

Les énergies renouvelables sur le territoire français

Thierry Ranchin

Ecole des Mines de Paris
Centre Energétique et Procédés

thierry.ranchin@ensmp.fr

Le contexte

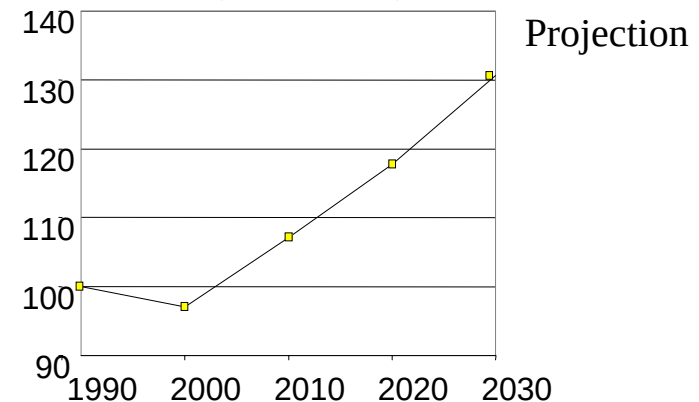
- ➡ Accroissement de la dépendance énergétique de l'Union: 70% en 2030
 - ➡ Conséquences préoccupantes : exemple flambée des prix du pétrole
 - ➡ Nouveaux défis : changement climatique, marché intérieur de l'énergie
-
- ➡ Des décisions importantes d'investissements énergétiques sont en train de se prendre
 - ➡ Les mesures de lutte contre le changement climatique sont urgentes

Un cadre de référence nouveau

Le défi du changement climatique : des questions nouvelles

- La lutte contre le changement climatique est une **urgence**
- L'Union s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de **8 %** par rapport à 1990
- **94 %** du CO₂ généré par l'homme en Europe est attribuable au **secteur énergétique**

*Europe-30:
émissions de CO₂ liées à l'énergie
(1990=100)*

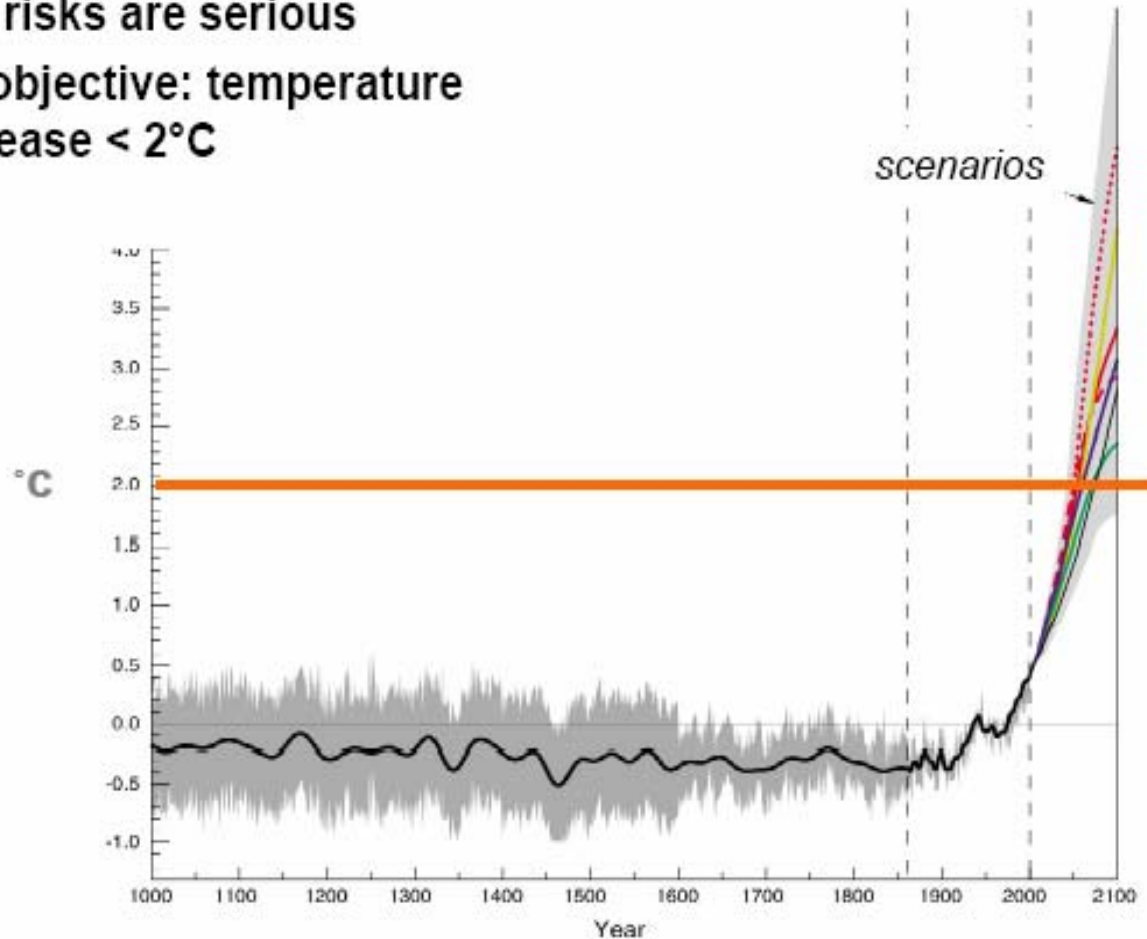


Un défi difficile

- **+ 5.2 %** d'émissions de gaz à effet de serre prévues entre 1990 et 2010 dans l'UE
- secteur du transport : **90 %** de l'augmentation d'émission de CO₂ sur 1990-2010

Changement climatique

- × The risks are serious
- × EU objective: temperature increase $< 2^{\circ}\text{C}$



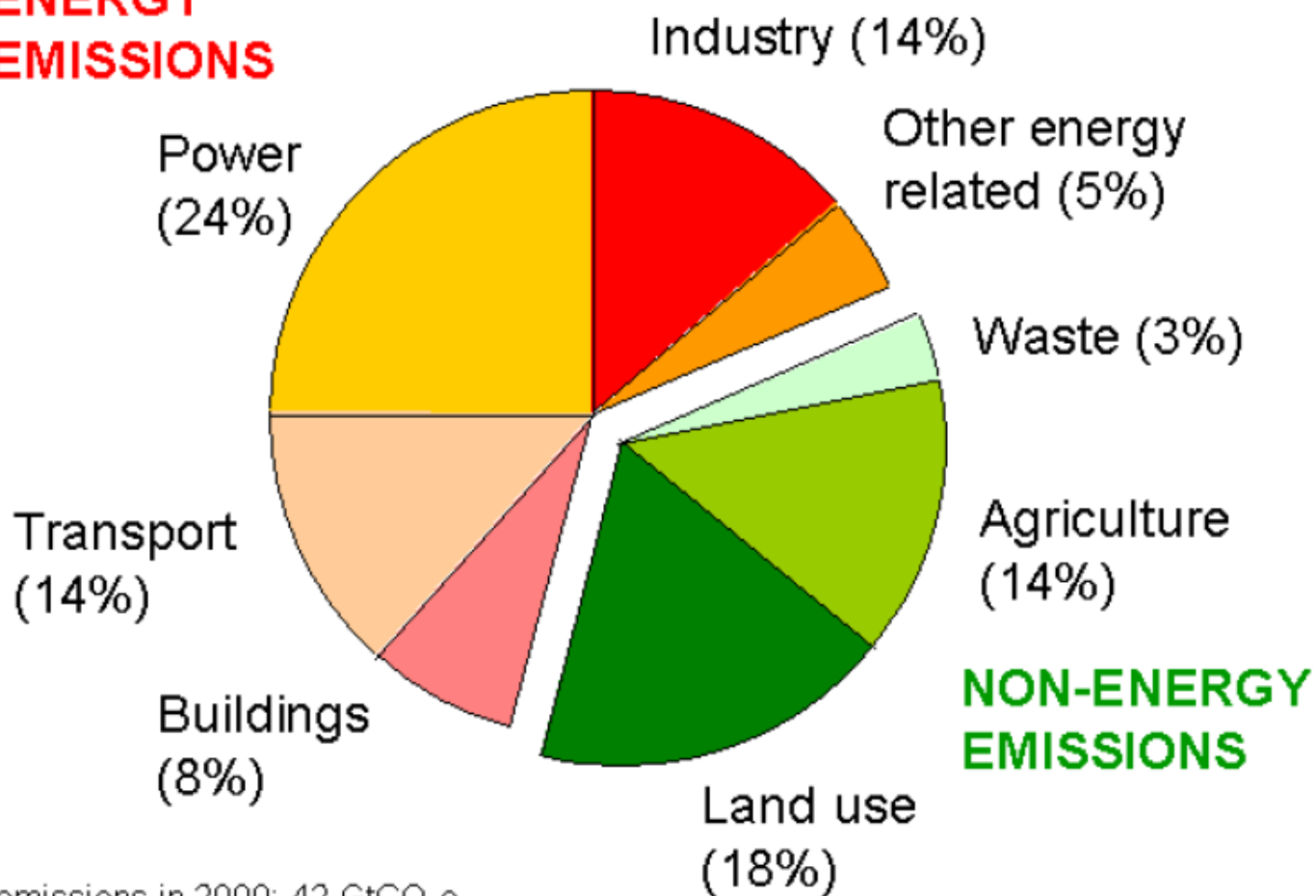
Source: IPCC

Rapport Stern, 2006

- Impact sur PIB mondial: 5 à 20 %
soit 5 500 milliards d'euros
- Migration de 200 millions de personnes
- Volume des récoltes en diminution
- Risque inondations + côtiers
- Augmentation des situations météo extrêmes
- Disparition de la biodiversité

Global Emissions by Sector

ENERGY EMISSIONS



Total emissions in 2000: 42 GtCO₂e.

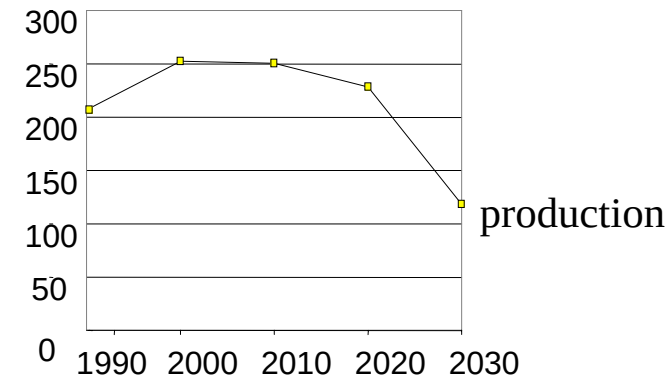
Les données énergétiques fondamentales

Des options énergétiques imparfaites

➡ Le nucléaire: une énergie en question

- Ne peut se développer sans consensus politique
- La question des déchets doit connaître une solution satisfaisante et transparente
- L'Union doit conserver sa maîtrise de la technologie nucléaire

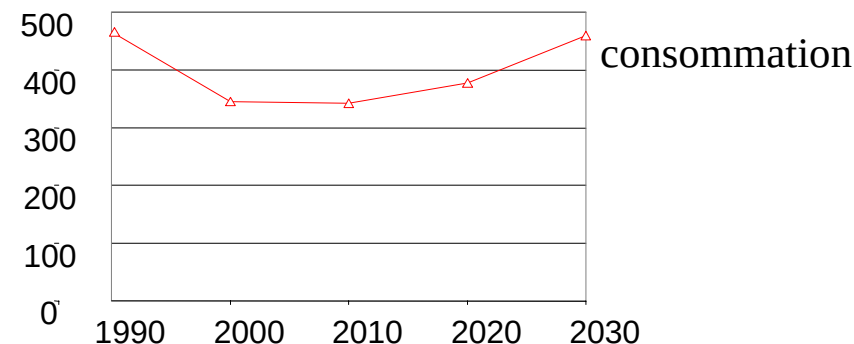
*Europe-30: nucléaire
(scénario de référence en mtep)*



➡ Le charbon: un passé glorieux

- Pas de problème majeur d'approvisionnement
- Pas d'avenir économique pour la production dans l'UE
- Avenir dépend de la réduction de son impact environnemental

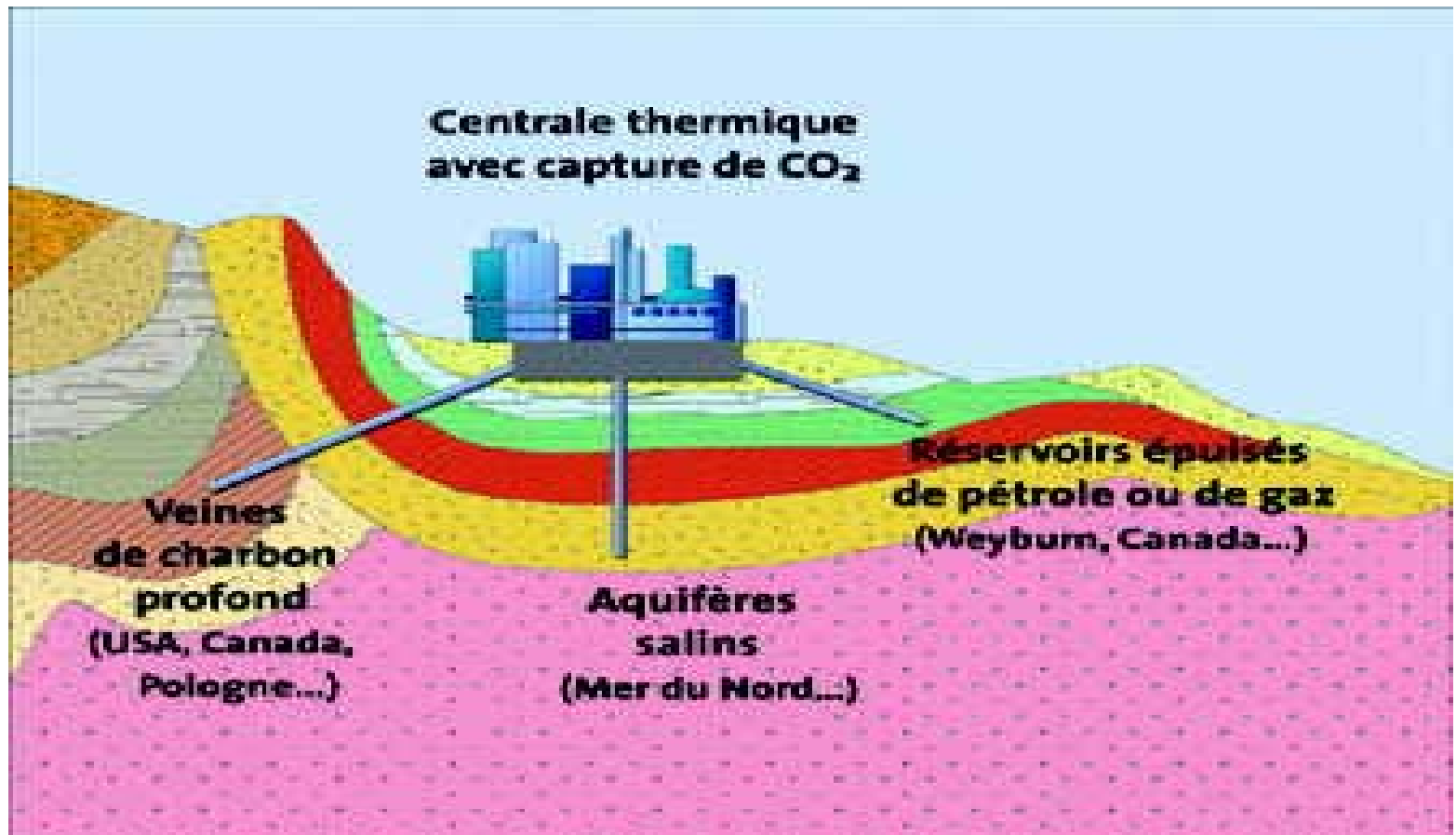
*Europe-30: combustibles solides
(scénario de référence en mtep)*



Capture du CO₂

Techniquement faisable

Cher : 50 €/tCO₂ (40 €/MWh pour une centrale au charbon)

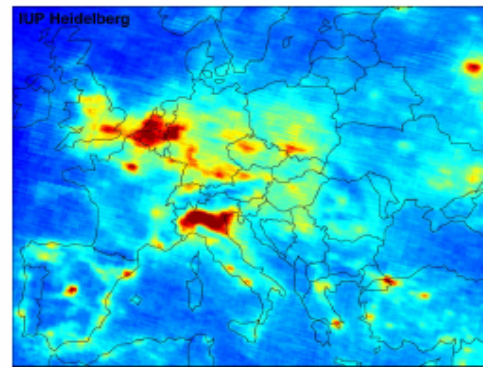


Avantages des renouvelables

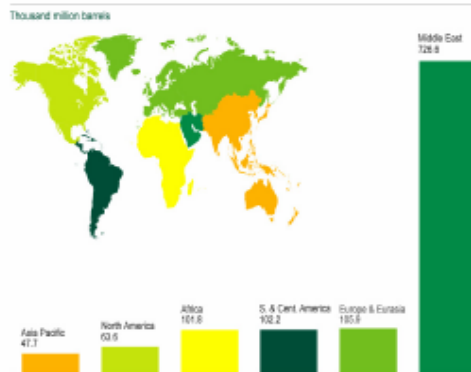
Reduce GHG emissions



Reduce local air pollution



Improve security of supply



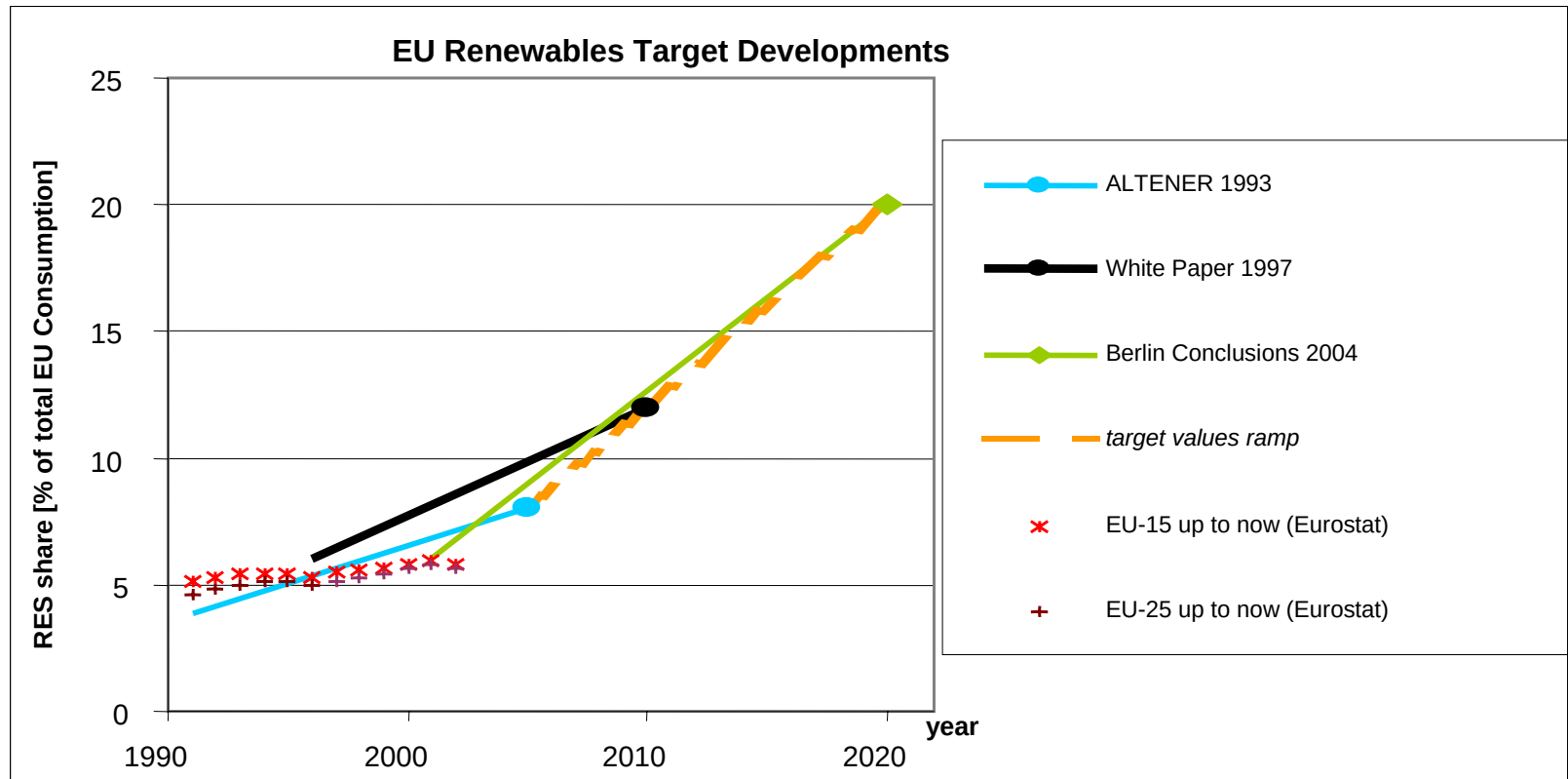
Anticipate the exhaustion of fossil fuel resources



Les énergies renouvelables peuvent apporter une valeur ajoutée au mix énergétique en ...

- ... favorisant la sécurité d'approvisionnement (pbs géopolitiques et d'infrastructures)*
- ... permettant la diversification, réduisant les importations/ délestant la production*
- ... atténuant les risques dus à la volatilité et à l'instabilité des coûts des ressources fossiles*
- ... créant un cadre pour un développement industriel et économique*
- ... facilitant la réalisation des objectifs à caractère environnemental*
- ... fournissant un accès unique aux services énergétiques*
- ... augmentant la participation de l'utilisateur dans la prise de décision*

Objectifs fixés par l'EU pour le développement des EnR



Les différentes filières

- L'hydro-électricité
- L'éolien
- Le solaire photovoltaïque
- Le solaire thermique
- La biomasse
- La géothermie
- Les technologies marines

L'hydro-électricité : technologies



L'hydro-électricité

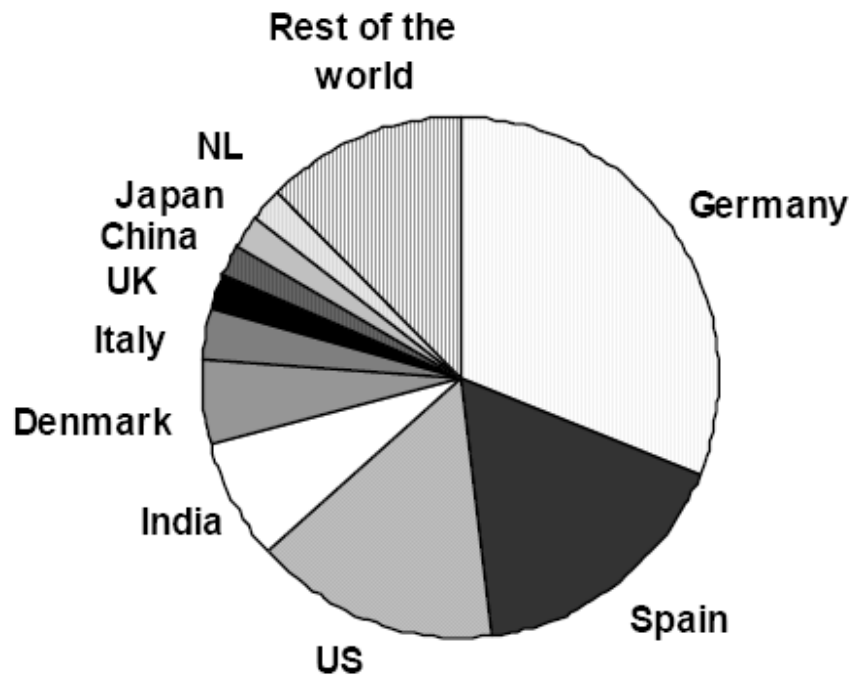
- Petite centrale hydraulique : 5 à 10 MW
- Micro-centrale : 100 kW à 5 MW
- Pico-centrale < 100 kW

Quelques chiffres clés sur l'éolien

- En 2005, 59 322 MW installés (40 500 MW en Europe)
- Marché de l'énergie éolien : + 43% en 2005
- Marché de l'éolien : 12 milliards €

Quelques chiffres clés sur l'éolien

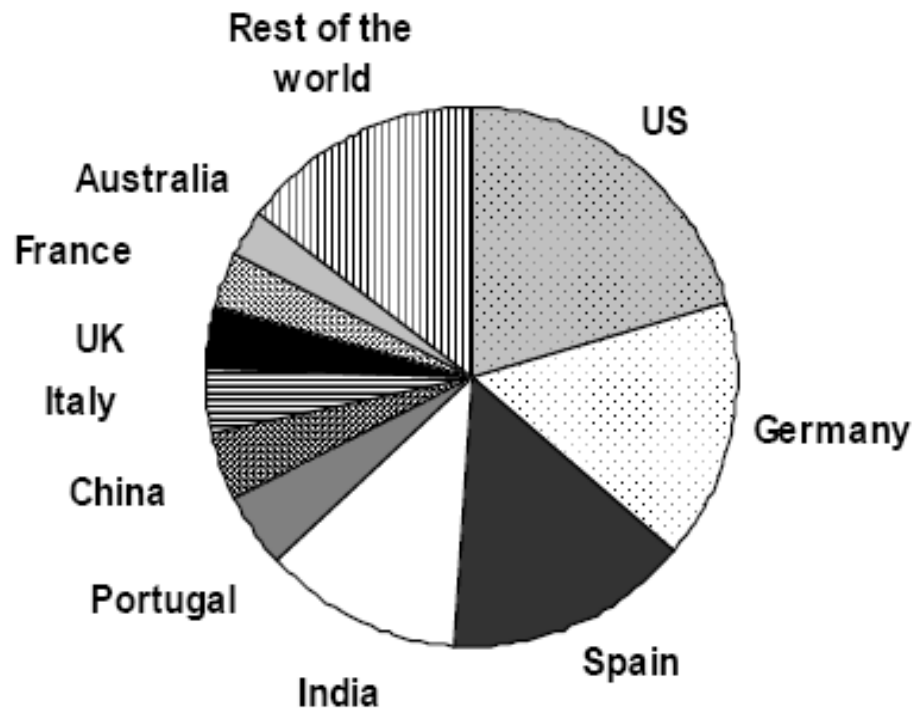
**Top 10 cumulative installed capacity
(Dec. 2005)**



Total capacity	MW	%
Germany	18,428	31.0
Spain	10,027	16.9
US	9,149	15.4
India	4,430	7.5
Denmark	3,122	5.3
Italy	1,717	2.9
UK	1,353	2.3
China	1,260	2.1
Japan	1,231	2.1
NL	1,219	2.1
Top 10 – Total	51,936	87.5
Rest of the world	7,368	12.5
World total	59,322	100

Quelques chiffres clés sur l'éolien

**Top 10 new installed capacity
(Jan.-Dec. 2005)**

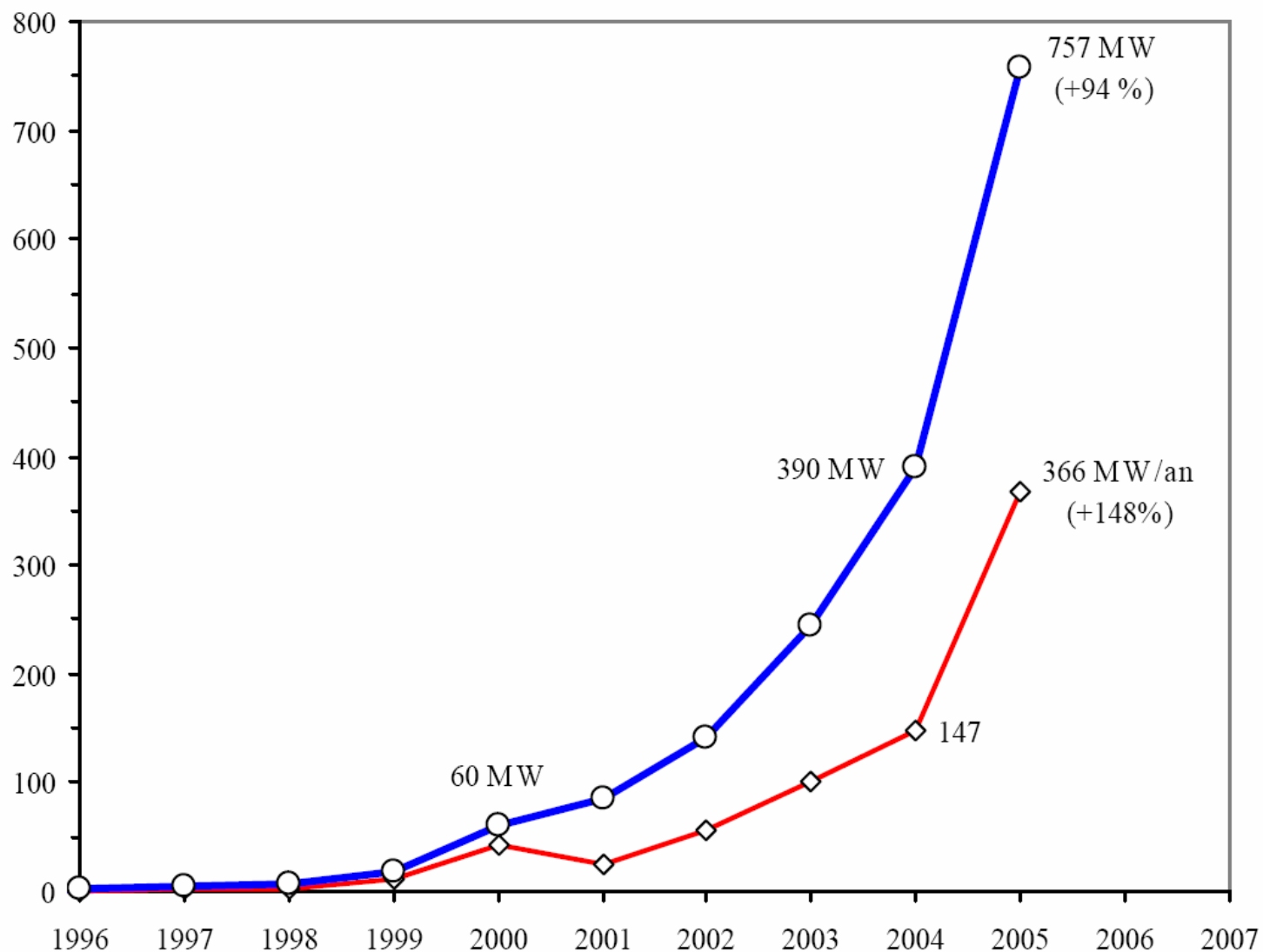


New capacity	MW	%
US	2,431	20.7
Germany	1,808	15.4
Spain	1,764	15.0
India	1,430	12.2
Portugal	500	4.2
China	498	4.2
Italy	452	3.8
UK	446	3.8
France	367	3.1
Australia	328	2.8
Total top 10	10,024	85.2
Rest of the world	1,745	14.8
World total	11,769	100.0

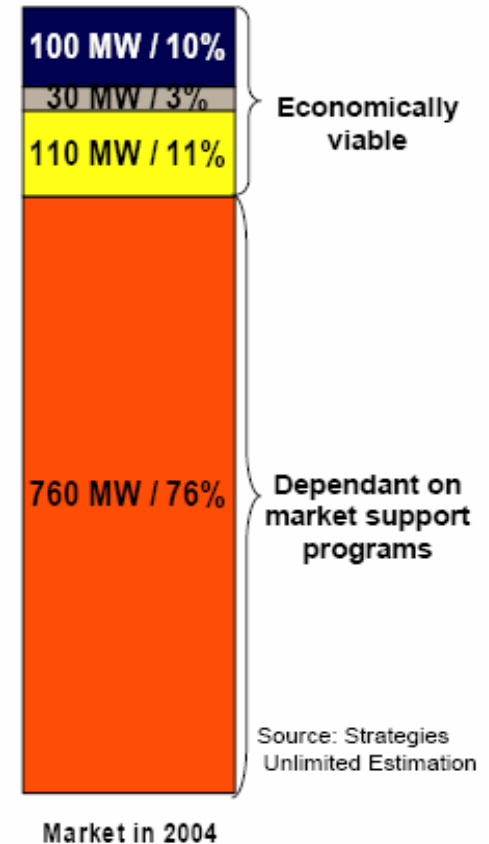
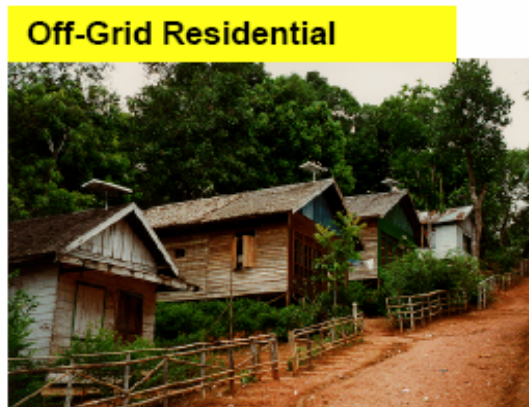
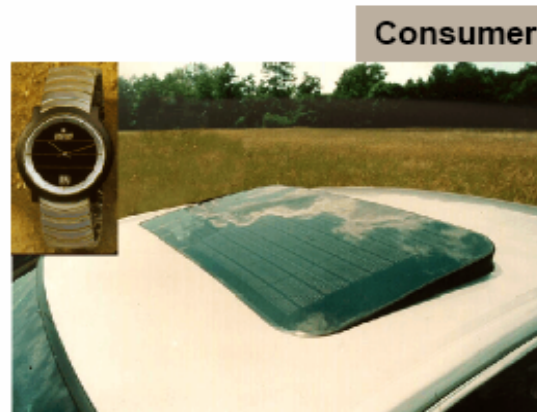
Constat

- Contexte énergétique mondial favorable
- Eolien : moyen **industriel** de production d'électricité
- Deuxième potentiel éolien européen
- Forte croissance mais faible développement et exploitation par rapport au potentiel

Evolution du parc et du marché éolien en France (MW, MW/an)



Situation du marché en 2004



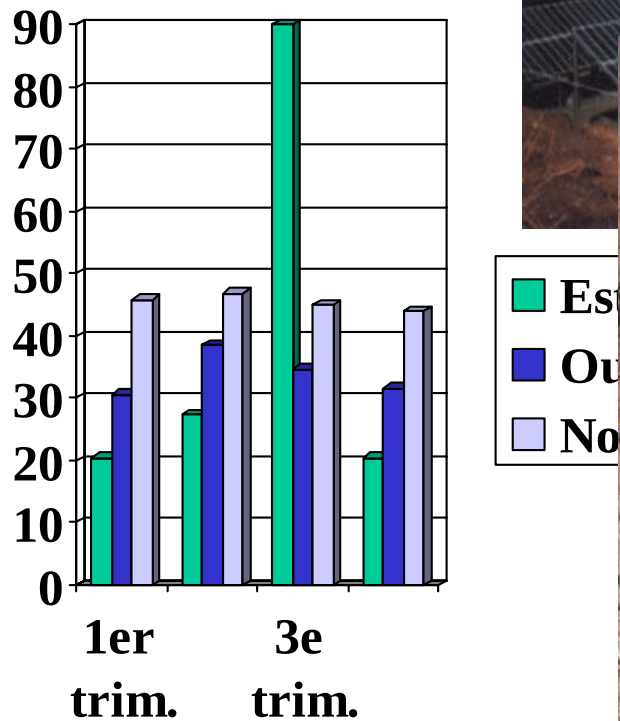
Performances des modules

Modules	Situation 1995	Situation 2005	Objectifs 2010
Rendement	11 - 13%	15%	20%
Durée de vie dégradation	20 ans	30 ans < 3%	30 ans < 3%
Coût système (€/Wp)			
Autonome	15-17	8-12	5
Raccordé réseau	8-12	4,5-6	2,5

Productible moyen

- Coefficient de performance :
 - système autonome : $\sim 40 - 60\%$
 - système raccordé : $\sim 75\%$
- Productible moyen
 - système autonome : $\sim 750 - 900 \text{ h/an}$
 - système raccordé : $\sim 800 - 1\,300 \text{ h/an}$

Systèmes autonomes



Programme des 1 000 toits PV



Nouvelles installations en Allemagne



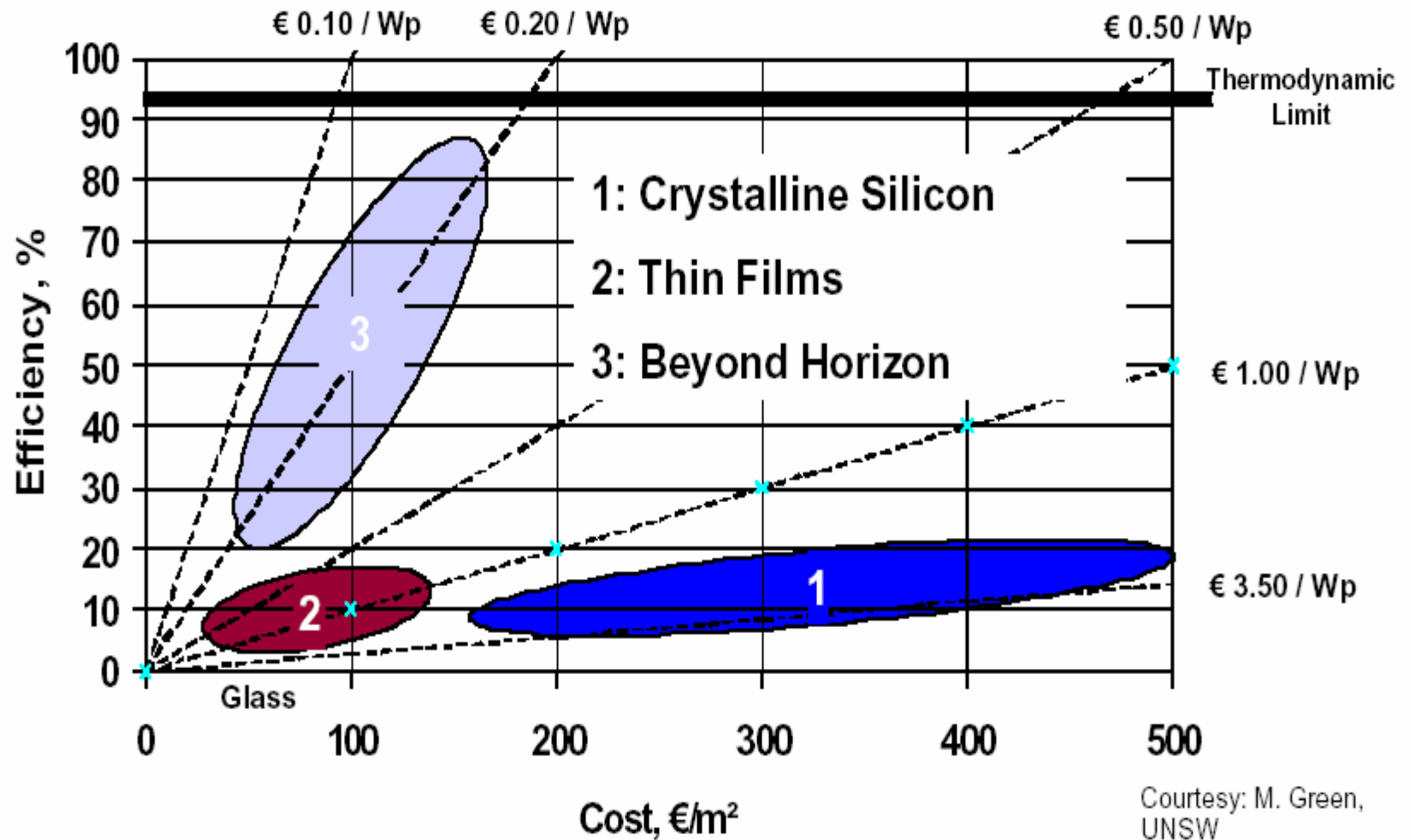
Chiffres clés du PV

- Coûts investissements :
6 000 €/kW
- Coûts de production :
35 – 55 c€/kWh
- Fonctionnement
800 - 1500 h/an
- Encombrement :
120 W/m²

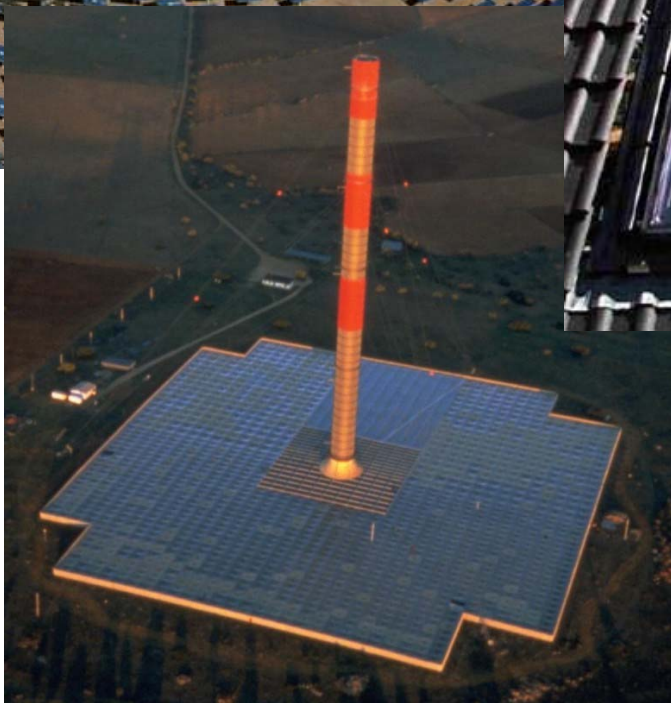
Le PV en France

- Fin 2004 :
20 MW installés sur
1000 MW en Europe
- Objectifs 2010 :
50 000 toits solaires (?)
- Tarifs de rachat :
30 et 55 c€/kWh en France métro
40 et 55 c€/kWh en Corse et DOM
TOM)

Quel prix pour quel rendement ?



Le solaire thermique : technologies



La Biomasse

- La biomasse constitue le matériau issu des plantes et animaux qui réagit avec l'oxygène pour produire de la chaleur. Elle peut être également appelée : **biocombustible**
- Il y a trois grands types de traitement :
 - thermochimique
 - biochimique
 - agrochimique



Classe Thermochimique

- **Combustion :**
bois, résidus, ordures ménagères de toute forme.
-production de chaleur et d'électricité
-les résidus de la combustion : utilisation comme engrais.
Unités production : de la cheminée à quelques 10 MW
- **Pyrolyse :**
chauffage en absence d'air ou combustion partielle en atmosphère contrôlée.
Produits : combustible secondaire (charbon de bois)
sous-produits (liquides, gazeux)
- **Gazéification :**
pyrolyse optimisée pour obtenir du gaz de synthèse :
 $CO + H_2$

Classe biochimique

- **Fermentation alcoolique :**

Ethanol est le produit majeur de la fermentation des sucres par les micro organismes.

Ce produit est un excellent combustible pour véhicules, seul ou mélangé avec de l'essence.

ETBE (47% EtOH + 53% isobutylene)

- **Digestion anaérobique:**

Production de CO_2 et de CH_4 par réaction en l'absence d'oxygène de micro organismes et de composés carbonés.

Le produit est un mélange (CO_2 (40-60%) - CH_4 (60-40%) - vapeur (~10%)) appelé souvent **biogaz**

Classe agrochimique

Cultures d 'huiles naturelles :

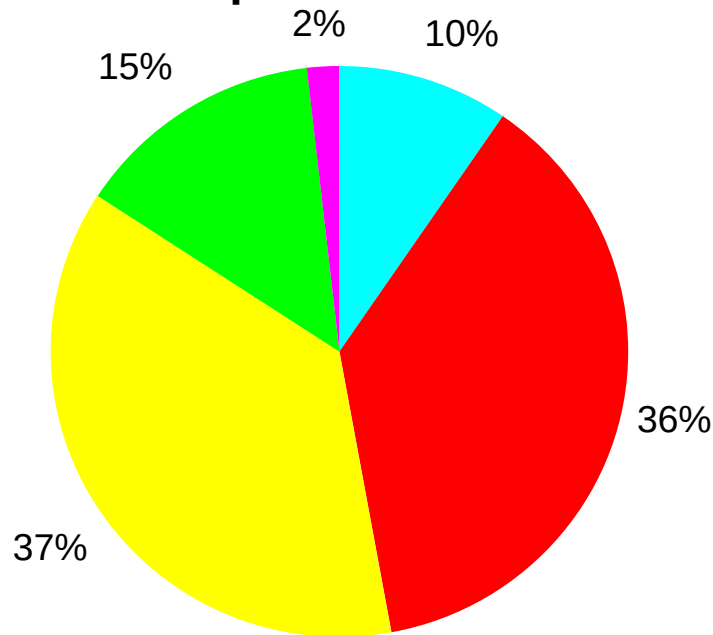
Utilisation d ' huiles naturelles (colza) directement comme combustibles en remplacement du diesel (**biodiesel ou EMVH**) ou pour le chauffage.

Amélioration des caractéristiques par estérification. Ces esters sont biodégradables, stables et parfaitement adaptés au moteur diesel.

Utilisation possible des restes d 'huiles de cuisine

Production mondiale de biocarburants

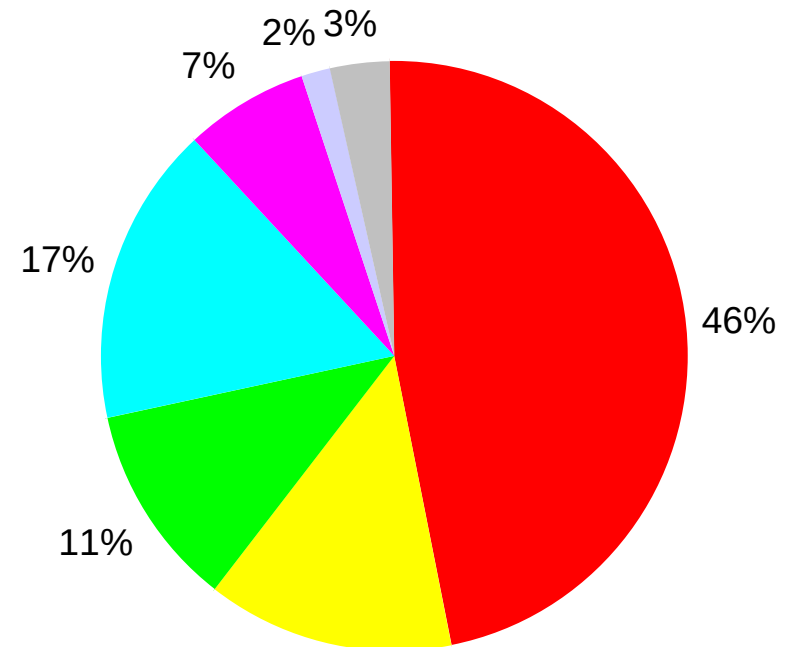
Production mondiale d'éthanol en 2005 (estimation) : 37 Mt, 80% utilisés pour la carburation



Am. sud (Brésil) Asie Autres

Am. Nord (Etats-Unis) Europe

Production mondiale d'EMHV en 2005 ~ 3,7 Mt.

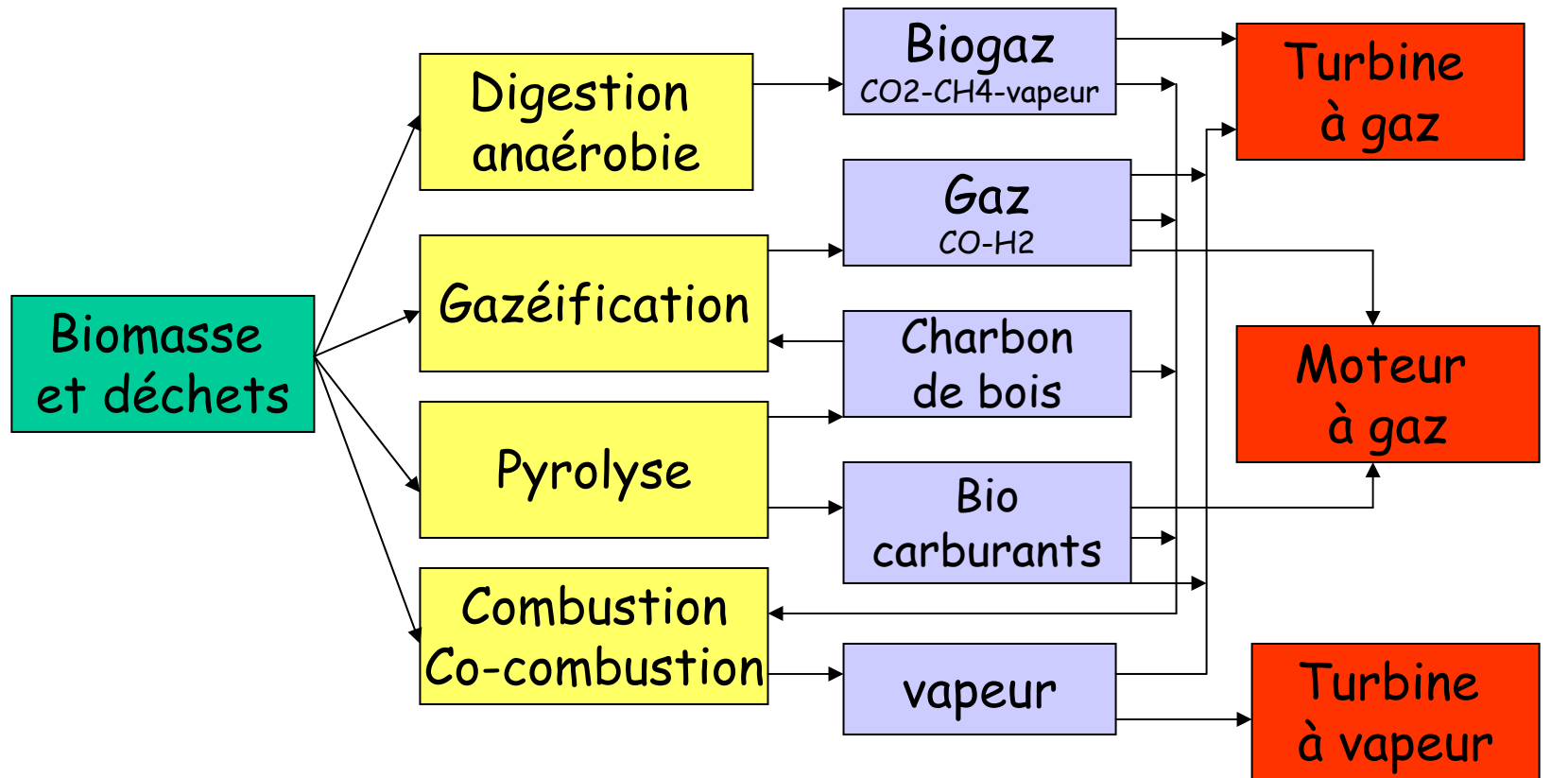


France Italie Etats-Unis

Allemagne Autres Europe Brésil Autres

Consommation mondiale de pétrole dans les transports routiers :
1,6 Gt

Filières de production d'électricité à partir de la biomasse



combustible

conversion

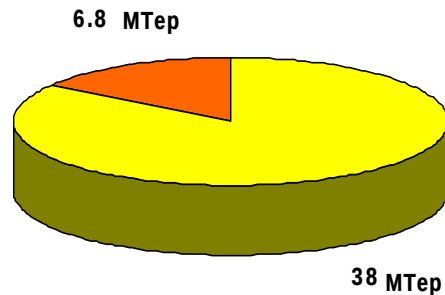
intermédiaire

production

Contribution de la biomasse dans le futur

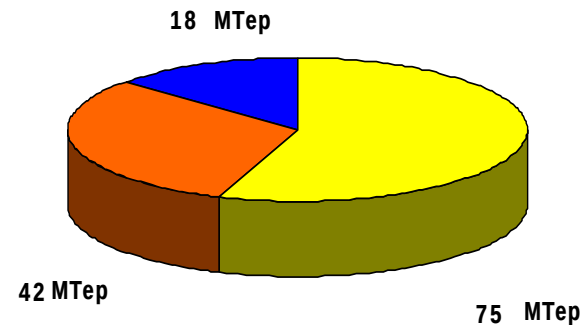
En EUROPE :

Situation 1995 en EUROPE



■ Chauffage ■ Electricité

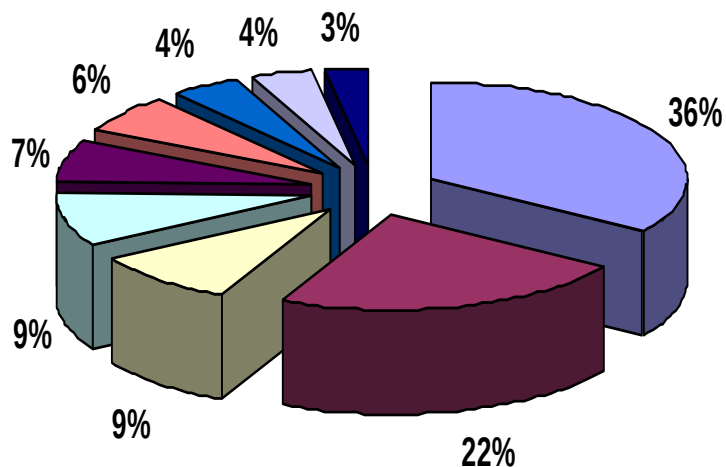
Objectifs 2010 en EUROPE



■ Chauffage ■ Electricité ■ Transports

Production d'électricité par voie géothermique

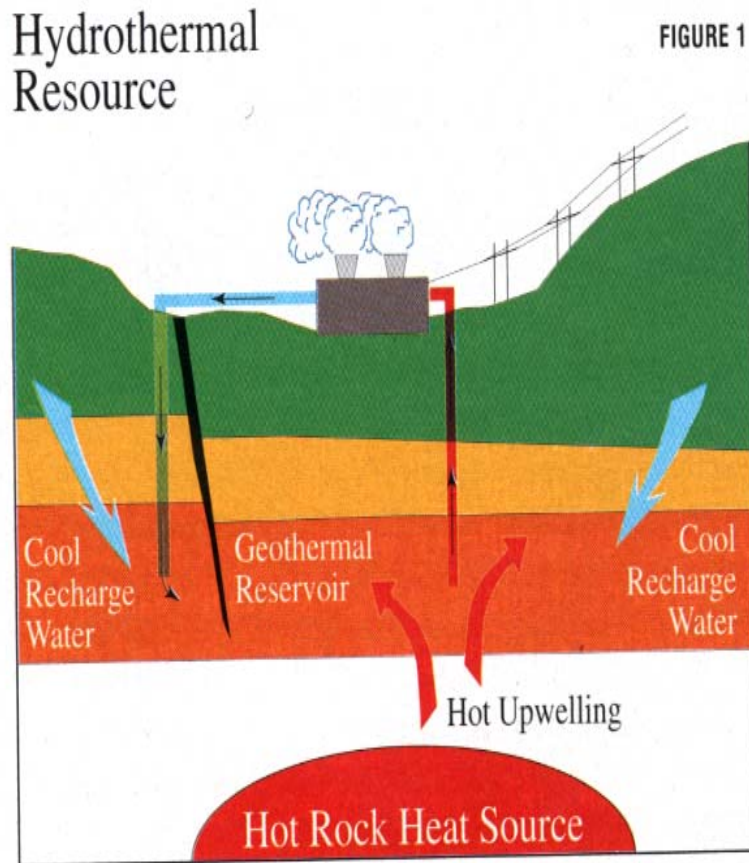
MWe installés (1999)



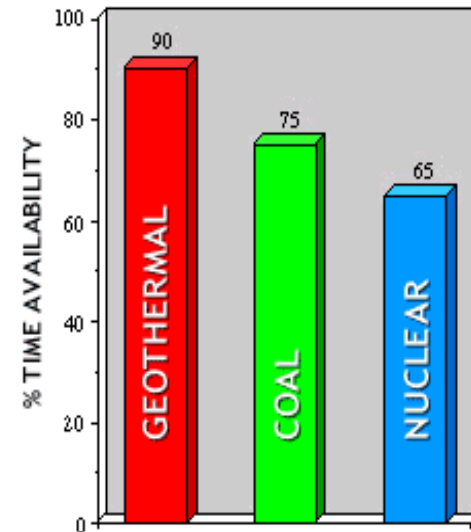
■ USA	■ Philippines	■ Italie
■ Mexique	■ Indonésie	■ Japon
■ Nouvelle Zélande	■ Amerique centrale	■ Reste du monde

- La production d'électricité par voie géothermique concerne quelques 20 pays, dont beaucoup de PED
- un potentiel de 50 GW pour 2030
- L'Indonésie prévoit 19 GW dans les 10 à 20 ans à venir

Production d'électricité par voie géothermique



- Unités de puissance gamme allant de **350 kW à 55 MW**
- Utilisées la plupart du temps à puissance nominale pour fournir la base.



La géothermie en France

- **Cogénération avec couplage TAG**

expérience en Val de Marne : 10 MWe - 18 MWth

raccordement de 2 000 logements : réseau de chaleur Géothermie :
gisement 70-75 °C

récupération sur fumées : 105 °C (250 m³/h)

- **Expérimentation de Soultz: Roches chaudes sèches**

Circulation hydraulique entre 2 forages - 450m

10 MWth - eau à 160 °C - 85 m³/h

A court terme : forage à 5 000m

50 MWth - eau à 190 °C - 145 m³/h - 5 MWe

En 2015 : 25 Mwe

Potentiel : 20% production énergétique française

Coût de production

	Gisement de haute qualité	Gisement de qualité moyenne	Gisement de faible qualité
Petite centrale (< 5MW)	5.0 - 7.0	5.5 - 8.5	6.0 - 10.5
Centrale moyenne (5 - 30 MW)	4.0 - 6.0	4.5 - 7.0	Peu d'intérêt
Grande centrale (> 30 MW)	2.5 - 5.0	4.0 - 6.0	Peu d'intérêt

Puissance (kW)	Coût d'Inv't (€/kW)	Maintenance (€/kW.an)
100	2 000 - 2 500	190
200	1 850 - 2 350	120
500	1 700 - 2 150	60
1 000	1 550 - 1 950	44

Les technologies marines



Les technologies marines

- **Seconde génération : Installations offshore**



Pelamis

Orkney Channel - Angleterre



Capacité d'une ferme :
10 à 30 MW/km²
selon le site

Prototype de
750 kW relié
au réseau

Les technologies marines

**Prototypes en opération en
Angleterre (300 kW) et Norvège (300 kW)**

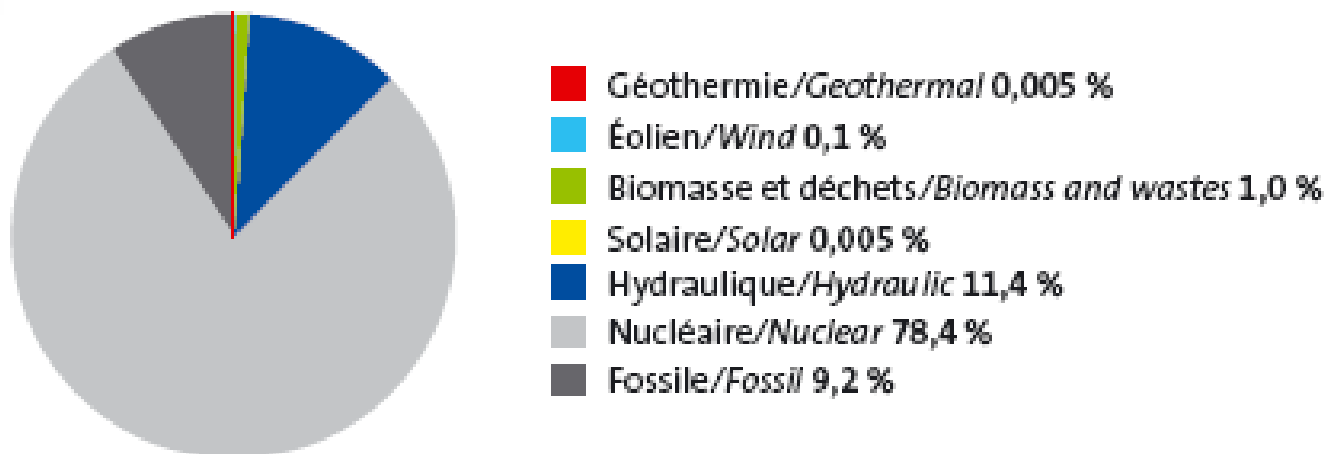


Lynmouth - Angleterre

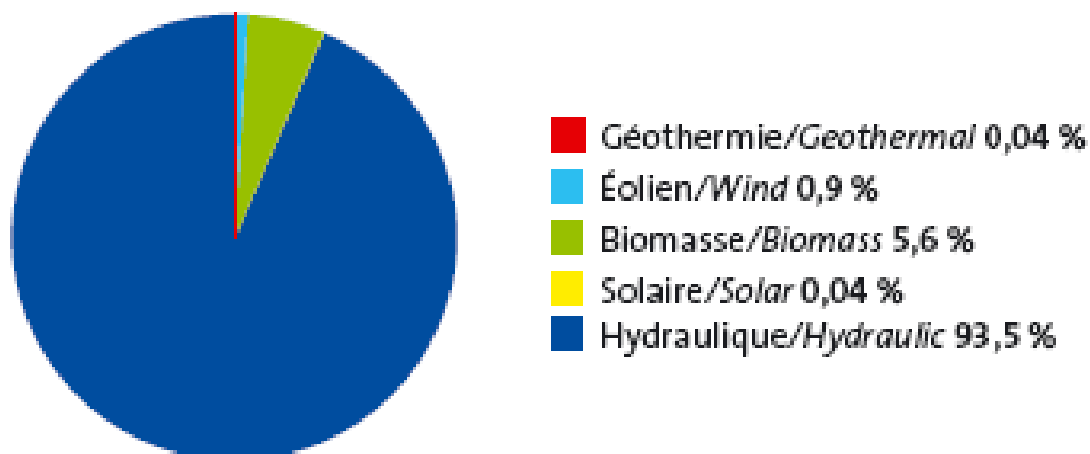


Hammerfest - Norvège

Structure de la production d'électricité – 2004 / *Structure of electricity production – 2004*



Structure de la production électrique d'origine renouvelable – 2004 *Structure of electricity production from renewable energy sources – 2004*



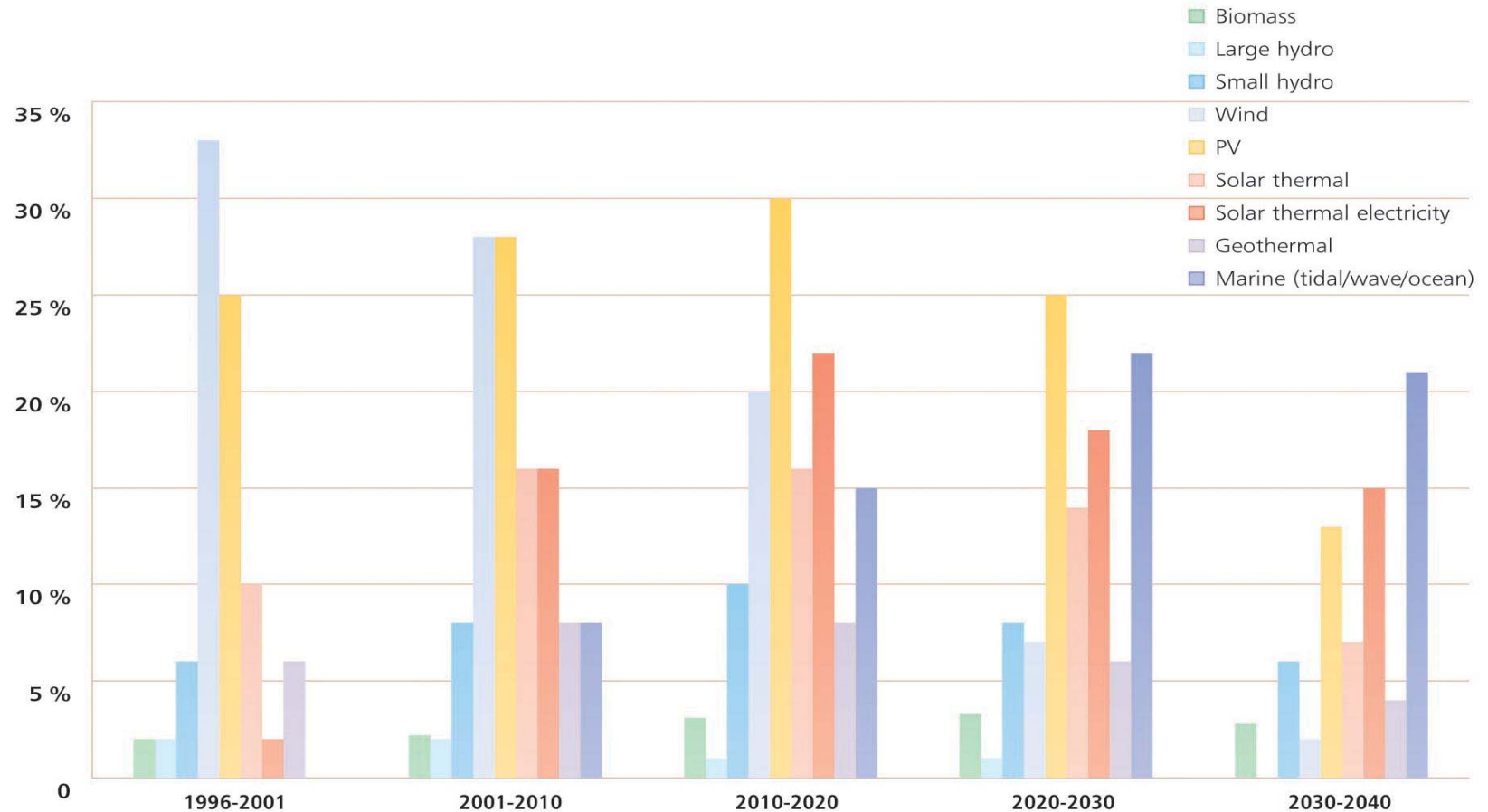
Production d'énergie d'origine renouvelable en France

Métropole +DOM	2003		2004		2005	
	Élec. GWh	Therm. ktep	Élec. GWh	Therm. ktep	Élec. GWh	Therm. ktep
Hydraulique	60 693		61 969		53 210	
Eolien	425		629		985	
Solaire	19	29	26	32	35	39
Géothermie	23	129	29	130	95	130
Pompes à chaleur		291		316		361
Déchets urbains solides	1 555	378	1 621	358	1 630	351
Bois énergie	1 344	8 884	1 332	8 780	1 358	8 738
Résidus de récoltes	370	192	366	190	415	207
Biogaz	424	56	446	55	462	56
Biocarburants		399		419		476
TOTAL	64 852	10 357	65 817	10 281	58 190	10 358
TOTAL en ktep	15 953		15 964		15 436	

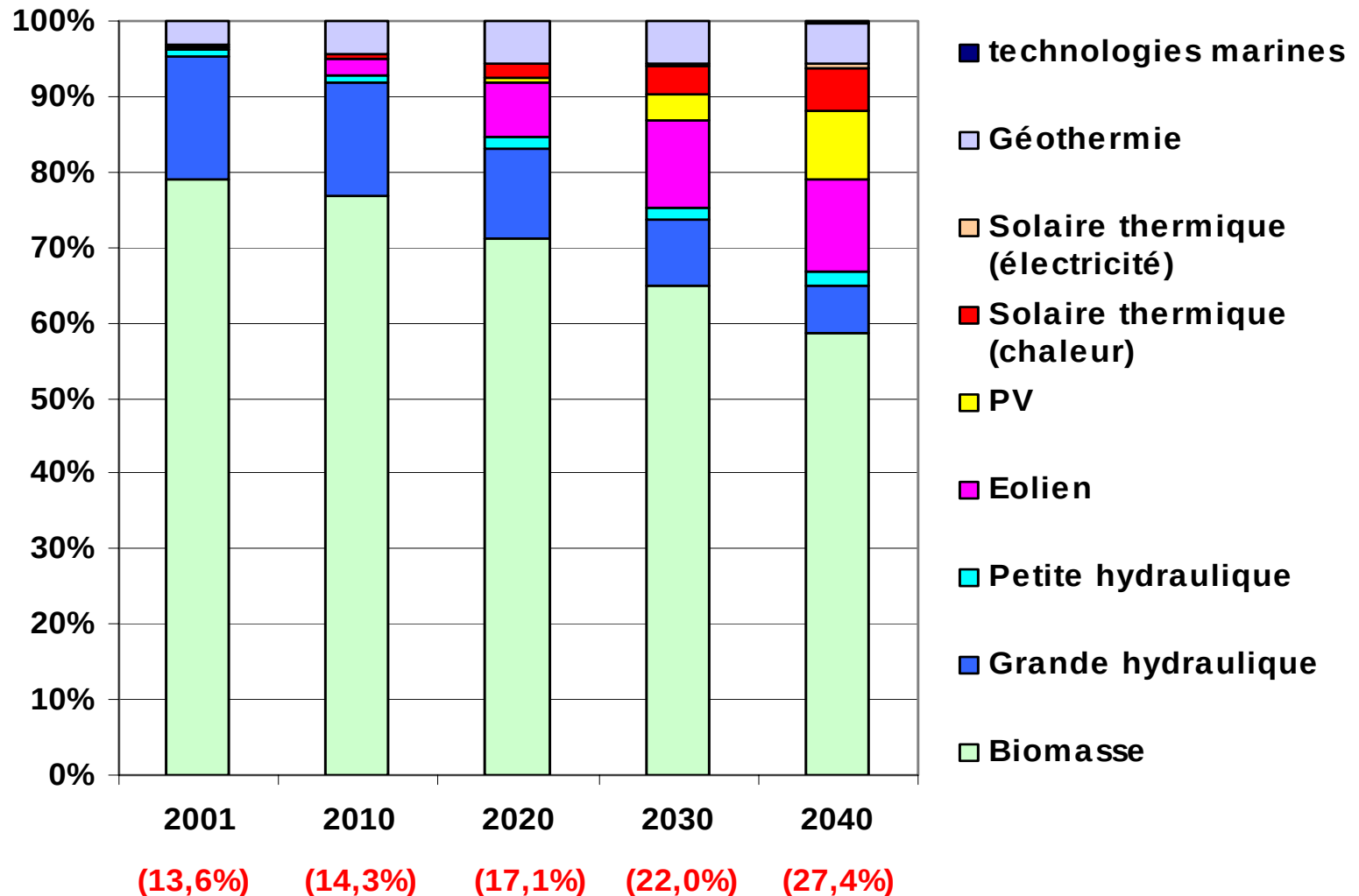
Possibilité de création d'emplois en Europe

	2010	2020
Eolien	184,000	318,000
PV	30,000	245,000
Biomasse	338,000	528,000
Bio carburants	424,000	614,000
Petite hydro	15,000	28,000
Géothermie	6,000	10,000
Solaire thermique	70,000	280,000
TOTAL EnR	1,067,000	2,023,000

Taux de croissance des différentes technologies renouvelables



Evolution du mix renouvelable sur la consommation mondiale en énergie primaire



L'intégration des renouvelables

- **La force des EnR est basée sur le mix**
 - Les EnR ont le potentiel nécessaire pour remplacer les combustibles fossiles comme contributeur prépondérant
 - Les EnR font déjà partie intégrante du bouquet énergétique dans de nombreux pays
- **Un équilibre stable entre les différentes technologies va faciliter leur intégration**
- **Marché de l'énergie déréglementé va favoriser la production décentralisée**
- **Dans le temps, il n'y a pas d'alternatives aux EnR**



Le Mix énergétique Français

2003 (271 Mtep)

