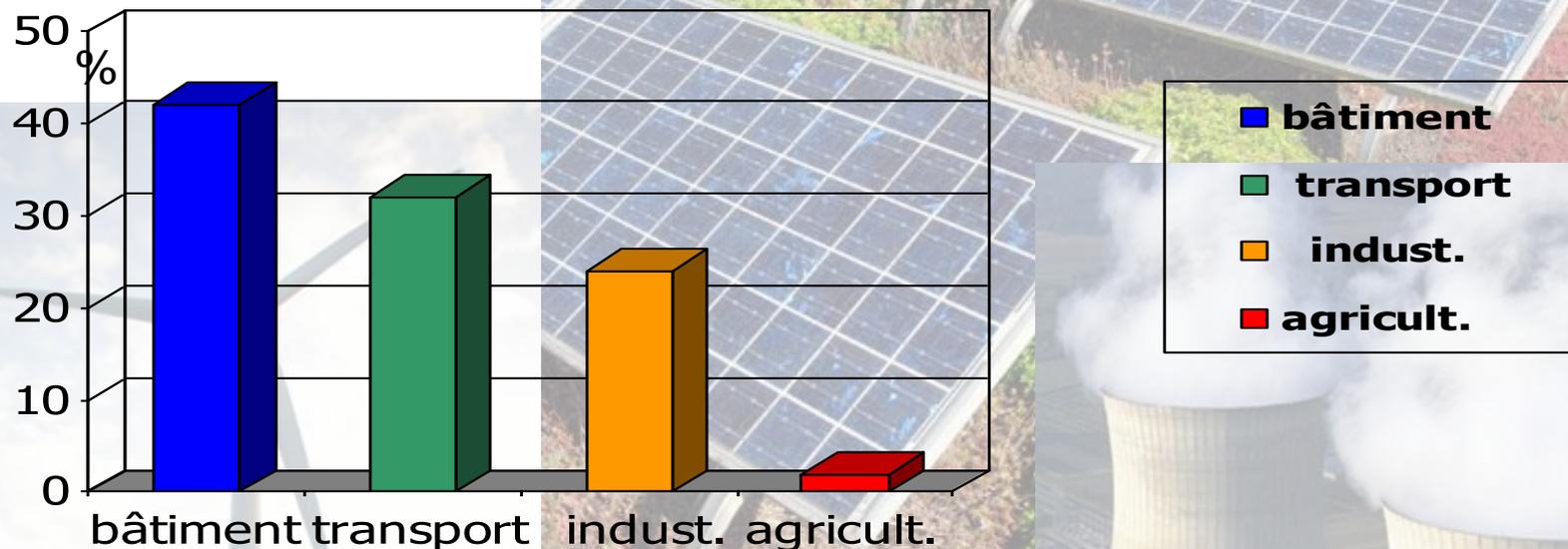
Quelle évolution possible?

A côté des économies que nous devons réaliser, on s'attend à un doublément de la consommation mondiale d'ici 2050 :
25 milliards de tonnes équivalent pétrole par an !

Raisons :

- augmentation de la population mondiale
- développement de « pays émergents ».

**■ Comment consomme-t-on l'énergie finale dans les pays développés?
Cas de la France**



	Totale primaire	Tertiaire Résident.	Transports	Industrie
Evolution France en 30 ans	+53%	+21%	+92%	-8%

Comment réduire la consommation en France ?

un facteur 2 ?

- **Le facteur 2 ne viendra pas d'une réduction des besoins.**
- **L'essentiel ne peut venir que d'une amélioration de l'efficacité énergétique.**

Action	Effet sur la conso énergie finale
Diminution de la consommation chauffage d'un facteur 3	- 17%
Amélioration du rendement moteurs de 30%	- 5%
La moitié des transports marchandises par ferroutage	- 5%
Cogénération	- 5%
total	- 32%

Comment réduire la consommation en France ?

un facteur 2 ?

- Le facteur 2 ne viendra pas d'une réduction des besoins.
- L'essentiel ne peut venir que d'une amélioration de l'efficacité énergétique.

Action	Conso énergie finale
Diminution de la consommation (facteur 3)	- 67%
Amélioration du rendement motorisé (30%)	- 10%
Levée des dépenses	- 5%
Conservation	- 5%
total	- 32%

Le facteur 2 implique des bouleversements socio-économiques

Plus concrètement, le scénario Négawatt qui vise ce facteur 2 implique une décroissance

Où peut-on trouver l'énergie dont on aura besoin ?

Deux familles possibles :

– Énergies **non-renouvelables**

- Pétrole
- Gaz
- Charbon
- Uranium-thorium
- Deutérium, lithium ???

– Énergies **renouvelables**

- Hydraulique

• Vent

• Solaire

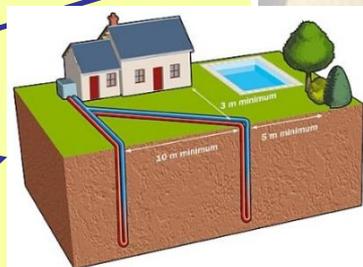
– thermique

– photovoltaïque

- Biomasse

- Géothermique

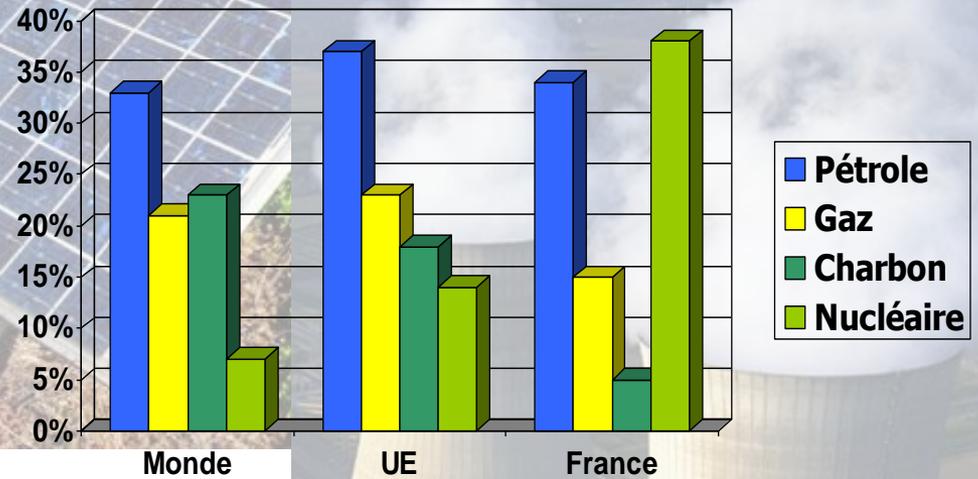
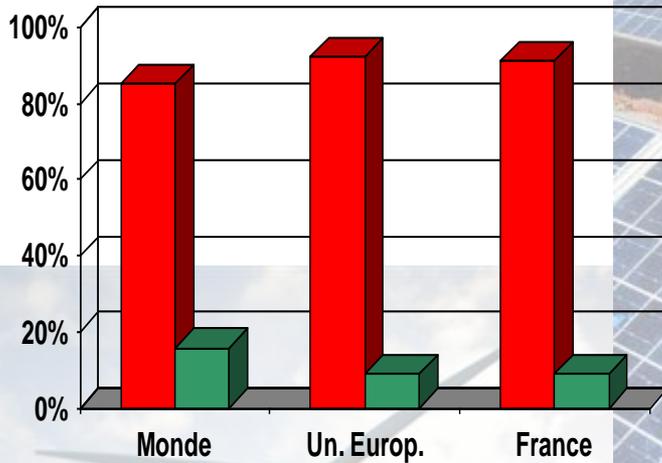
- Mer



Si vous ne voyez pas l'animation, téléchargez le plug-in Flash [rubrique Aide]



Aujourd'hui :

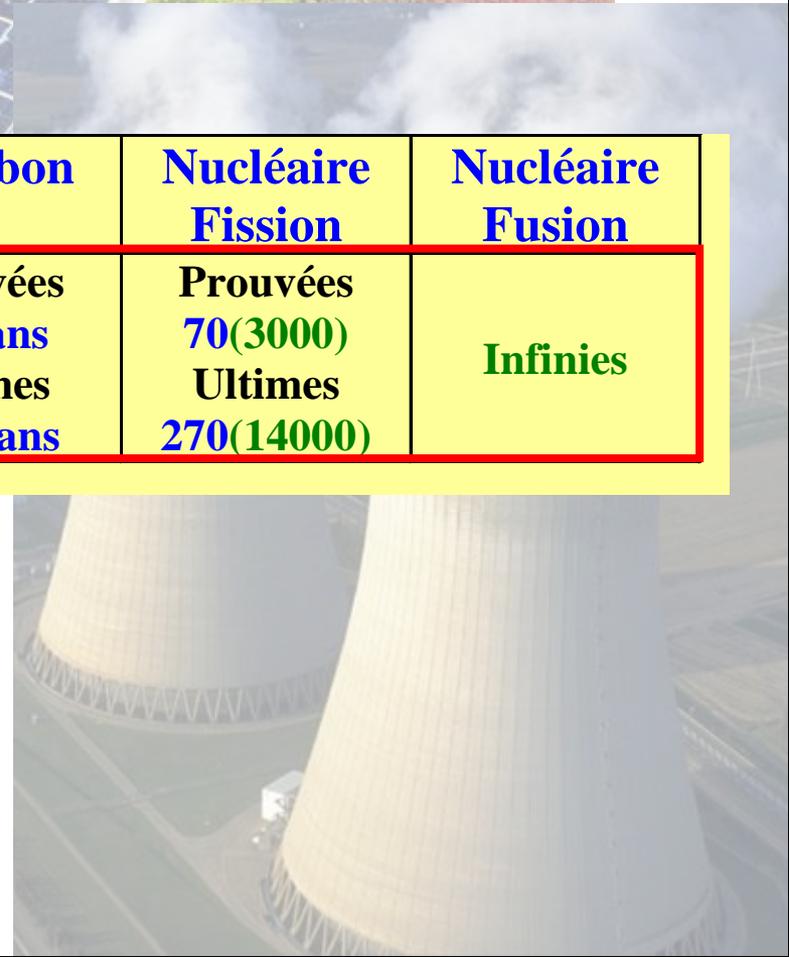


Quid des évolutions possibles compte tenu des ressources?

Pétrole et gaz vont devenir rares



<i>Source</i>	Pétrole	Gaz	Charbon	Nucléaire Fission	Nucléaire Fusion
<i>Ressources (années de consomm. 2000)</i>	Prouvées 30 ans Ultimes 125 ans	Prouvées 80 ans Ultimes 220 ans	Prouvées 210 ans Ultimes 1400 ans	Prouvées 70(3000) Ultimes 270(14000)	Infinies



L'énergie: critères pour une transition énergétique

- l'abondance

- peut-on produire assez ?

- réserves de pétrole, de gaz, de charbon, d'uranium,...
- abondance des renouvelables

- peut-on consommer moins ?

- en étant économes
- en améliorant l'efficacité énergétique

- la sécurité d'approvisionnement

- la balance commerciale

- les conséquences environnementales

- pollution
- déchets
- effet de serre
- les risques

- les coûts

- le cas spécifique de l'électricité

- Comparaison de scénarios

L'énergie: critères pour une transition énergétique

- l'abondance

- peut-on produire assez ?

- réserves de pétrole, de gaz, de charbon, d'uranium,...
- abondance des renouvelables

- peut-on consommer moins ?

- en étant économes
- en améliorant l'efficacité énergétique

- la sécurité d'approvisionnement

- la balance commerciale

- les conséquences environnementales

- pollution
- déchets
- effet de serre
- les risques

- les coûts

-le cas spécifique de l'électricité

- Comparaison de scénarios

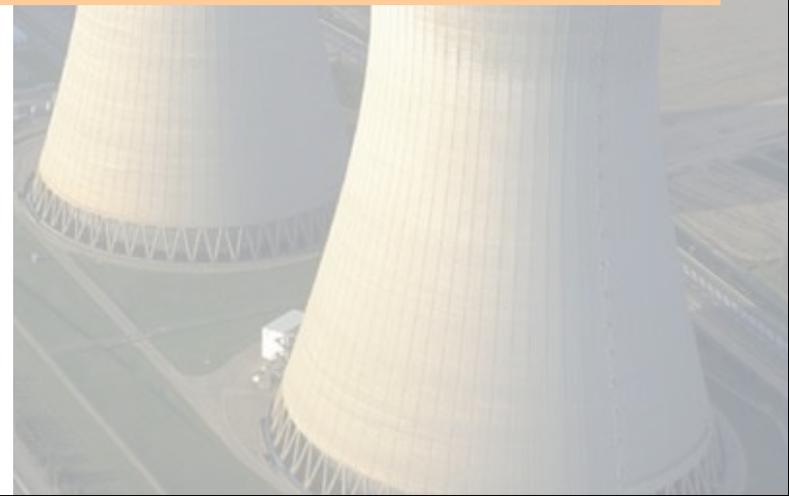
L'énergie: critères pour une transition énergétique

- l'abondance
 - peut-on produire assez ?
 - réserves de pétrole, de gaz, de charbon, d'uranium,...
 - abondance des renouvelables
 - peut-on consommer moins ?
 - en étant économes
 - en améliorant l'efficacité énergétique
- la sécurité d'approvisionnement
- **la balance commerciale**
- les conséquences environnementales
 - pollution
 - déchets
 - effet de serre
 - les risques
- les coûts
- le cas spécifique de l'électricité
- **Comparaison de scénarios**



Le déficit commercial de la France a été de 54 G€ en 2014

Les importations de pétrole, gaz, charbon ont pesé 55 G€ en 2014



L'énergie: critères pour une transition énergétique

- l'abondance
 - peut-on produire assez ?
 - réserves de pétrole, de gaz, de charbon, d'uranium,...
 - abondance des renouvelables
 - peut-on consommer moins ?
 - en étant économes
 - en améliorant l'efficacité énergétique
- la sécurité d'approvisionnement
- la balance commerciale
- **les conséquences environnementales**
 - pollution
 - déchets
 - effet de serre
 - les risques
- les coûts
- le cas spécifique de l'électricité
- **Comparaison de scénarios**

L'énergie: critères pour une transition énergétique

- l'abondance

- peut-on produire assez ?

- réserves de pétrole, de gaz, de charbon, d'uranium,...
- abondance des renouvelables

- peut-on consommer moins ?

- en étant économes
- en améliorant l'efficacité énergétique

- la sécurité d'approvisionnement

- la balance commerciale

- les conséquences environnementales

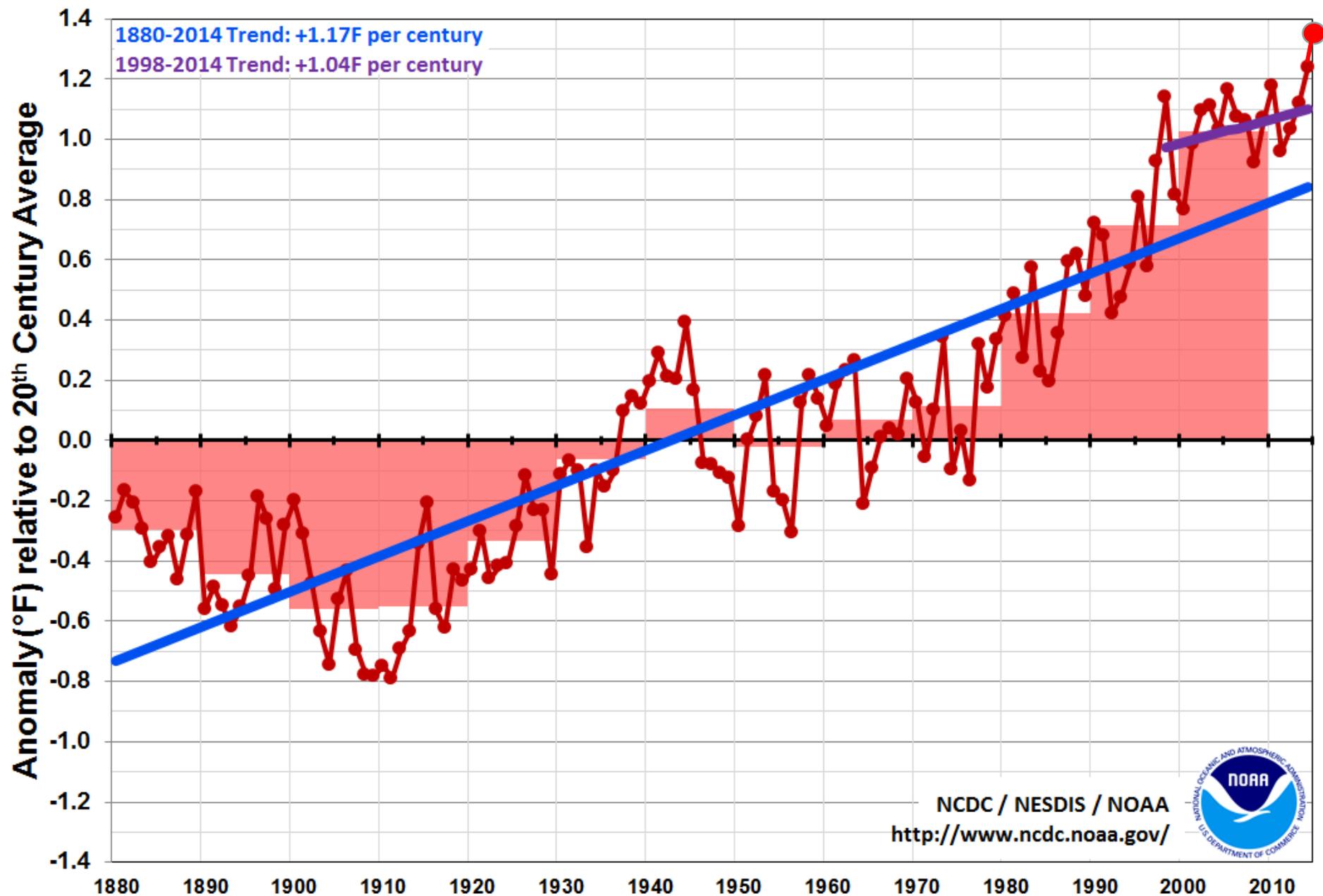
- pollution
- déchets
- effet de serre
- les risques

- les coûts

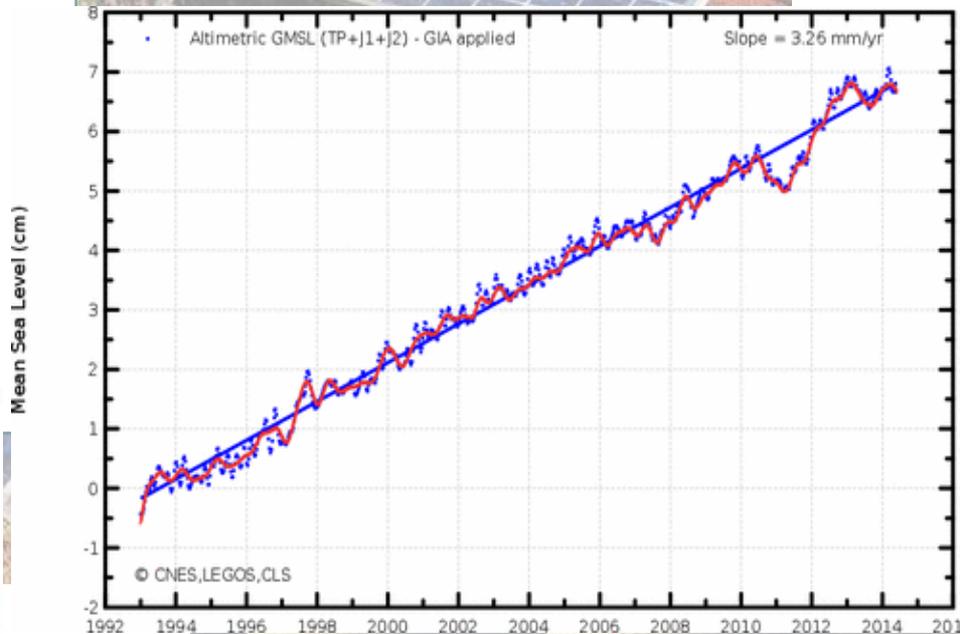
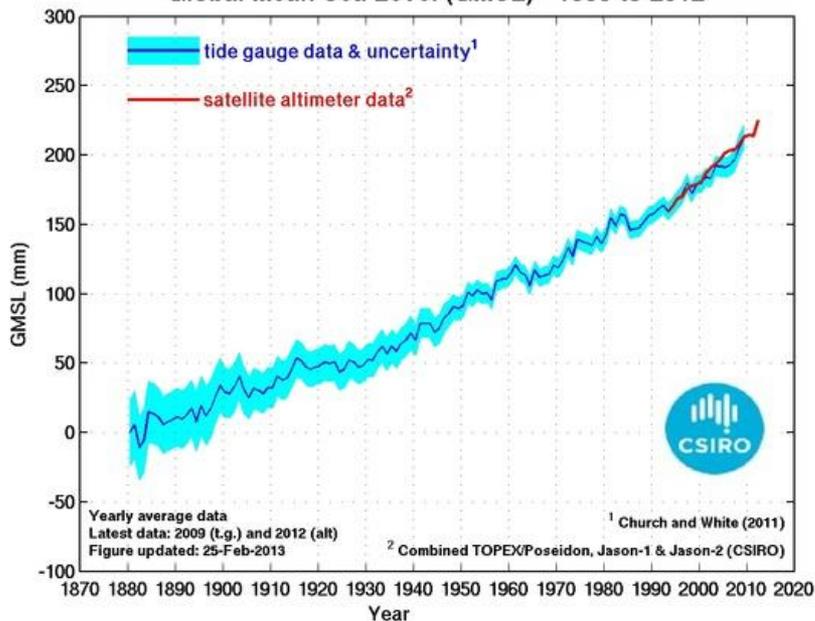
- le cas spécifique de l'électricité

- Comparaison de scénarios

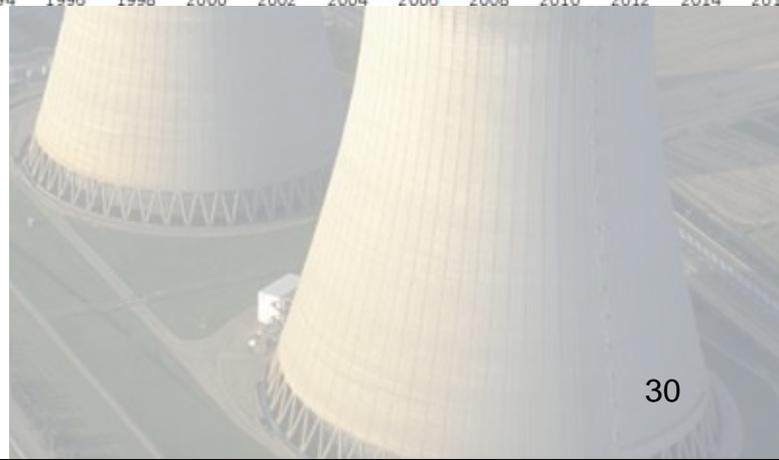
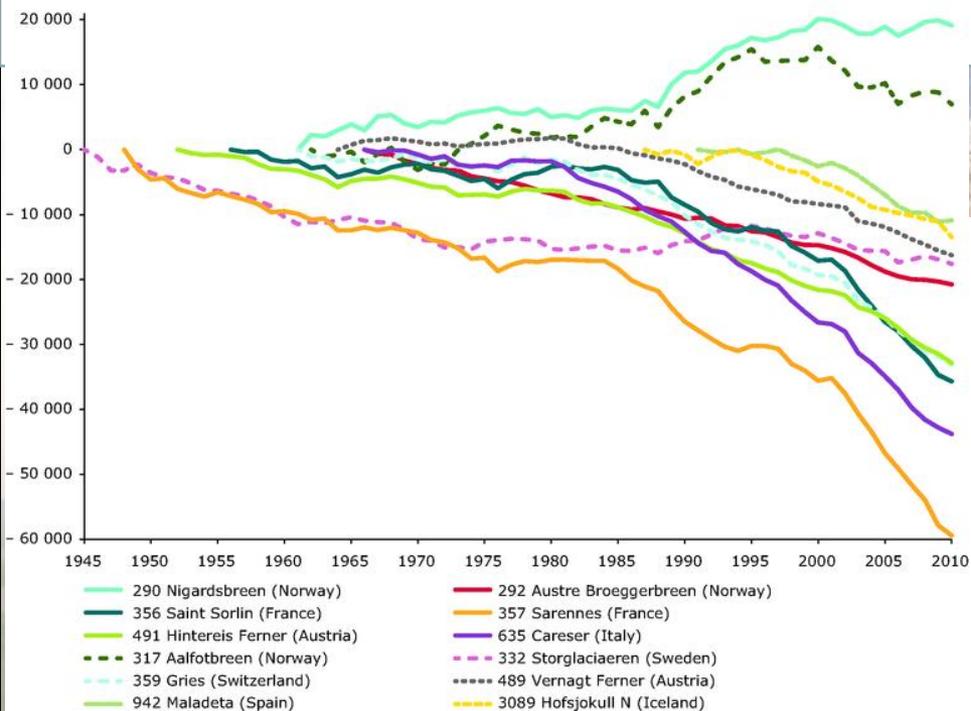
Annual Global Temperature (Combined Land & Ocean)



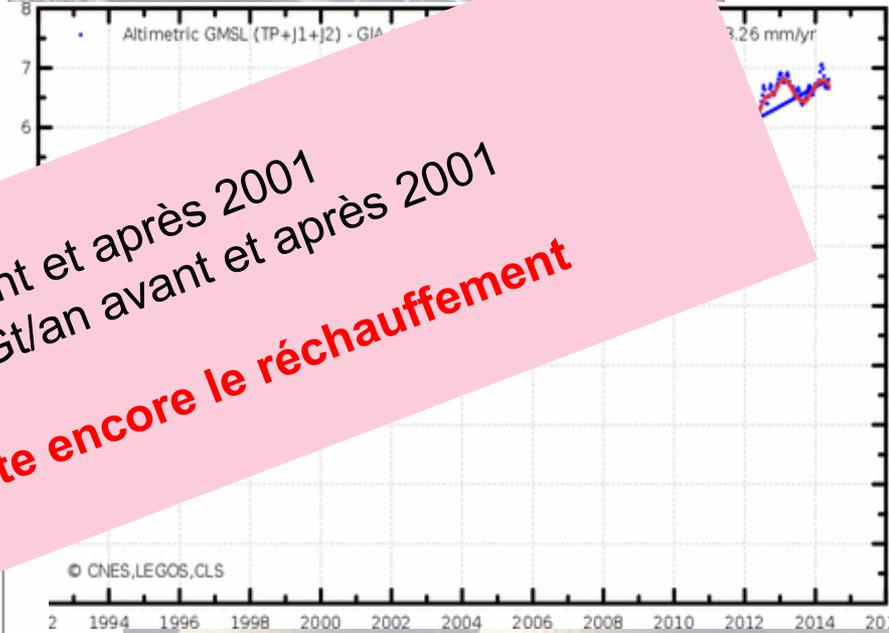
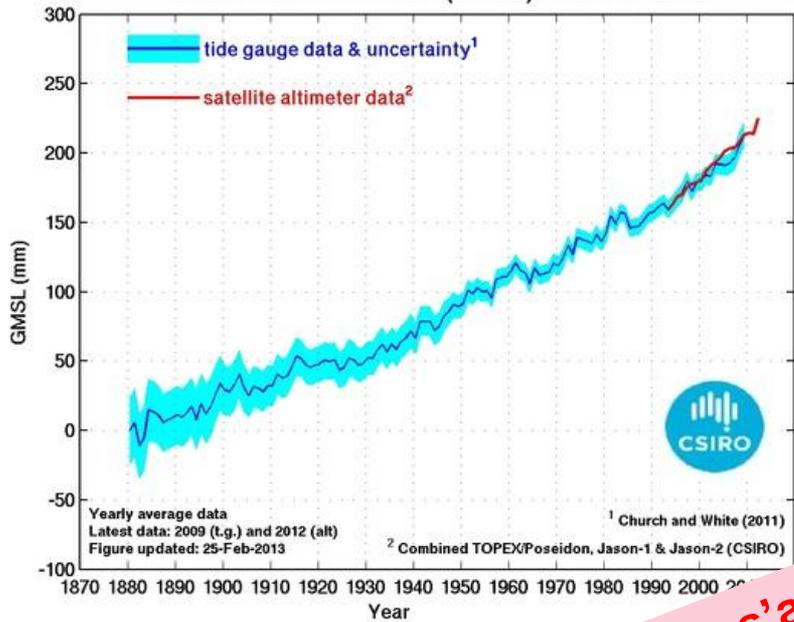
Global Mean Sea Level (GMSL) - 1880 to 2012



Cumulative net mass balance (mm water equivalent)

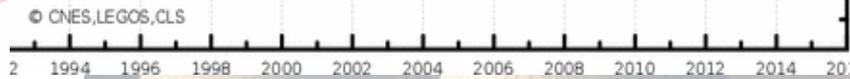
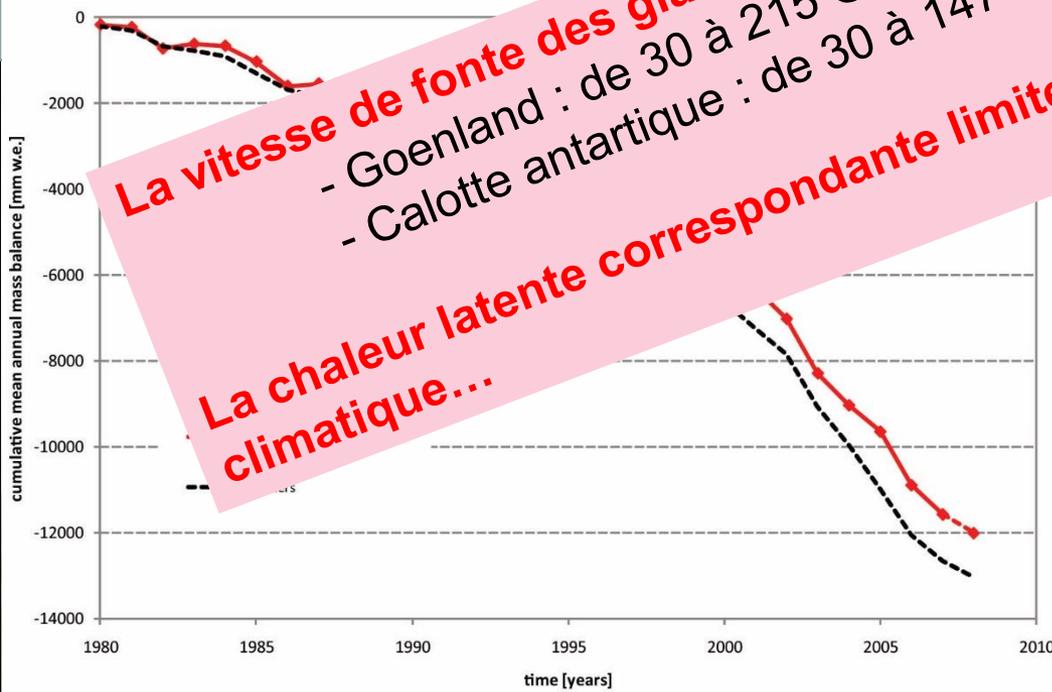


Global Mean Sea Level (GMSL) - 1880 to 2012

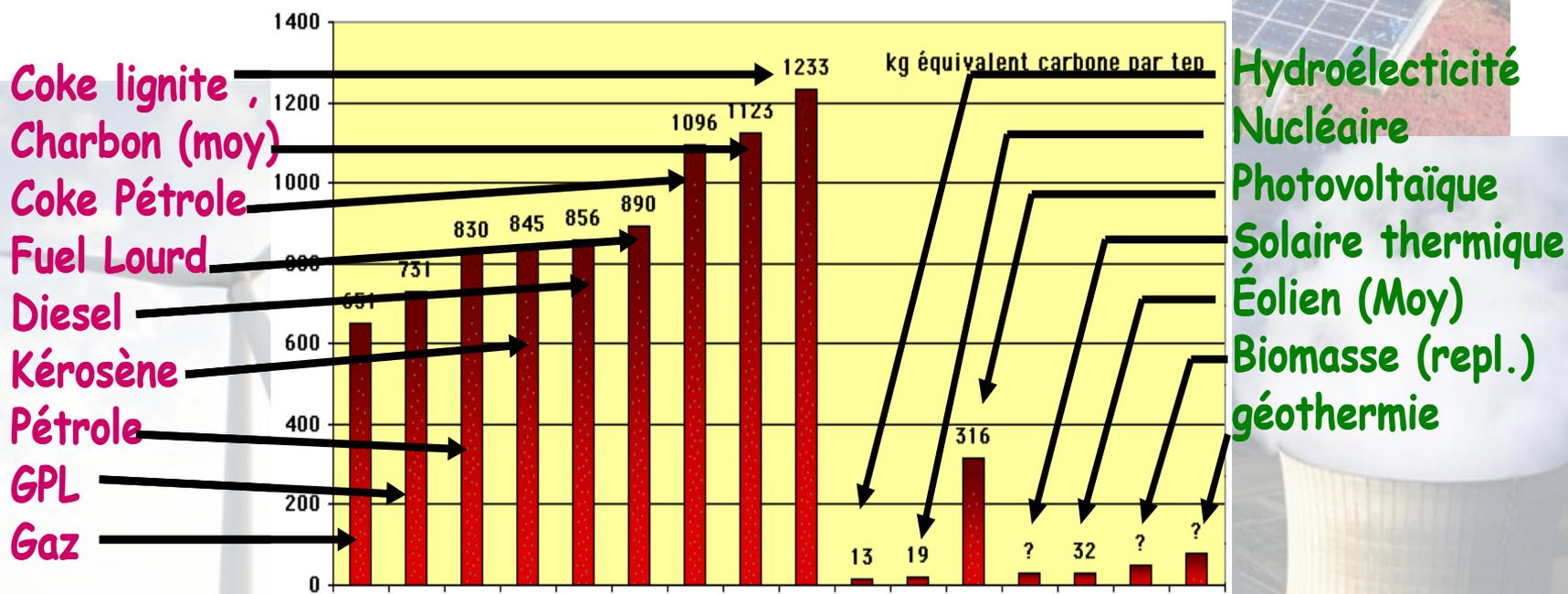


La vitesse de fonte des glaces s'accélère :
 - Groenland : de 30 à 215 Gt/an avant et après 2001
 - Calotte antarctique : de 30 à 147 Gt/an avant et après 2001

La chaleur latente correspondante limite encore le réchauffement climatique...



La contribution des énergies à l'effet de serre



Kg-equivalent-C émis par TWh pour diverses énergies. Pour les énergies Produisant de l'électricité, la conversion a été le taux physique (1TWh=42GJ=11,6MWh) Sources Manicore, ADEME, EDF

L'énergie: critères pour une transition énergétique

- l'abondance
 - peut-on produire assez ?
 - réserves de pétrole, de gaz, de charbon, d'uranium,...
 - abondance des renouvelables
 - peut-on consommer moins ?
 - en étant économes
 - en améliorant l'efficacité énergétique
- la sécurité d'approvisionnement
- la balance commerciale
- **les conséquences environnementales**
 - pollution
 - déchets
 - effet de serre
 - les risques
- les coûts
- le cas spécifique de l'électricité
- **Comparaison de scénarios**

L'énergie: critères pour une transition énergétique

- l'abondance
 - peut-on produire assez ?
 - réserves de pétrole, de gaz, de charbon, d'uranium,...
 - abondance des renouvelables
 - peut-on consommer moins ?
 - en étant économes
 - en améliorant l'efficacité énergétique
- la sécurité d'approvisionnement
- la balance commerciale
- les conséquences environnementales
 - pollution
 - déchets
 - effet de serre
 - les risques
- les coûts
- le cas spécifique de l'électricité
- Comparaison de scénarios

Le coût de l'électricité

Energie	Tarifs réglem. France (c€/kWh)
Gaz	
Charbon	
Nucléaire	4,2
Hydroélectricité	6-8
Eolien	8,2 (on-sh)
Photovoltaïque	26-62*
Biomasse	12-17
Géothermie	20-28

Sources: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-tarifs-d-achat-de-l,12195.html>

* Tarifs pour installations intégrées au bâti

Le problème du prix du photovoltaïque est d'autant plus important qu'il s'ajoute à celui de son intermittence.

Il faut ajouter le coût de la gestion de cette intermittence.

Le coût de l'électricité

Energie	Tarifs réglem. France (c€/kWh)
Gaz	
Charbon	
Nucléaire	4,2
Hydroélectricité	

En 2016, la CSPE sera de 2,25c€/kWh (+ 13%).

La facture 2016 sera de 4,7Md€ (CRE). L'état doit en plus à EDF 3,36 Md€.

Eolien et photovoltaïque produisent 5,1% de l'électricité.

L'équivalent de la CSPE en Allemagne est de 24 Md€.

Eolien et photovoltaïque produisent 15% de la consommation électrique.

Le problème du prix du photovoltaïque est d'autant plus important qu'il s'ajoute à celui de son intermittence.

Il faut ajouter le coût de la gestion de cette intermittence.

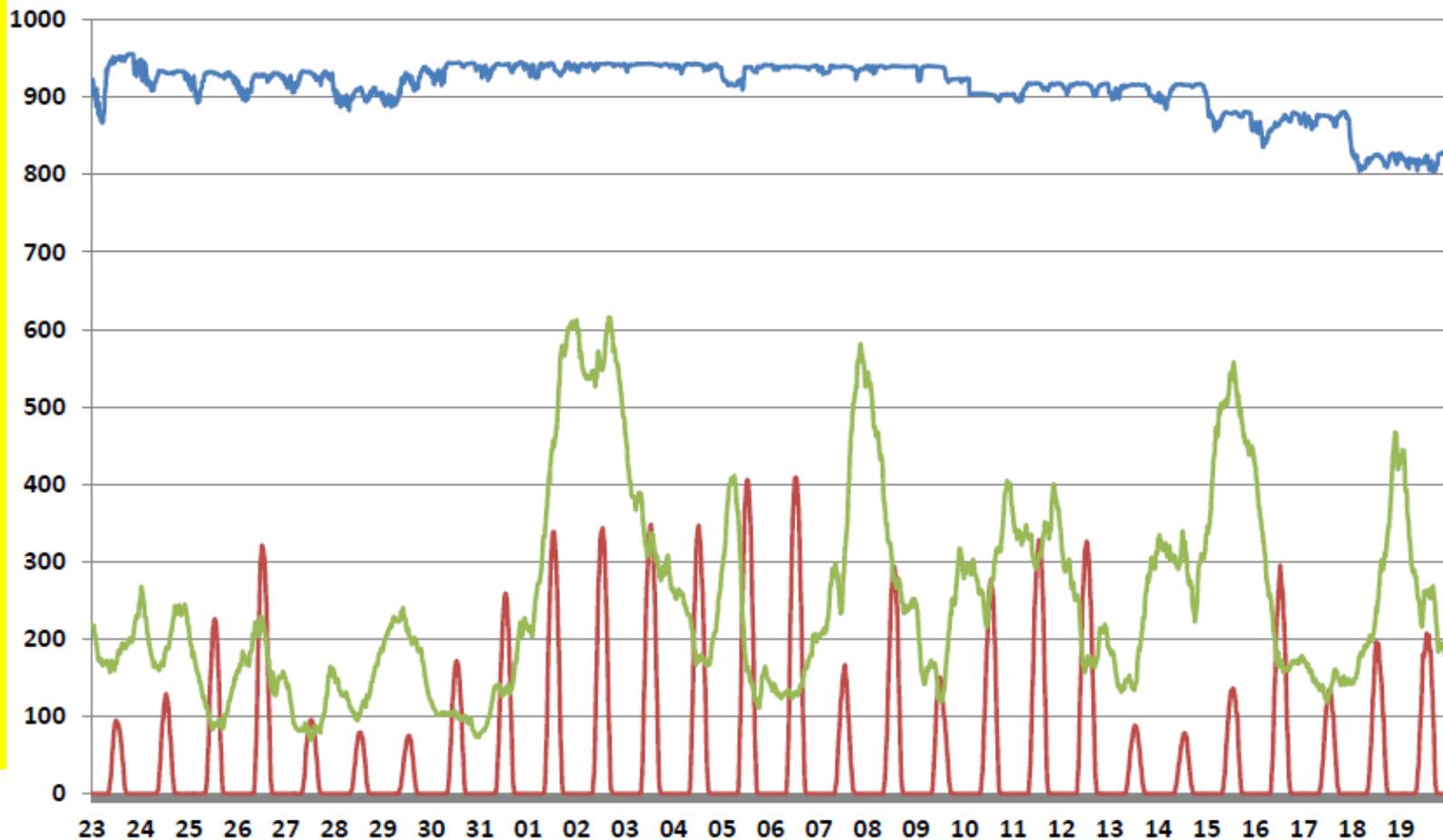
Comparaison des sources d'énergie

	pétrole	gaz	charbon	nucl.	hydrau	éolien	solaire	biom.	géoth.	mer
abond.	---	--	+	--- +++	+	++	+++	++	+	+
séc. app.	---	---	--	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
bal. com.	---	--	-	- +++	++	-	-	++	++	++
pollution	--	-	---	+++	+++	+++	++	+	+++	+++
déchets	-	+++	-	---	+++	++	+	+++	+++	+++
eff. serre	--	-	---	+++	+++	+++	++(+)	++	+++	+++
risques	--	--	---	---	--	++	+++	+	+++	+++
coût	++	++	++	++	+++	+ -	---	+	--	--
<u>intermit.</u>	+++	+++	+++	+++	+++	---	---	+++	+++	+

Comparaison, à puissance installées égales (1000 MW) des énergies fournies chaque heure par le nucléaire, l'éolien et le solaire pendant la vague de froid de février 2012



Énergie fournie en 1 heure en MWh





**Le problème de l'intermittence
doit être considéré avant toute décision
sous peine de transition ratée**

**Malheureusement, ce n'est généralement
pas le cas...**

Il n'y a aucune solution simple...

Le problème majeur de l'intermittence

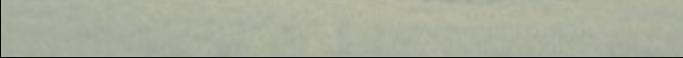
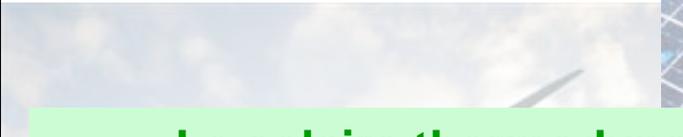
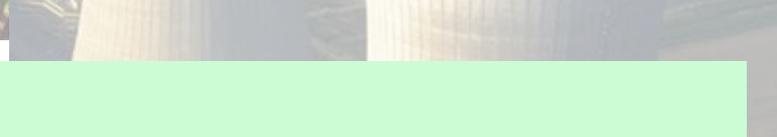
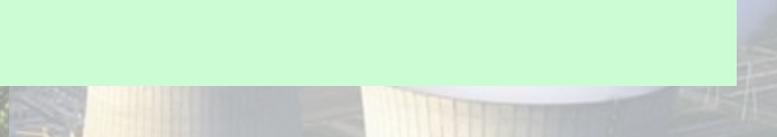
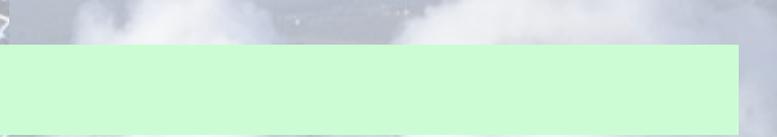
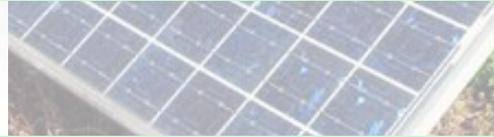
Solutions possibles :

- Le solaire thermodynamique

- Réseau performant et foisonnement

- Stockage

- Installations de back-up



La solution du stockage de la chaleur

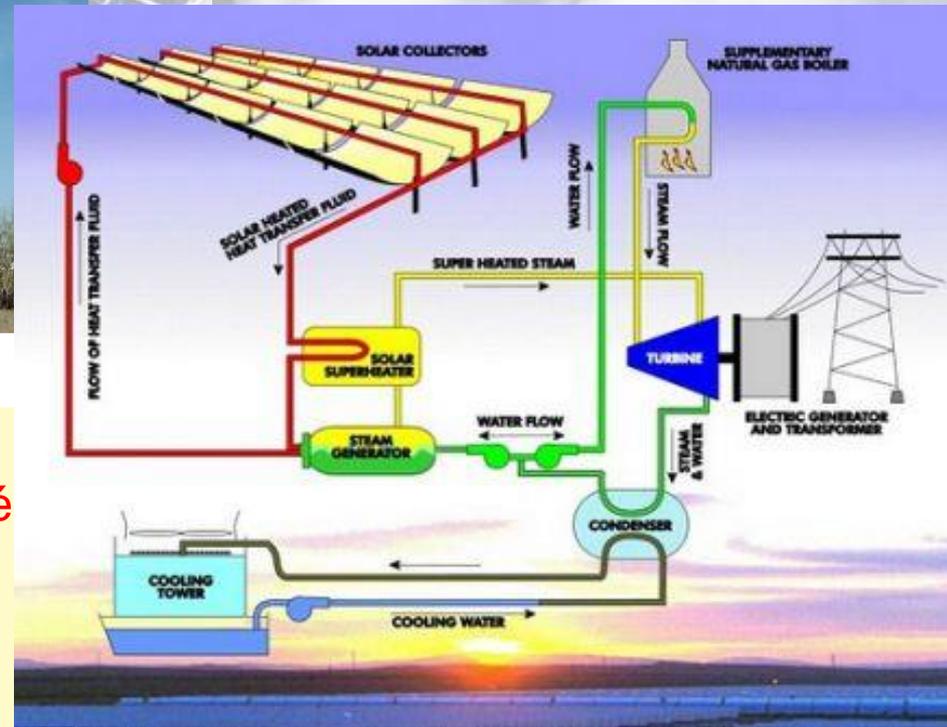
Le solaire thermodynamique



Avantages: lissage dans le temps

Problèmes: coûts
ne fonctionne pas si humidité
indépendance économique
écologie

Attention aux projets trompeurs



Alba Nova en Corse (12 MW)

Le problème majeur de l'intermittence

Solutions possibles :

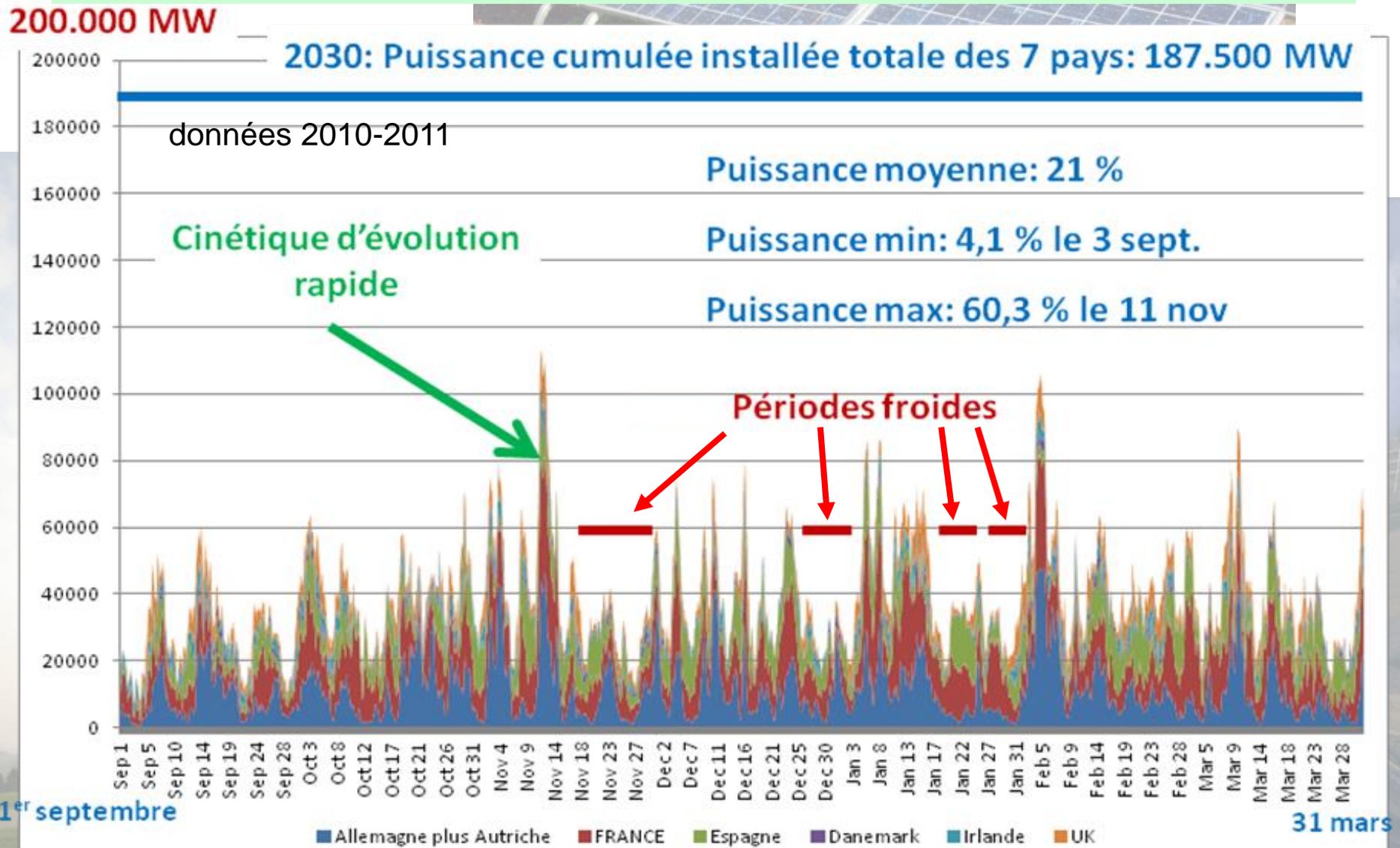
- Le solaire thermodynamique

- Réseau performant et foisonnement

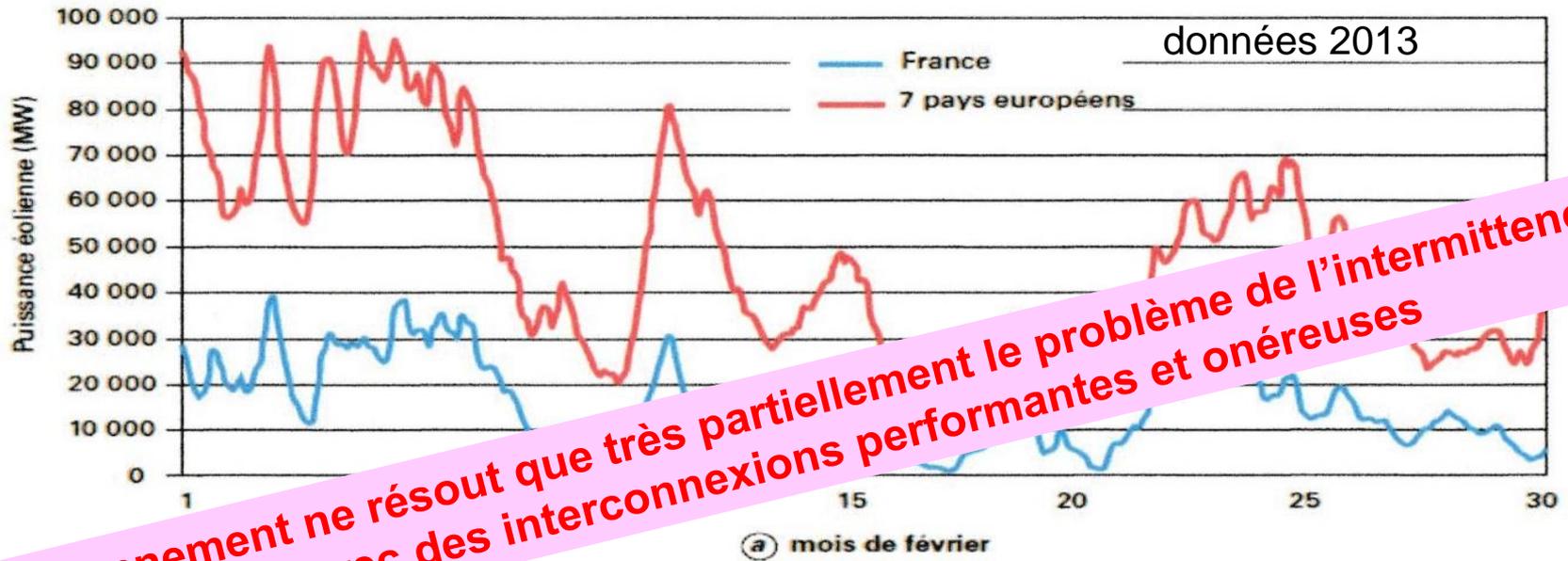
- Stockage

- Installations de back-up

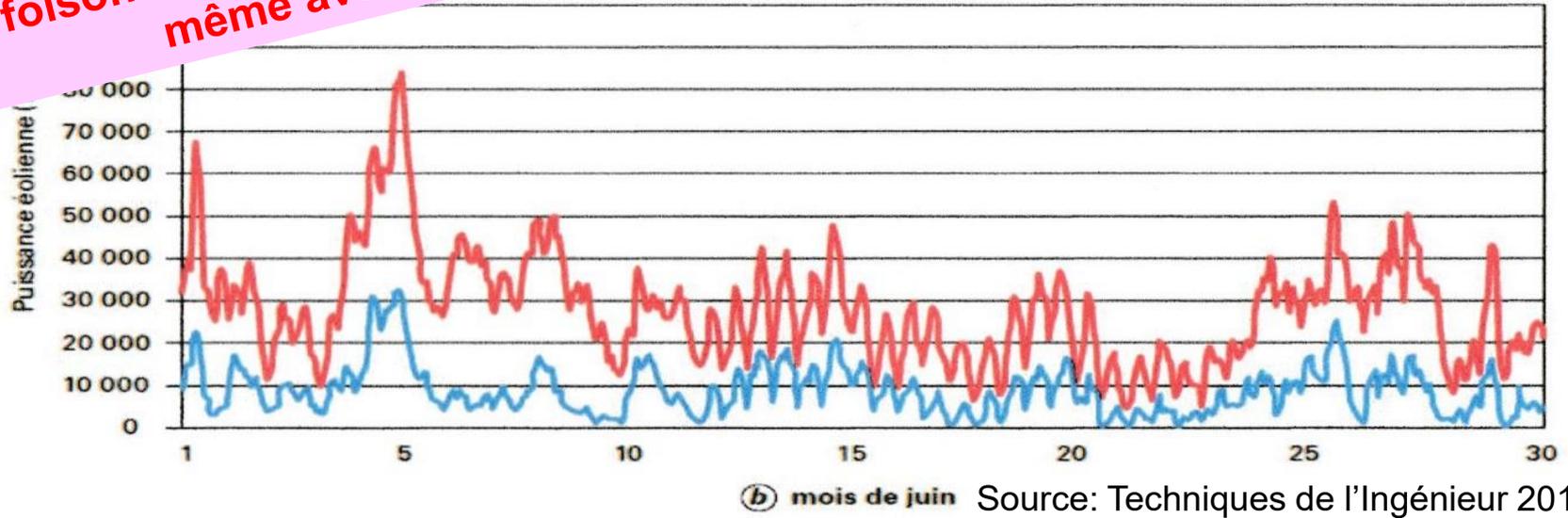
Réseau performant et foisonnement pour l'éolien : une fausse bonne idée ?



Réseau performant et foisonnement pour l'éolien : une fausse bonne idée ?



Le foisonnement ne résout que très partiellement le problème de l'intermittence, même avec des interconnexions performantes et onéreuses



Le problème majeur de l'intermittence

Solutions possibles :

- Le solaire thermodynamique

- Réseau performant et foisonnement

- Stockage

- Installations de back-up

Solutions de stockage de l'électricité

Deux paramètres importants :

le temps de stockage

la quantité à stocker

Trois échelles de temps :

quelques heures : jour - nuit

1 TWh

quelques jours ou semaines : durée d'un anticyclone

10 TWh

quelques mois : été - hiver

100 TWh

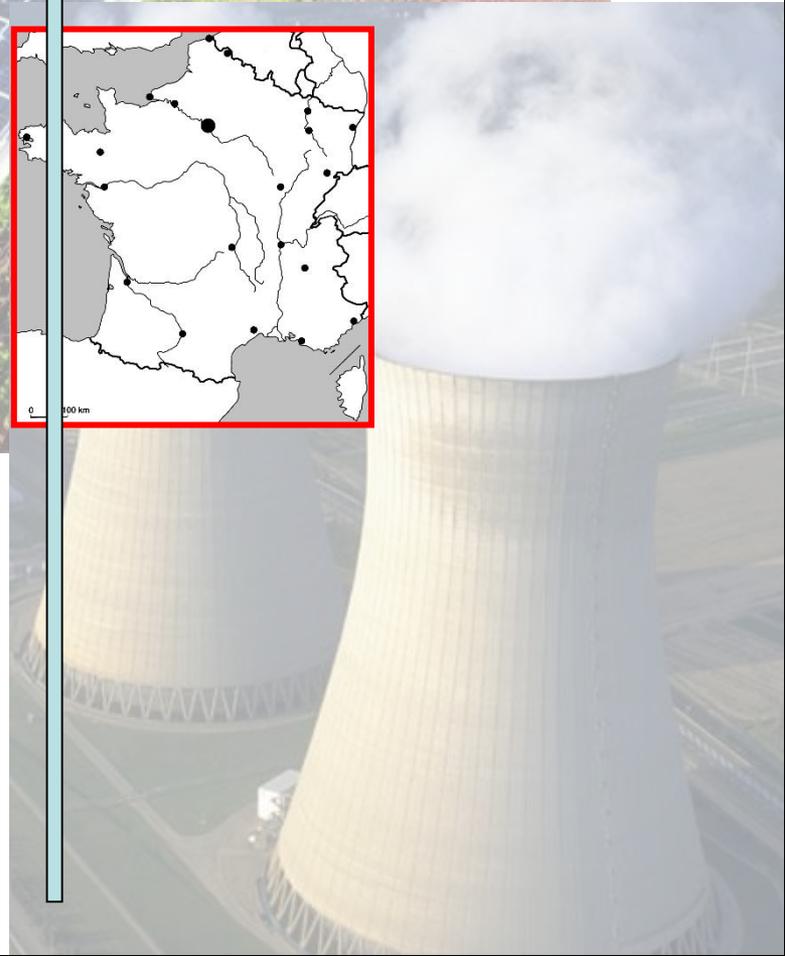
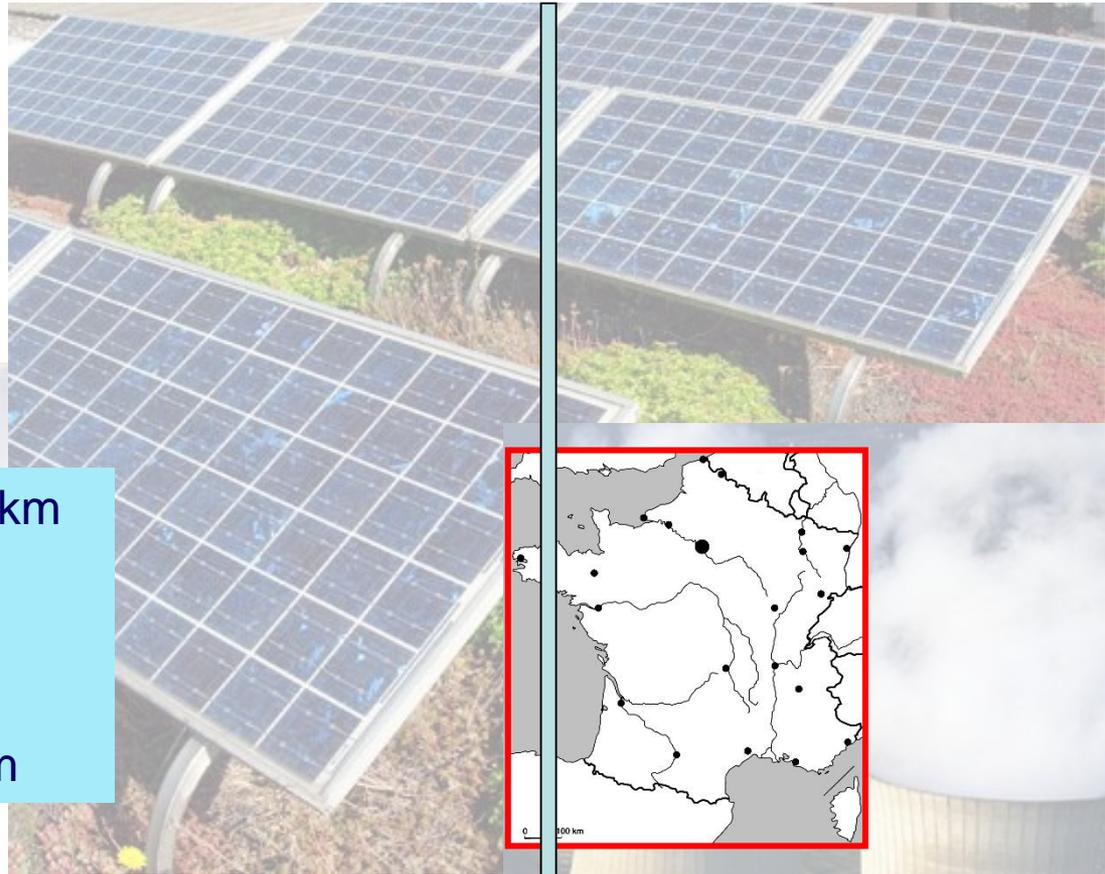
Un ordre de grandeur pour la solution la plus simple : relever de l'eau (STEP)

Longueur : 4000 km

Largeur : 100 m

Dénivelé : 100 m

Profondeur : 10 m



Solutions de stockage de l'électricité

- Les barrages (STEP)
- Les batteries
- Les super-condens.
- Les volants d'inertie
- L'air comprimé
- L'hydrogène

quantité	rendements
limitée	65 à 75%
faibles	70 à 80%
faibles	excellent
faibles	85 à 95%
fortes	35 à 70% selon techno
fortes	20 à 25%

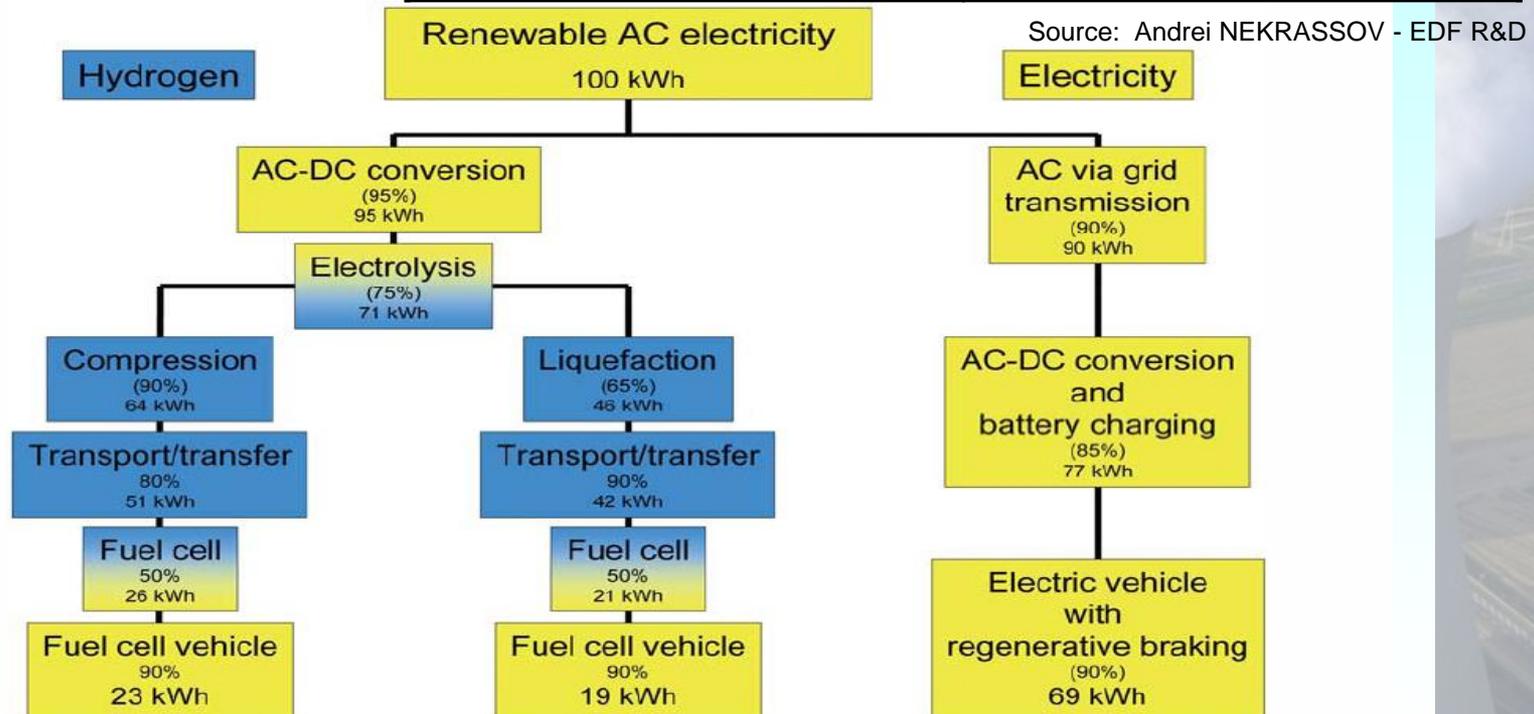


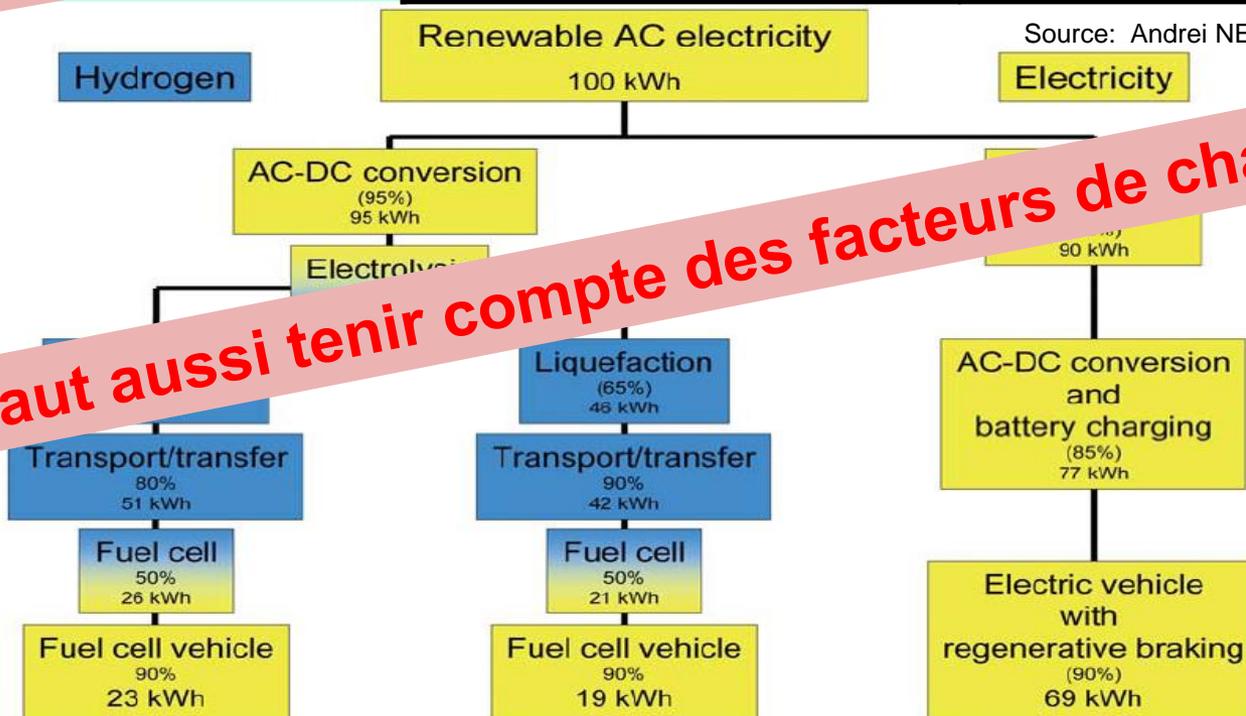
Fig. 9. Useful transport energy derived from renewable electricity.

Solutions de stockage de l'électricité

- Les barrages (STEP)
- Les batteries
- Les super-condens.
- Les volants d'inertie
- L'air comprimé
- L'hydrogène

	quantité	rendements
	limitée	65 à 75%
	faibles	70 à 80%
	faibles	85 à 95%
	fortes	35 à 70% selon techno
	fortes	20 à 25%

Ces rendements surenchérisent fortement les coûts...

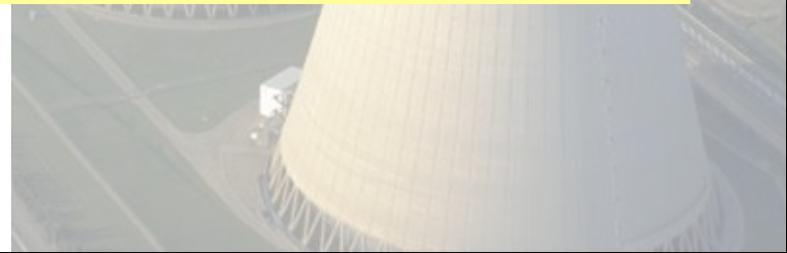


...et il faut aussi tenir compte des facteurs de charge...

Fig. 9. Useful transport energy derived from renewable electricity.



- **Le problème du stockage de l'électricité reste majeur.**
- **Et pourtant des efforts de recherche importants ont déjà été faits.**
- **Lever ce verrou est essentiel pour donner un sens au concept de bâtiment à énergie positive.**
- **Lever ce verrou est aussi essentiel pour que cesse le gaspillage d'argent public que constituent aujourd'hui des aides exagérées aux installations photovoltaïques qui produisent une énergie peu utile...**



Le problème majeur de l'intermittence

La recherche sur le stockage permettra-t-elle de réduire fondamentalement le problème?

...En attendant, on a besoin du back-up.



Le problème majeur de l'intermittence

Solutions possibles :

- Le solaire thermodynamique

- Réseau performant et foisonnement

- Stockage

- Installations de back-up

Comparaison des sources d'énergie

	pétrole	gaz	charbon	nucl.	hydrau	éolien	solaire	biom.	géoth.	mer
abond.	---	--	+	--- +++	+	++	+++	++	+	+
séc. app.	---	---	--	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
bal. com.	---	--	-	- +++	++	-	-	++	++	++
pollution	--	-	---	+++	+++	+++	++	+	+++	+++
déchets	-	+++	-	---	+++	++	+	+++	+++	+++
eff. serre	--	-	---	+++	+++	+++	++(+)	++	+++	+++
risques	--	--	---	---	--	++	+++	+	+++	+++
coût	++	++	++	++	+++	+ -	---	+	--	--
<u>intermit.</u>	+++	+++	+++	+++	+++	---	---	+++	+++	+

Comparaison des sources d'énergie

	pétrole	gaz	charbon	nucl.	hydrau	éolien	solaire	biom.	géoth.	mer
abond.	---	--	+	--- +++	+	++	+++	++	+	+
séc. app.	---	---	--	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
bal. com.	---	--	-	- +++	++	-	-	++	++	++
pollution	--	-	---	+++	+++	+++	++	+	+++	+++
déchets	-	+++	-	---	+++	++	+	+++	+++	+++
eff. serre	--	-	---	+++	+++	+++	++(+)	++	+++	+++
risques	--	--	---	---	--	++	+++	+	+++	+++
coût	++	++	++	++	+++	+ -	---	+	--	--
<u>intermit.</u>	+++	+++	+++	+++	+++	---	---	+++	+++	+

Le coût humain (nombre d'années de vie perdues): Comparaison charbon/nucléaire

Analyse du prix Nobel Burton Richter (Energy and Environmental Science)

Référence : production énergétique des réacteurs de Fukushima: 898 TWh

Hypothèses: - nucléaire : linéarité entre dose et effets
 - charbon : analyse ExterneE

Energie	Coût humain (nombre d'années de vie perdues)
Accident de Fukushima	4 800
Charbon	124 000

Une étude du grand climatologue James Hansen va dans le même sens...

Kharecha, P.A., and J.E. Hansen, 2013: Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power. *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 4889-4895, doi:10.1021/es3051197.

Comparaison des sources d'énergie

	pétrole	gaz	charbon	nucl.	hydrau	éolien	solaire	biom.	géoth.	mer
abond.	---	--	+	--- +++	+	++	+++	++	+	+
séc. app.	---	---	--	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
bal. com.	---	--	-	- +++	++	-	-	++	++	++
pollution	--	-	---	+++	+++	+++	++	+	+++	+++
déchets	-	+++	-	---	+++	++	+	+++	+++	+++
eff. serre	--	-	---	+++	+++	+++	++(+)	++	+++	+++
risques	--	--	---	---	--	++	+++	+	+++	+++
coût	++	++	++	++	+++	+ -	---	+	--	--
intermit.	+++	+++	+++	+++	+++	---	---	+++	+++	+

**A cause de tous ces problèmes...
...une comparaison détaillée des
scenarios possibles montre que :**

tant que l'on ne sait pas résoudre à bas coût l'intermittence
c'est-à-dire

tant qu'on ne sait pas stocker massivement les électricités
éolienne et photovoltaïque,....

**... il n'y a pas de scenario crédible permettant
d'avoir à la fois :**

- croissance**
- réduction de l'effet de serre**
- sortie du nucléaire**

