

FORMATION IFC

« Sciences et Technologies pour relever le défi d'une
société zéro émission de carbone »

Vecteurs énergétiques et énergies renouvelables

LABORATOIRE DE GÉNIE CHIMIQUE

Procédés et développement durable

A. Léonard

a.leonard@ulg.ac.be

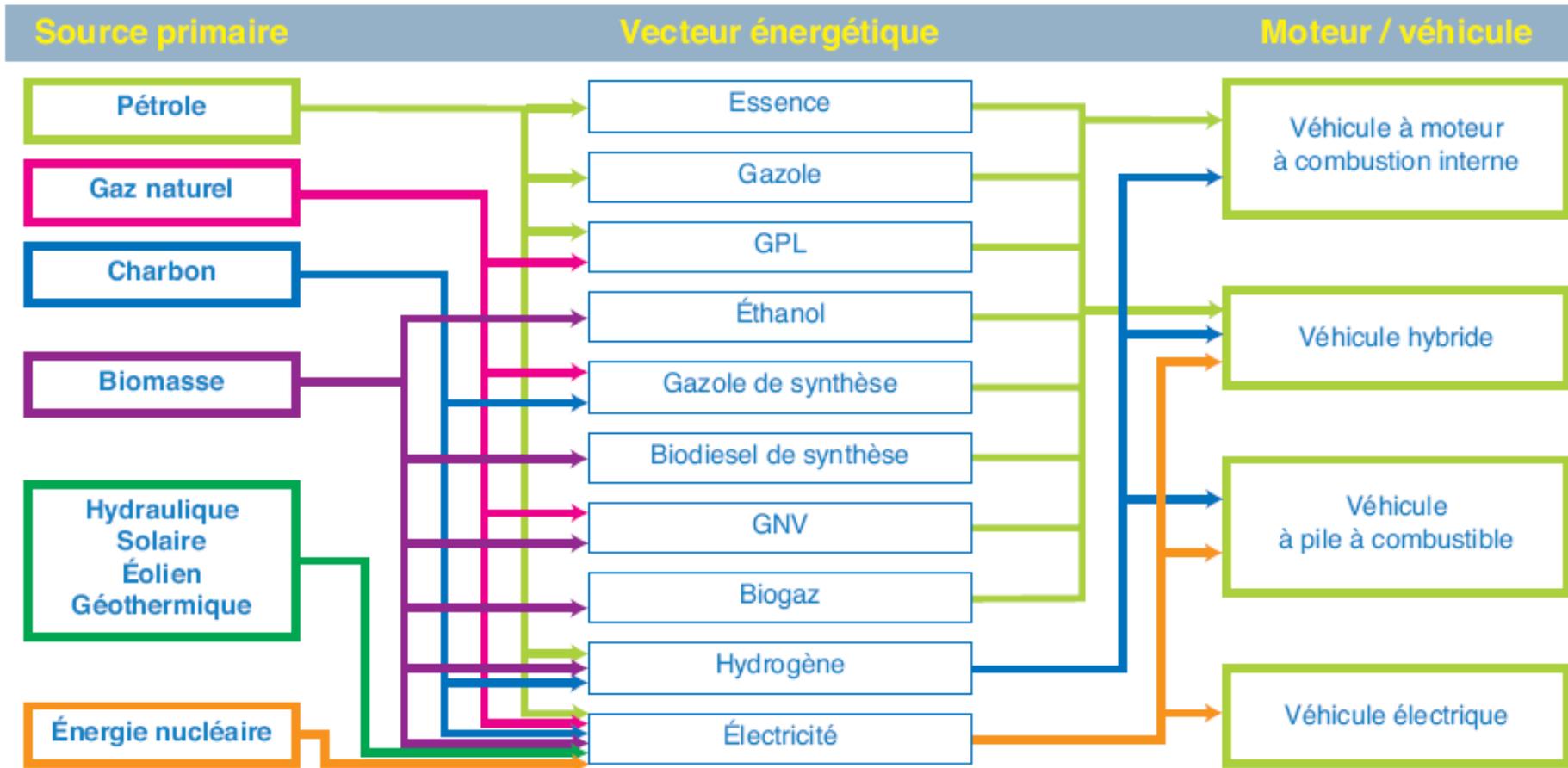
LGC CHEMICAL
ENGINEERING

1. Quelques définitions

Source d'énergie \neq Vecteur énergétique

- Source d'énergie existe à l'état naturel
 - \rightarrow Production d'énergie distribuable directement
 - Pétrole, solaire, éolien, ...
 - \rightarrow Production d'un vecteur énergétique
- Vecteur énergétique n'existe pas en tant que tel
 - Production à partir de sources d'énergie
 - Permet de transmettre l'énergie
 - Électricité
 - Hydrogène
 - Carburants

Source d'énergie ≠ Vecteur énergétique



Les types d'énergie

- Énergie primaire
 - *Disponible dans la nature avant toute transformation*
- Énergie secondaire
 - *Transformation de l'énergie primaire sous une forme utilisable*
 - *Produits pétroliers*
 - *Électricité*
- Énergie finale
 - *Source primaire ou secondaire, après transport, distribution ou stockage*

Les types d'énergie

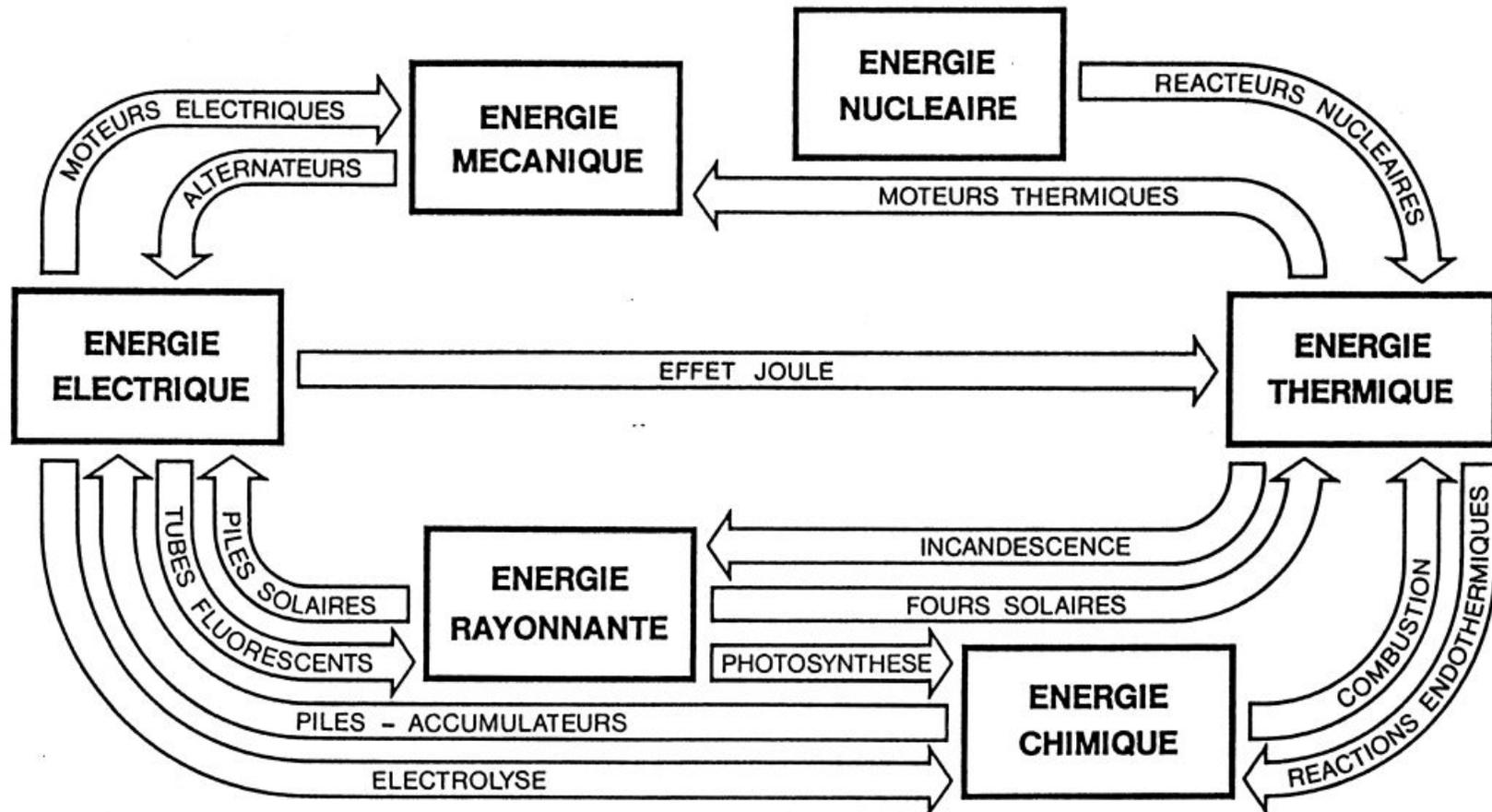
- Énergie utile
 - *Source qui satisfait un service énergétique*
 - Confort thermique
 - Déplacement
 - *Mesurée par le produit du rendement par la quantité d'énergie finale*

Géographie de l'énergie, B. Mérenne , 2007

2004
Consommation énergie primaire mondiale = 11.4 Gtep
Consommation finale = 7.9 Gtep
Consommation utile = 4.6 Gtep
Rendement = 40%

Six formes principales d'énergie

FORMES ET TRANSFORMATIONS DE L'ENERGIE



Rapport ESSO, 1995

Sources d'énergie primaire

- Énergie primaire chimique
 - Combustibles fossiles
 - Charbon, lignite, tourbe, gaz naturel, pétrole, schistes bitumeux, ...
 - Combustibles végétaux (bois, biomasse)
 - Combustibles de récupération
 - Ordures ménagères, déchets industriels, boues
- Énergie primaire thermique
 - Géothermie
- Énergie primaire rayonnante
 - Soleil

Sources d'énergie primaire

- Énergie primaire électrique
 - Éclairs
- Énergie primaire nucléaire
 - Fission
 - Fusion
- Énergie primaire mécanique
 - Eau : hydraulique
 - Vent : éolienne
 - Mer : marées, courants, houle
 - Musculaire

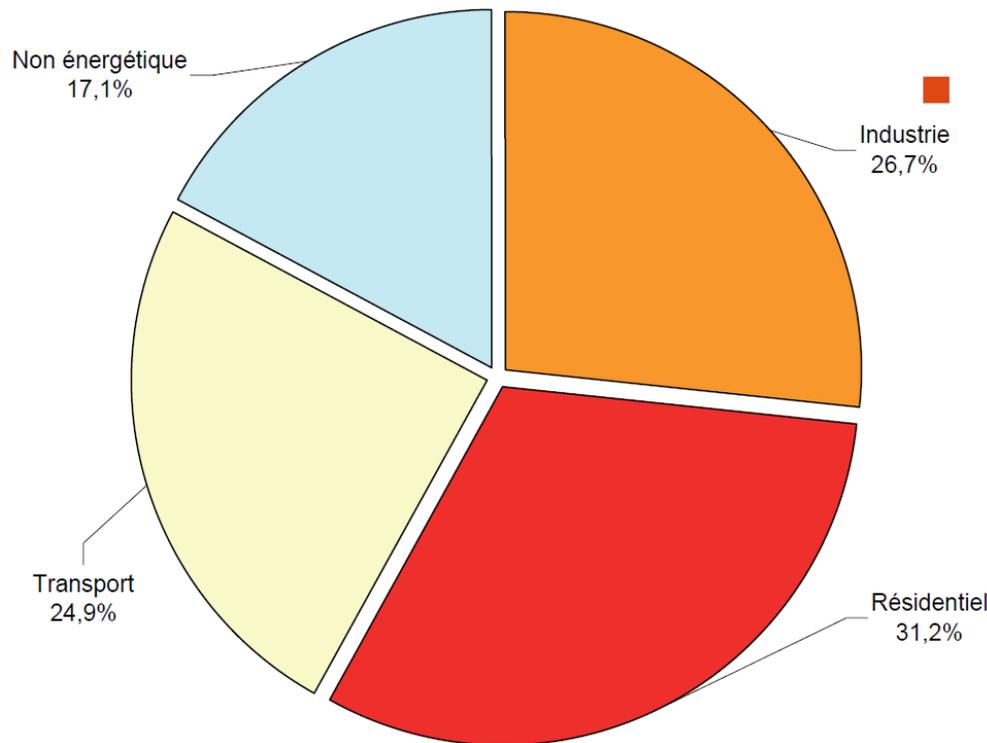
Rem. « Électricité primaire » = produite autrement que via les centrales thermiques
→ origine nucléaire, hydraulique, éolienne, photovoltaïque et géothermique

Sources d'énergie primaire renouvelable

- 5 familles
 - ❑ Énergie solaire
 - ❑ Énergie éolienne
 - ❑ Énergie hydraulique
 - ❑ Énergie géothermique
 - ❑ Biomasse
- Quelques difficultés à leur développement
 - ❑ Ressources diffuses ou dispersées
 - ❑ Disponibilité aléatoire liées aux conditions climatiques
 - ❑ Caractère local, petite puissance (sauf hydraulique)

2. Demande et production d'énergie

Répartition demande en énergie (BE – 2008)



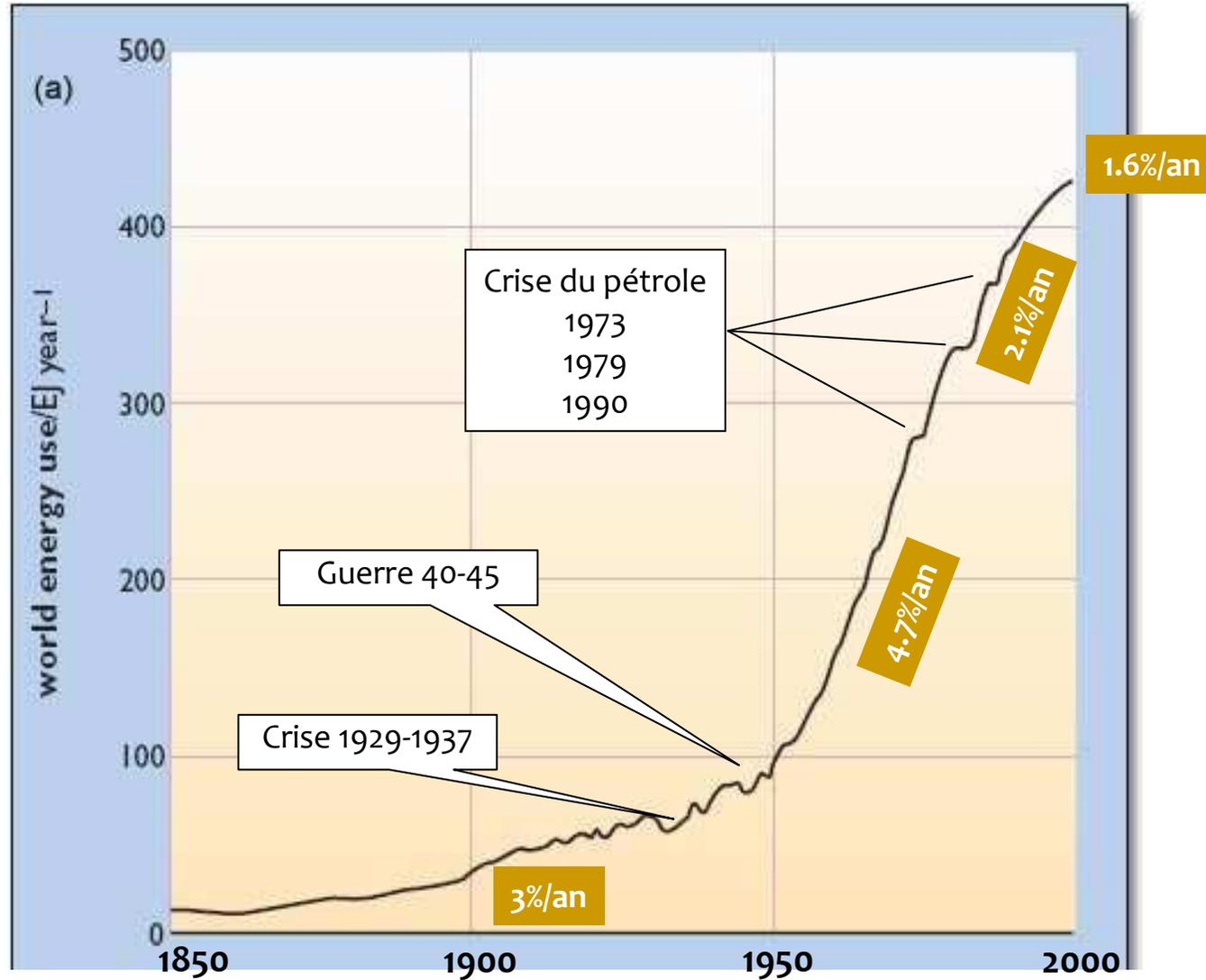
■ 4 grands domaines

- Chauffage et climatisation
- Déplacement
- Éclairage, multiples services dans habitat, tertiaire, industrie
- Production de biens

Source : SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie.

Dont 15.6% sous forme d'électricité

Une demande mondiale en croissance



Comment faire face à la demande ?

- Contexte complexe
 - ❑ Assurer une promotion notable des pays moins développés et de laisser les pays en voie d'industrialisation poursuivre leur développement
 - ❑ Ne limiter que modérément le dynamisme des pays industrialisés
 - ❑ Volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre
 - ❑ Épuisement des ressources fossiles
 - ❑ Controverse autour du nucléaire
- Le renouvelable, la solution ?
 - ❑ Objectif européen = 20% énergie finale en 2020
- L'hydrogène, vecteur énergétique de demain ?
 - ❑ Capacité de production limitée
 - ❑ Stockage ? Sécurité ?
 - ❑ Production majoritaire à partir de sources fossiles ... → CO₂

Comment faire face à la demande ?

- H₂ et la demande mondiale en énergie
 - 2006 : Demande primaire mondiale en énergie = 11 730 Mtep

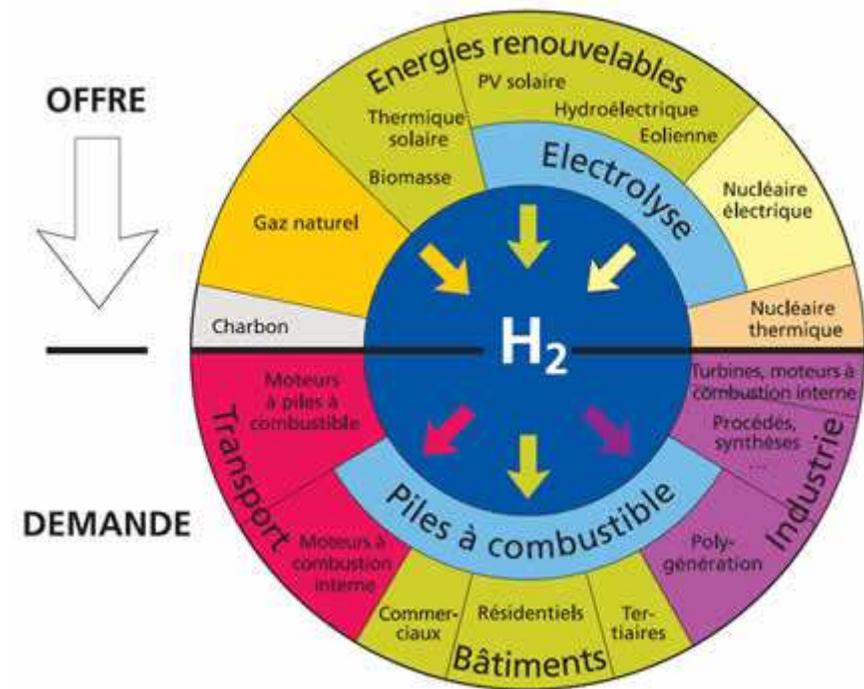
	Mtep	%
Pétrole	4029	34
Charbon	3053	26
Gaz naturel	2407	21
Nucléaire	728	6
Hydraulique	261	2
Biomasse et déchets	1186	10
Autres sources renouvelables	66	1
Total	11 730	100

Si tout l'H₂ produit utilisé
comme énergie primaire
→ Moins de 2% de la
demande mondiale

Multiplication des
capacités de production
actuelles par 20 pour
couvrir 20% de la
demande à l'horizon
2050

Comment faire face à la demande ?

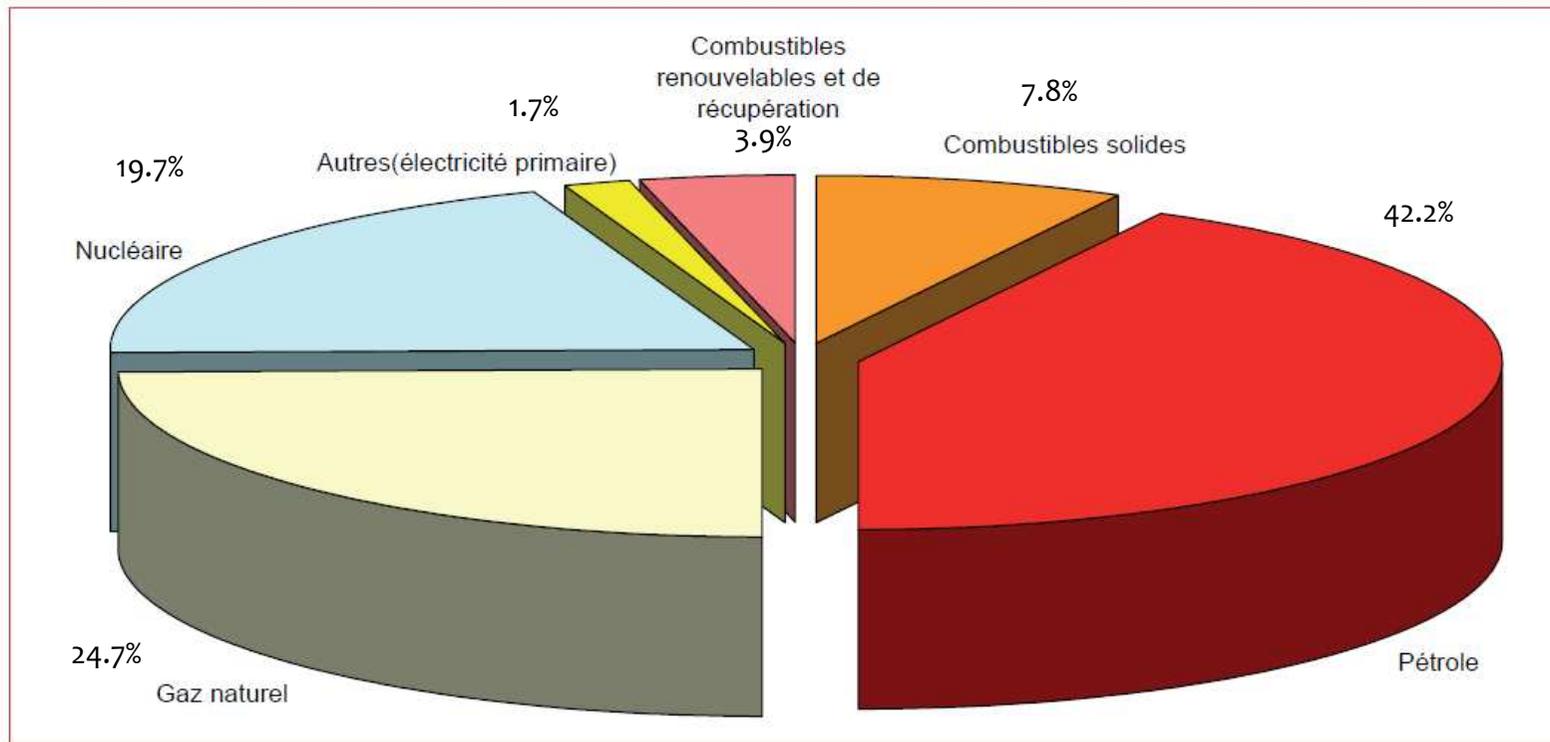
- La production d'hydrogène aujourd'hui
 - Reformage d'hydrocarbures à la vapeur d'eau = vaporeformage
 - $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$
 - $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$
 - Oxydation partielle d'une charge carbonée
 - $\text{C}_n\text{H}_m + n/2 \text{O}_2 \rightarrow n\text{CO} + m/2 \text{H}_2$
 - $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$
- L'hydrogène du futur ...
 - Production à partir de charges non fossiles
 - Vaporeformage des alcools
 - Électrolyse de l'eau
 - Craquage thermique de l'eau
 - Procédés biologiques
 - Pyrolyse/Gazéification de biomasse
 - ...



http://ec.europa.eu/research/rtdinfo/42/01/article_1315_fr.html

La situation belge

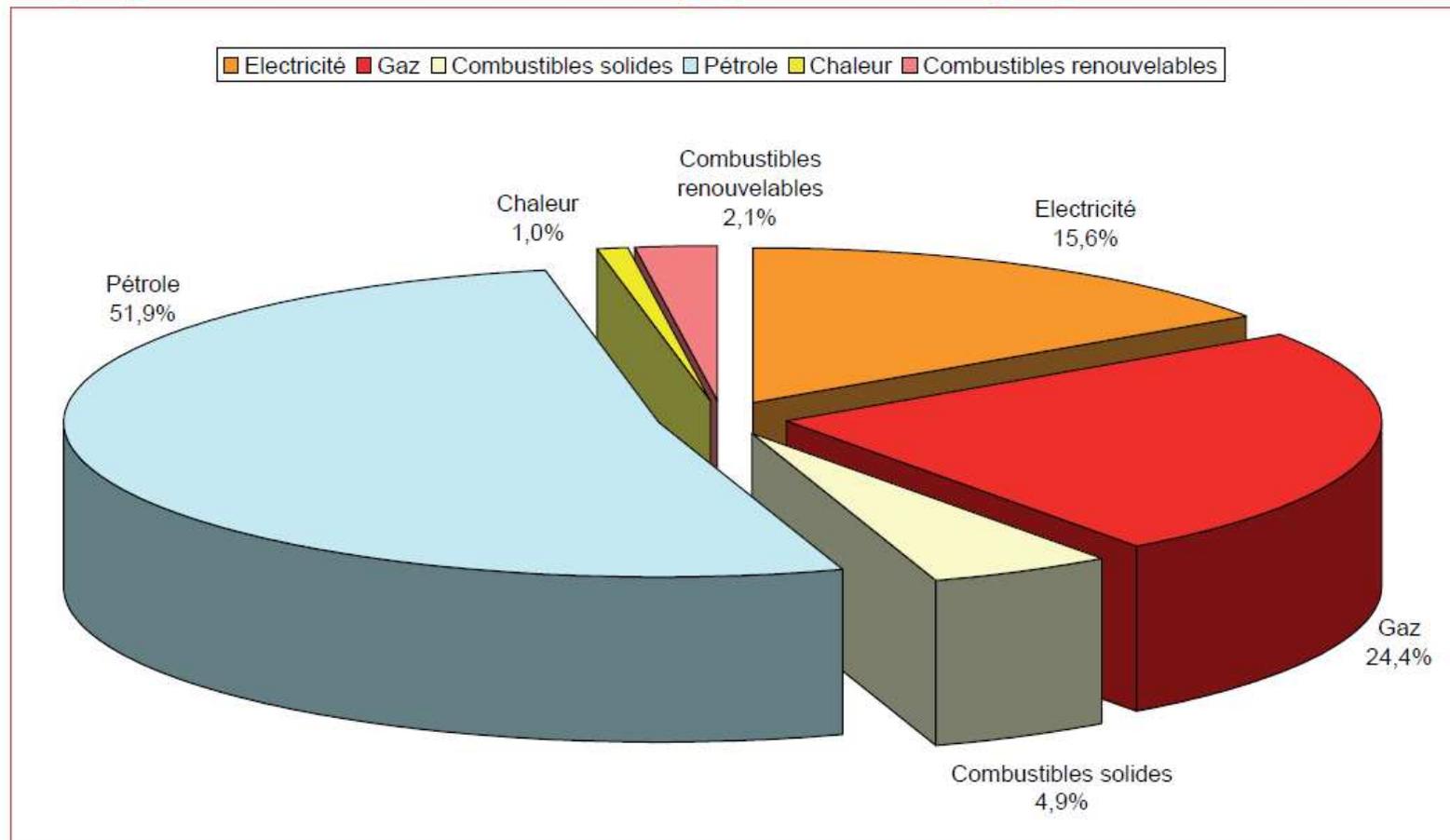
■ Part des différentes énergies primaires (2008)



Source : SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie.

La situation belge

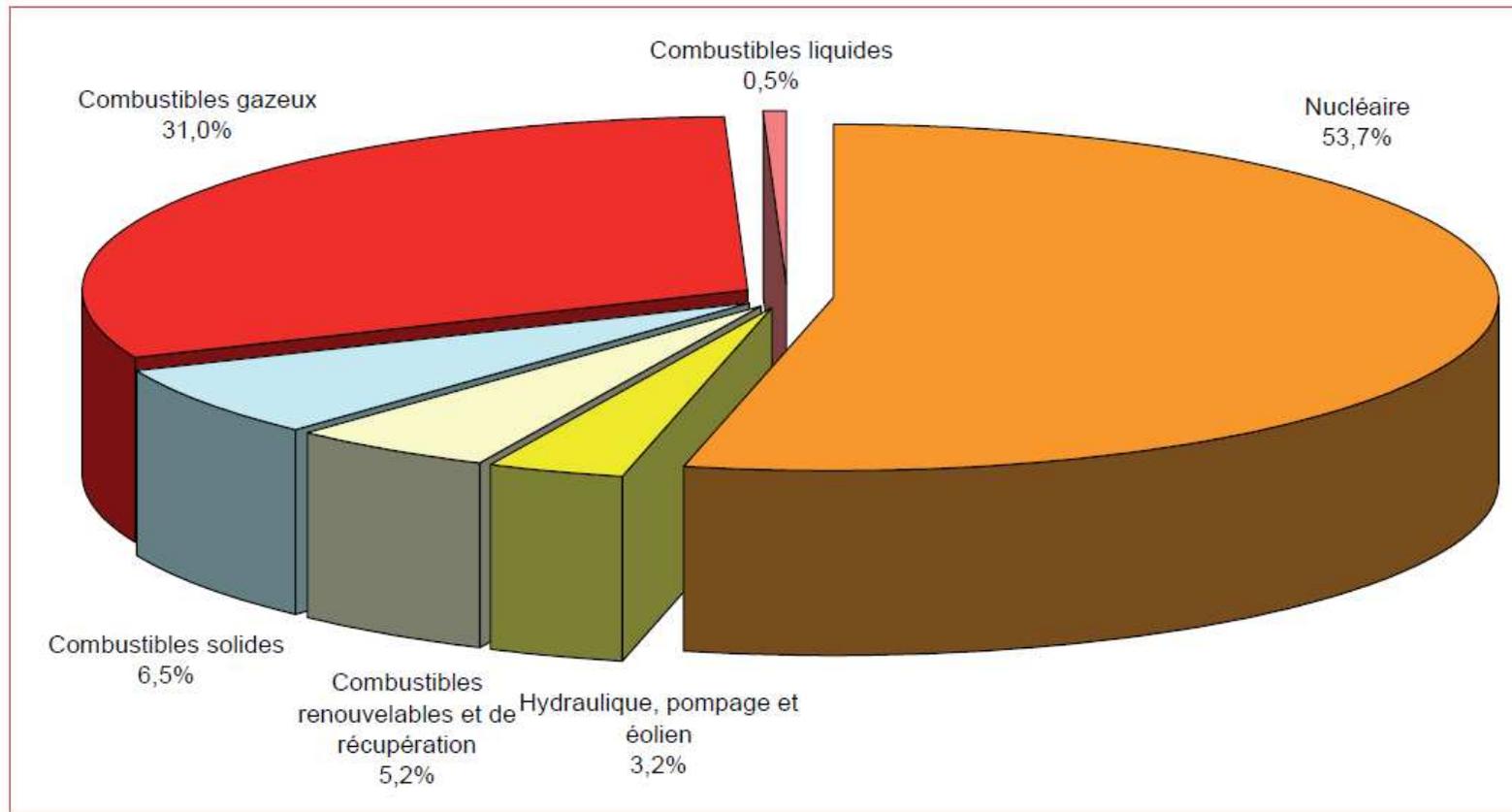
■ Part des différents vecteurs énergétiques (2008)



Source : SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie.

La situation belge

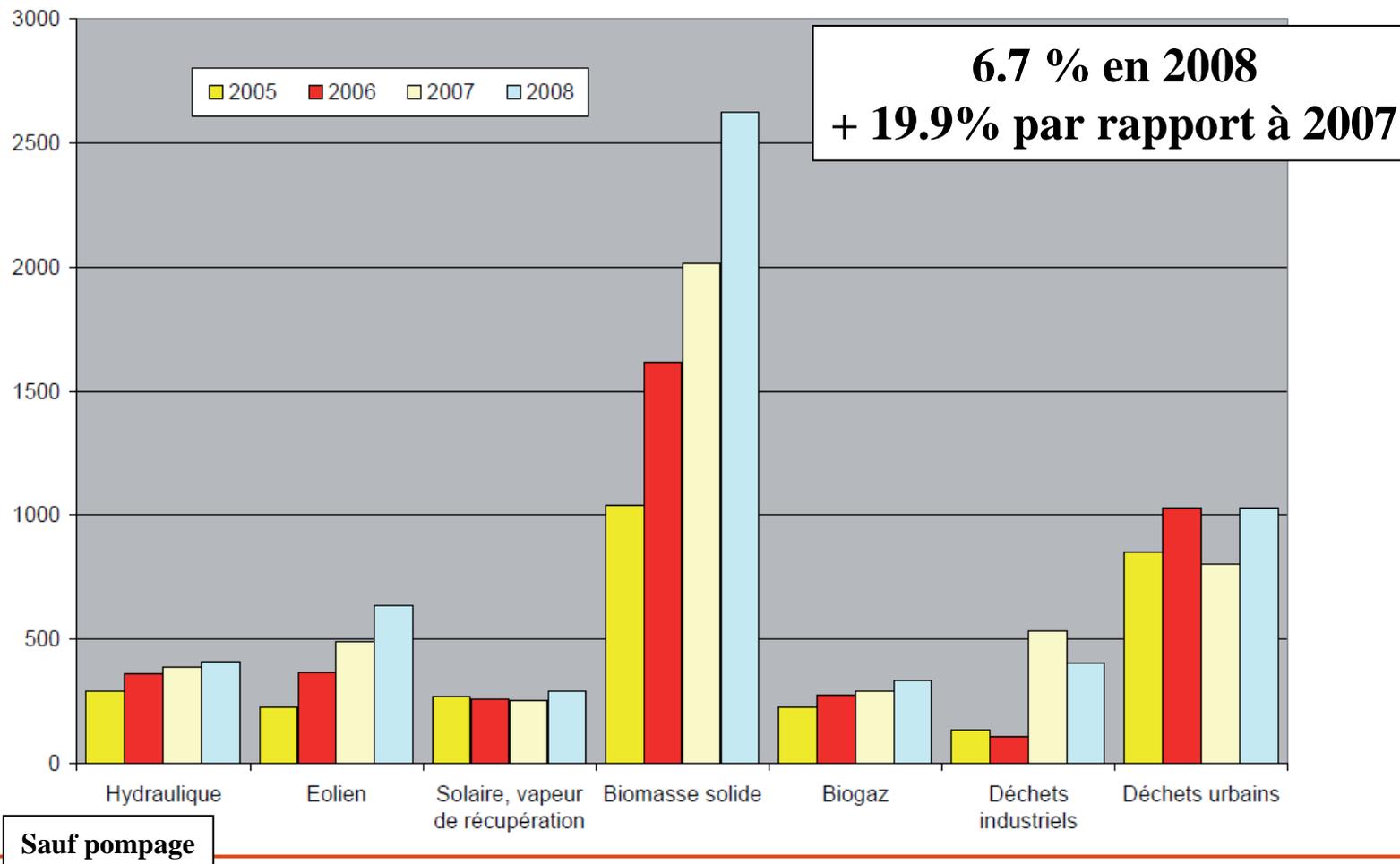
■ Structure de la production d'électricité (2008)



Source : SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie.

La situation belge

- Contribution des énergies renouvelables et des produits de récupération dans la production d'électricité - GWh



La situation belge et européenne

EU Member State	2006 Figure	2020 Target	% To cover:	
1 United Kingdom	1,5 %	15 %	13,5 %	
2 Ireland	2,9 %	16 %	13,1 %	
3 Denmark	17,2 %	30 %	12,8 %	
4 France	10,5 %	23 %	12,5 %	
5 Netherlands	2,7 %	14 %	11,3 %	
6 Spain	8,7 %	20 %	11,3 %	
7 Greece	7,1 %	18 %	10,9 %	
EU	9,2 %	20 %	10,8 %	
8 Italy	6,3 %	17 %	10,7 %	
9 Latvia	31,4 %	42 %	10,6 %	
10 Belgium	2,6 %	13 %	10,4 %	
11 Cyprus	2,7 %	13 %	10,3 %	
12 Germany	7,8 %	18 %	10,2 %	
13 Luxembourg	1 %	11 %	10 %	
14 Malta	0 %	10 %	10 %	
15 Portugal	21,5 %	31 %	9,5 %	
16 Slovenia	15,5 %	25 %	9,5 %	
17 Finland	28,9 %	38 %	9,1 %	
18 Austria	25,1 %	34 %	8,9 %	
19 Lithuania	14,6 %	23 %	8,4 %	
20 Estonia	16,6 %	25 %	8,4 %	
21 Hungary	5,1 %	13 %	7,9 %	
22 Sweden	41,3 %	49 %	7,7 %	
23 Poland	7,5 %	15 %	7,5 %	
24 Slovakia	6,8 %	14 %	7,2 %	
25 Bulgaria	8,9 %	16 %	7,1 %	
26 Romania	17 %	24 %	7 %	
27 Czech republic	6,5 %	13 %	6,5 %	

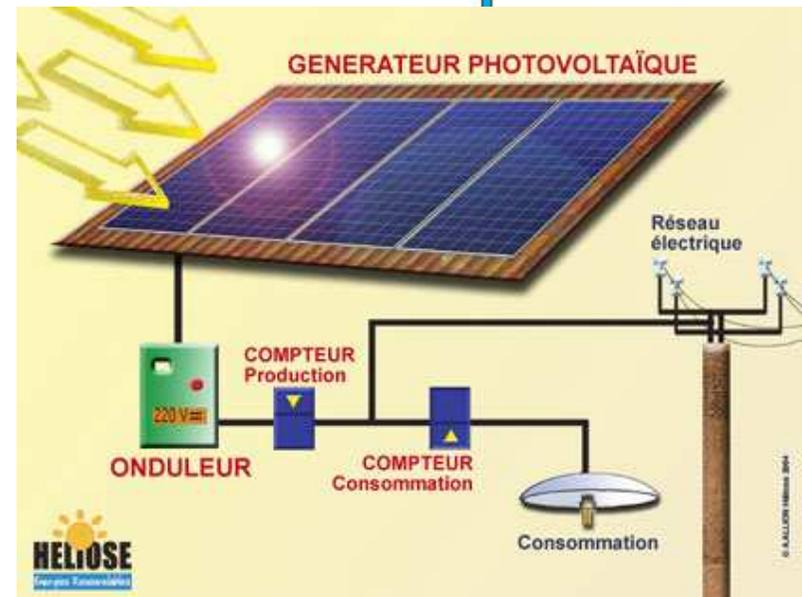
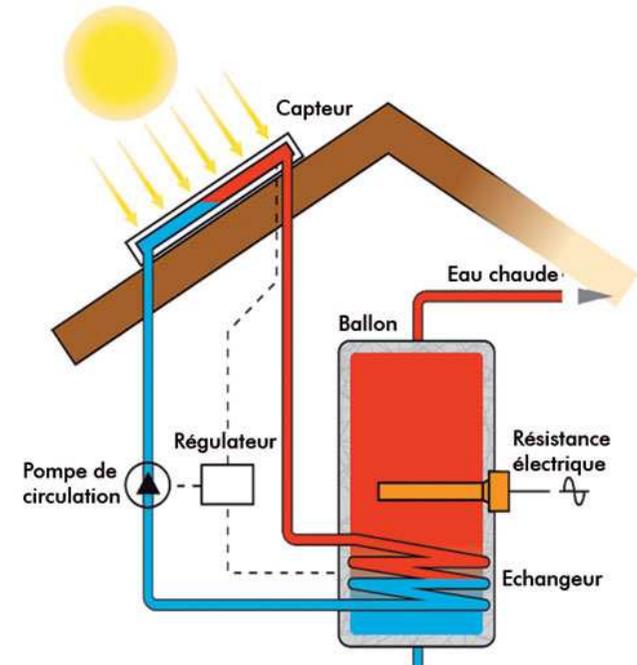
**Objectif 2020 :
20% de la consommation
finale d'énergie**

<http://www.energy.eu/>

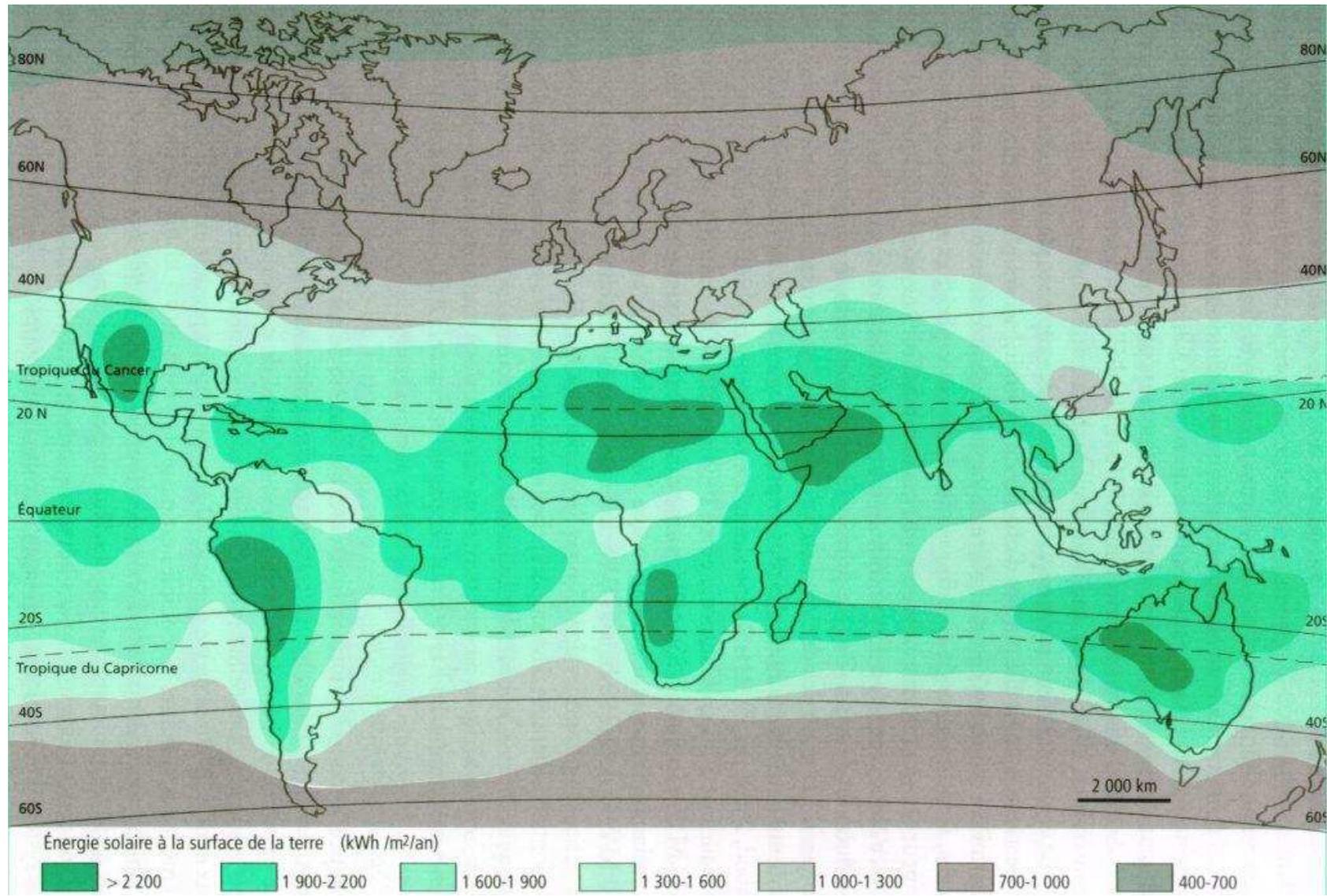
3. Sources d'énergie renouvelable

L'énergie solaire

- Énergie propre et abondante
- Inégalement répartie dans l'espace
 - de 800 à 2500 kWh/ m² selon régions et temps
- Solaire thermique = conversion énergie solaire en chaleur
- Solaire photovoltaïque = conversion énergie solaire en énergie électrique



L'énergie solaire

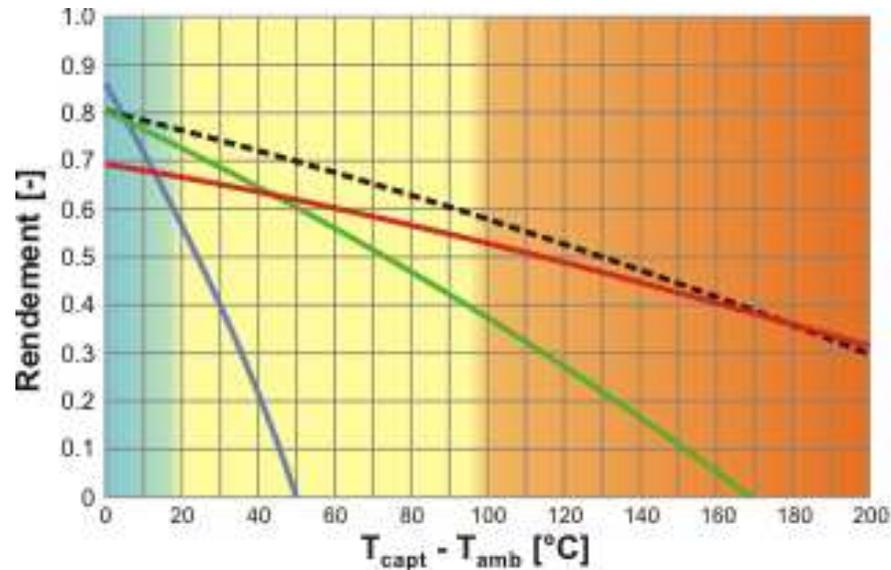


L'énergie solaire - Thermique

- Capteurs plans
 - ❑ Surface absorbante de couleur foncée derrière une vitre
 - ❑ Chaleur absorbée par surface noire est transmise à un fluide caloporteur (air, eau)
 - ❑ Température de 60 à 80°C peut être atteinte
 - ❑ Applications : eau chaude sanitaire, chauffage basse température, eau chaude industrielle ...
- Capteurs cylindriques
 - ❑ Système sous vide avec fluide caloporteur à plus haute température (100°C et plus)
 - ❑ Application : chauffage, climatisation via échangeur à solution chimique

L'énergie solaire - Thermique

■ Rendements



- Capteur plan non vitré
- Capteur plan vitré
- - - Capteur sous vide avec absorbeur sur cuivre
- Capteur sous vide avec absorbeur sur verre

- 0 - 20°C : Chauffage de piscine
- 20 - 100 °C : Eau sanitaire et chauffage
- > 100°C : Eau sanitaire et chauffage à haute température
Climatisation solaire
Process industriel



http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_16760.htm

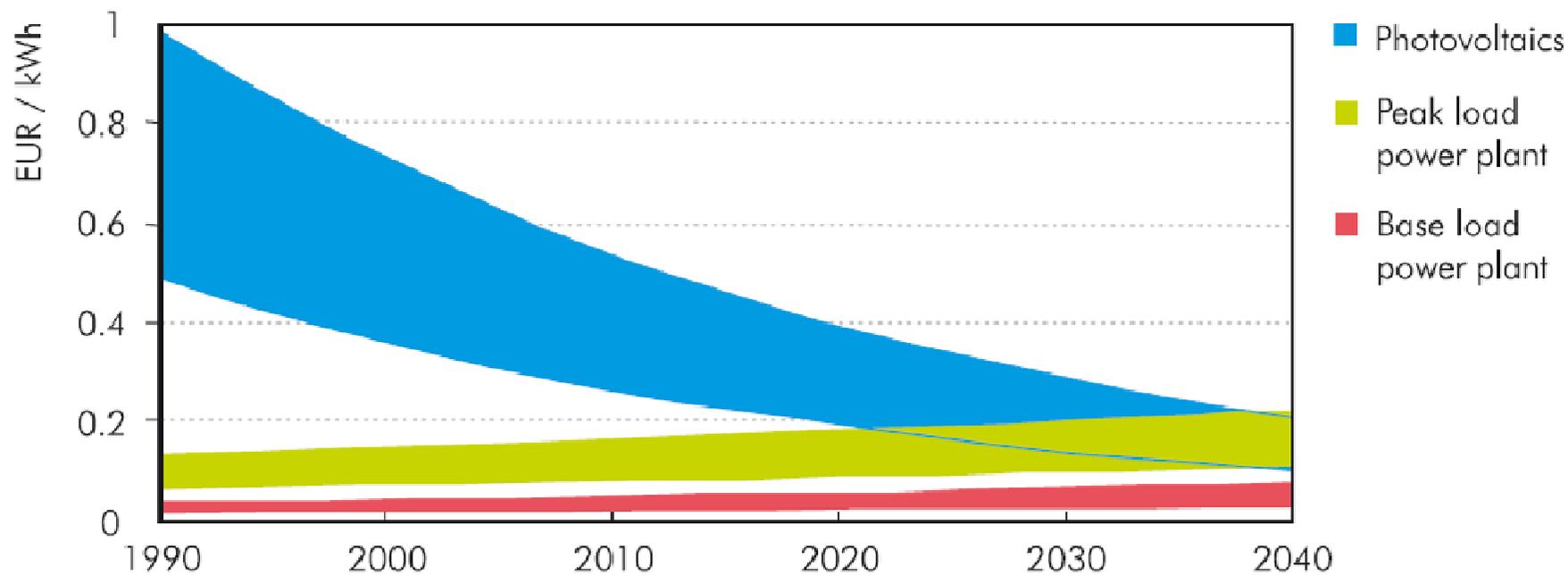
<http://www.energie douce.com/conseils-faq-panneaux-captteurs-solaires-thermiques-a-eau>

L'énergie solaire - Photovoltaïque

- Utilisation de cellules solaires ou photopiles
 - ❑ Matériau de base = semi conducteur comme le silicium
 - ❑ Cellules placés dans des panneaux vitrés
 - ❑ Durée de vie dépasse 20 ans
 - ❑ Rendement est passé de 5 à 20%
 - ❑ Applications ponctuelles diverses
 - télécommunication
 - systèmes mécaniques
 - éclairage
 - ❑ Centrales photovoltaïques
 - parfois > à 10 MW (Bavière, Portugal)
 - diffusion limitée pour des raisons économiques

L'énergie solaire - Photovoltaïque

■ Projection de réduction des coûts



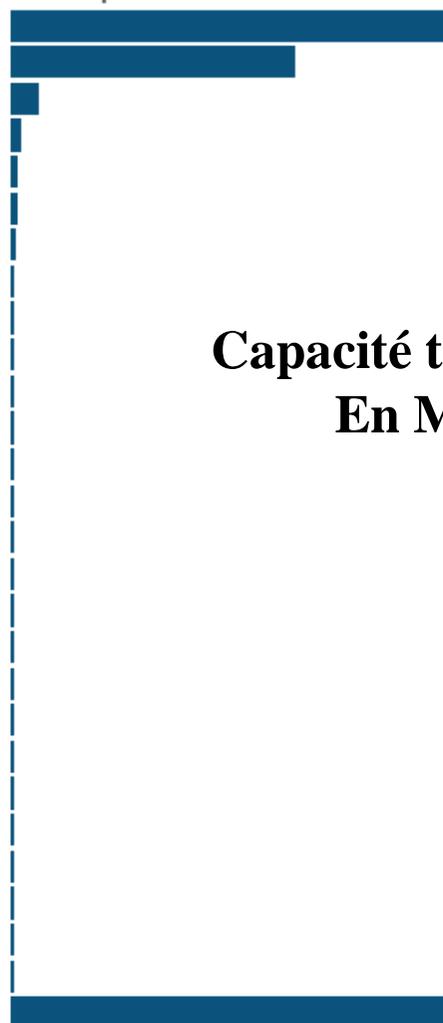
Source: Hoffmann, 2001.

Energy technology perspectives 2006, Scenarios and strategies to 2050, IEA

L'énergie solaire - Photovoltaïque

Ranking:	Country:	Amount:
1	Germany	5351,0
2	Spain	3404,8
3	Italy	317,5
4	France	91,2
5	Belgium	71,2
6	Portugal	68,0
7	Netherlands	55,0
8	Czech Rep.	30,3
9	Austria	30,2
10	Luxembourg	24,4
11	United Kingdom	21,6
12	Greece	18,5
13	Sweden	7,9
14	Finland	5,7
15	Denmark	3,2
16	Slovenia	2,1
17	Cyprus	2,1
18	Poland	1,6
19	Bulgaria	1,4
20	Hungary	0,5
21	Romania	0,5
22	Ireland	0,2
23	Malta	0,1
24	Slovakia	0,1
25	Lithuania	0,1
26	Estonia	0,1
27	Latvia	0,1
	Total EU	9533,3

Bar Graph:



**Capacité totale installée fin 2008
En MWp (MW peak)**

<http://www.energy.eu/>

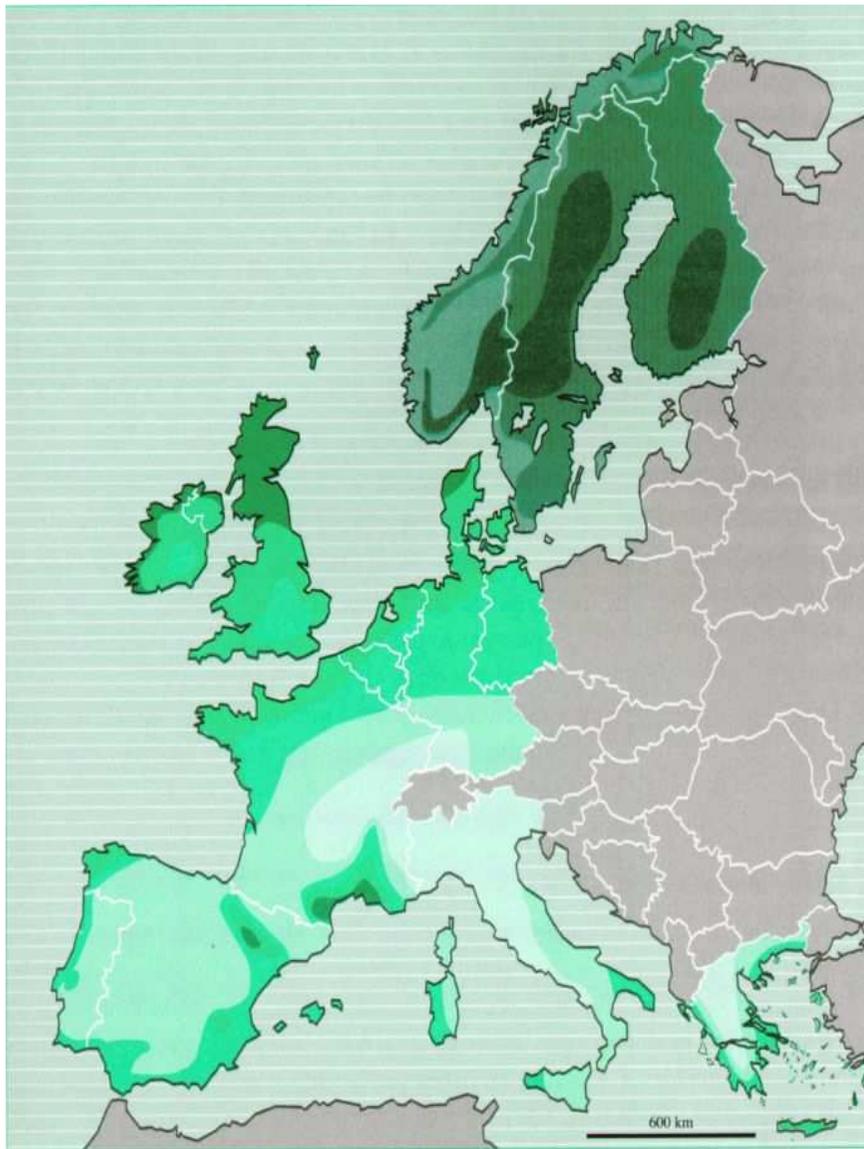
L'énergie éolienne

- Plus ancienne énergie exploitée par l'homme
 - Bâteaux à voiles
 - Moulins à vent
 - irrigation
 - meulage du grain
 - sciage du bois
 - fabrication d'huile
 - ...
- Aujourd'hui
 - vent → énergie mécanique → énergie électrique

L'énergie éolienne

- 2 types d'éoliennes
 - générateur → courant continu
 - alimentation de batteries
 - générateur → courant alternatif
 - courant injecté sur le réseau
 - parc d'éoliennes
- Quelques caractéristiques techniques
 - rendement proportionnel à la (vitesse)³
 - gamme de vitesse recherchée : 3 à 25 m/s
 - zones favorables : côte, plaines et plateaux dégagés, certaines régions montagneuses
 - intérieur des terres : vents discontinus et aléatoires

L'énergie éolienne



Légende	Terrains avec obstacles		Terrains dégagés	
	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
	> 6,0	> 250	> 7,5	> 500
	5-6	150-250	6,5-7,5	300-500
	4,5-5	100-150	5,5-6,5	200-300
	3,5-4,5	50-100	4,5-5,5	100-200
	< 3,5	< 50	< 4,5	< 100
			> 7,5	
			5,5-7,5	
			< 5,5	

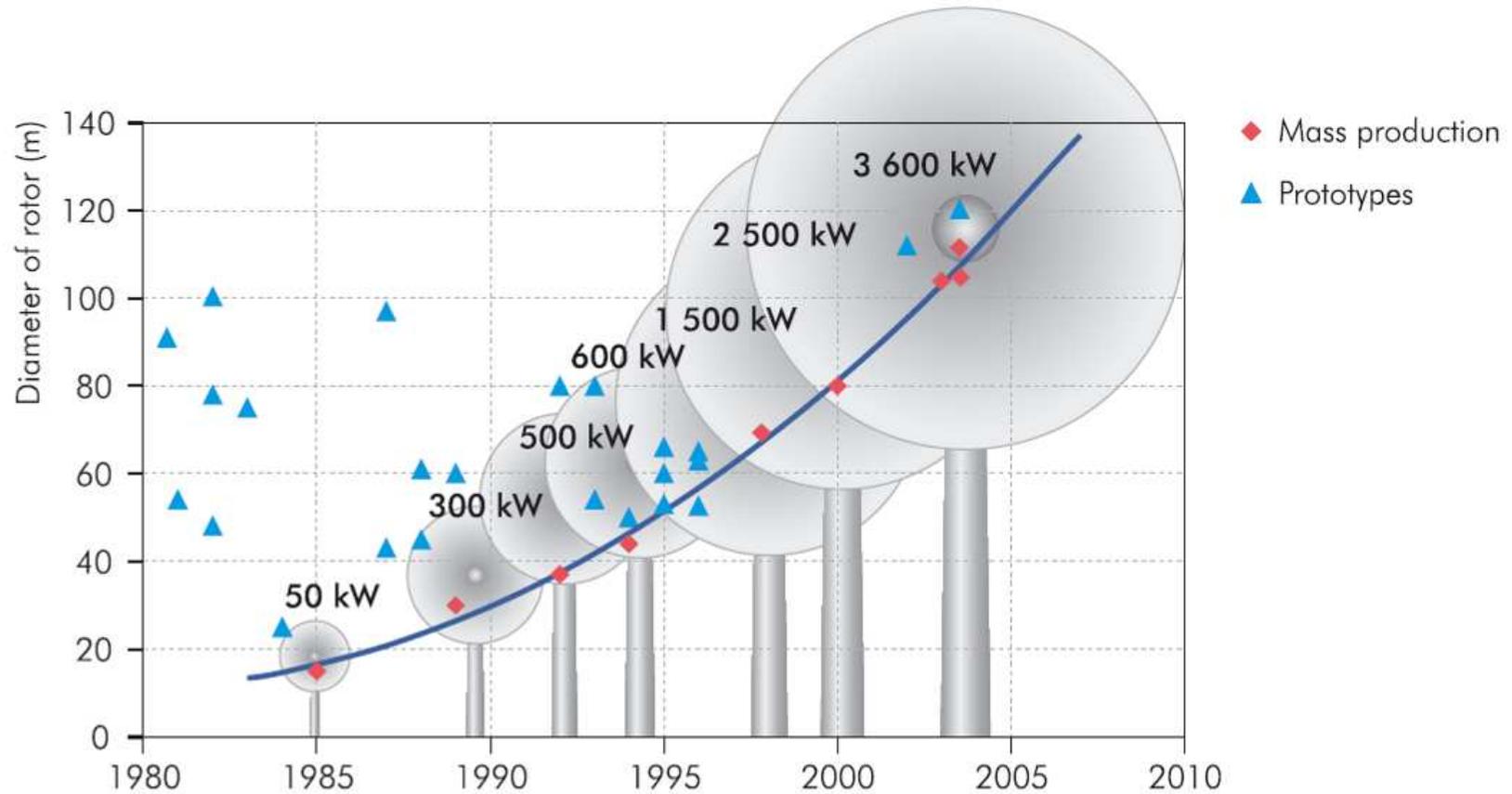
En bord de mer		Mer ouverte		Collines et crêtes de collines	
m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
> 8,5	> 700	> 9	> 800	> 11,5	> 1 800
7-8,5	400-700	8-9	600-800	10-11,5	1 200-1 800
6-7	250-400	7-8	400-600	8,5-10	700-1 200
5-6	150-250	5,5-7	200-400	7-8,5	400-700
< 5	< 150	< 5,5	< 200	< 7	< 400

L'énergie éolienne

- Quelques caractéristiques techniques
 - ❑ Puissance actuelle : 1 à 2 MW
 - ❑ Europe = 70% éolien mondial
- Nuisances ?
 - ❑ Impact paysager
 - ❑ Bruits
 - ❑ Obstacles pour oiseaux
- Impact CO₂ ?
 - ❑ Pas de production 'directe' mais couplage avec centrale thermique pour faire face à l'intermittence
 - mise en fonctionnement ou augmentation régime centrale
 - ❑ → production CO₂
 - ❑ Recherche d'un point d'équilibre
 - Belgique : 5% production soit 700 MW soit 350 éoliennes

L'énergie éolienne

■ Croissance de la taille des éoliennes

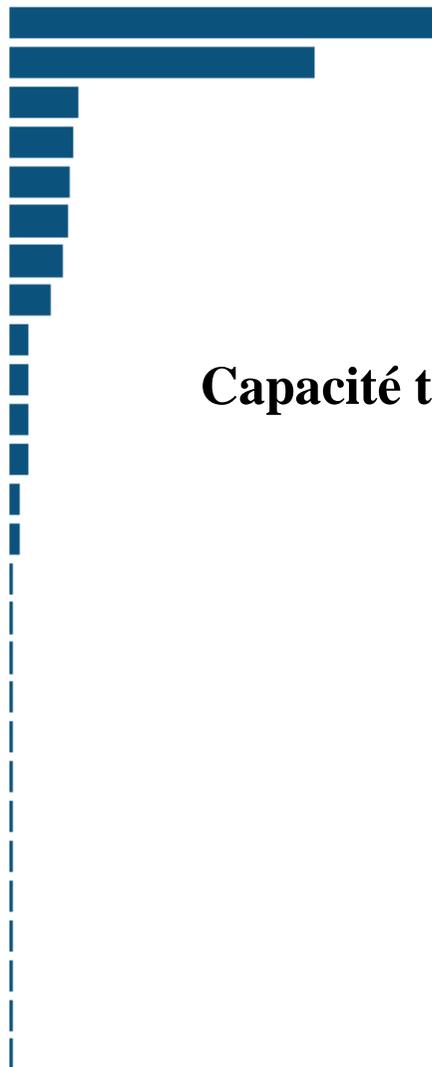


Source: German Wind Energy Institute (DEWI), 2004.

Energy technology perspectives 2006, Scenarios and strategies to 2050, IEA

L'énergie éolienne

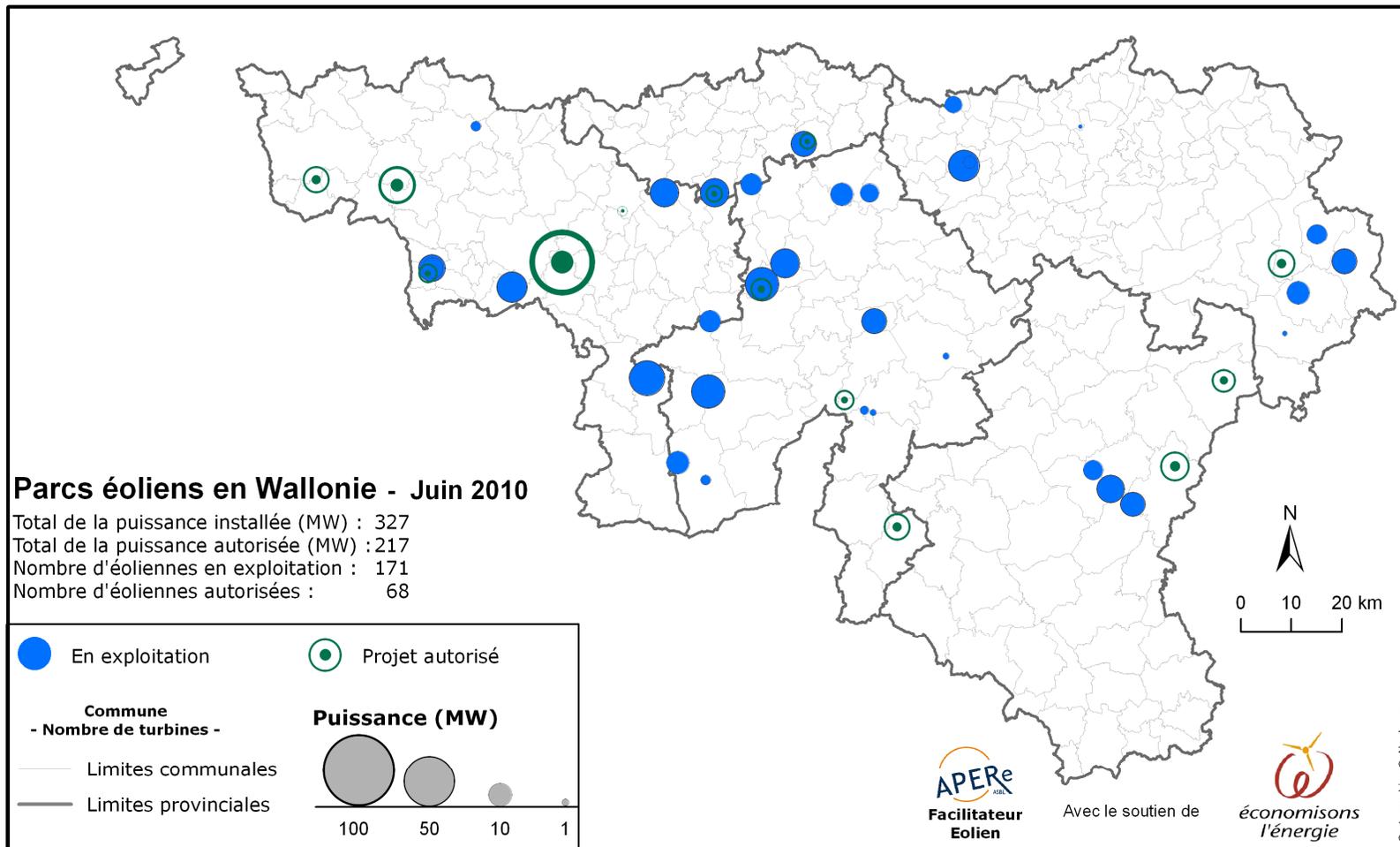
1	Germany	23903
2	Spain	16740
3	Italy	3736
4	France	3404
5	United Kingdom	3241
6	Denmark	3180
7	Portugal	2862
8	Netherlands	2225
9	Sweden	1021
10	Ireland	1002
11	Austria	995
12	Greece	985
13	Poland	472
14	Belgium	384
15	Bulgaria	158
16	Czech Rep.	150
17	Finland	143
18	Hungary	127
19	Estonia	78
20	Lithuania	54
21	Luxembourg	35
22	Latvia	27
23	Romania	10
24	Slovakia	3
25	Cyprus	0
26	Malta	0
27	Slovenia	0



Capacité totale installée fin 2008
En MW

<http://www.energy.eu/>

L'énergie éolienne



L'énergie hydraulique

- Généralités
 - ❑ Utilisation remonte à la fin du XIXème siècle
 - ❑ Contrainte sur les sites → développement limité
 - ❑ 16% de la production mondiale d'électricité
- Structure d'une centrale hydroélectrique
 - ❑ Couple turbine-alternateur
 - ❑ Rotation de la turbine assurée par énergie cinétique
 - Énergie cinétique → Énergie mécanique → Énergie électrique
 - ❑ Conduites forcées amènent l'eau au dessus des turbines
 - ❑ Production dépend de la hauteur de chute et du débit
- Classification selon importance des réserves en eau

L'énergie hydraulique

- Centrales-lacs
 - ❑ Importante réserve d'eau
 - ❑ Longue période d'accumulation (fonte des neiges)
 - ❑ Grande hauteur de chute
 - ❑ Rôle : régulation saisonnière ou production aux heures de pointe
 - ❑ Ex: Barrage de la Volga
- Centrales d'éclusée
 - ❑ Réserve moyenne
 - ❑ Eaux des rivières → courte accumulation
 - ❑ Hauteur de chute moyenne
 - ❑ Typique des aménagement de moyenne montage
 - ❑ Rôle : régulation journalière ou hebdomadaire de la production
 - ❑ Ex. Usines du Massif Central (France)

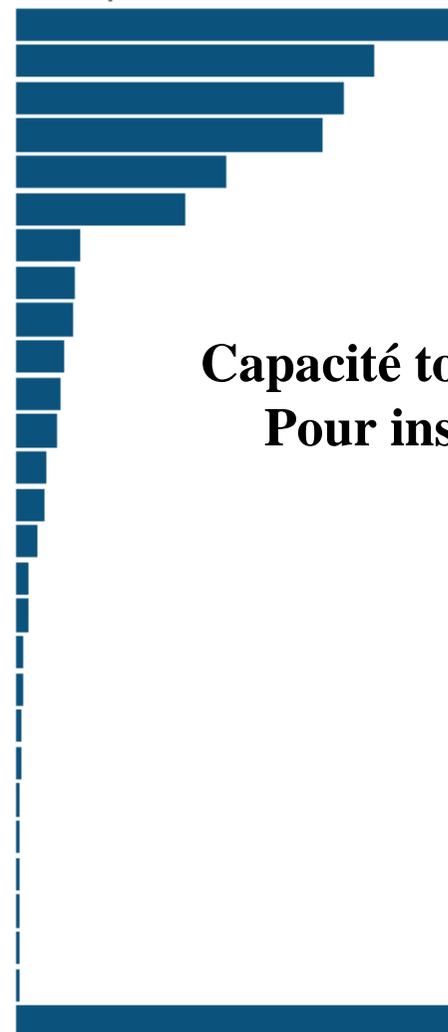
L'énergie hydraulique

- Centrales au fil de l'eau
 - ❑ Pas de réserves mais alimentation continue
 - ❑ Très faible hauteur de chute
 - ❑ Rôle : production de base mais pas de régulation
 - ❑ Ex. Usines sur la Meuse ou sur l'Ourthe (Chênée)
- Centrales de pompage
 - ❑ Eau pompée d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur en utilisant électricité excédentaire pendant heures creuses
 - ❑ Eau turbinée aux heures de pointe → valeur plus élevée
 - ❑ Rôle : production énergie de pointe
 - ❑ Rendement : proche de 70%
 - ❑ Ex. Coe (Belgique), Vianden (Luxembourg)

L'énergie hydraulique

Ranking:	Country:	Amount:
1	Italy	2595
2	France	2061
3	Spain	1882
4	Germany	1756
5	Austria	1201
6	Sweden	962
7	Portugal	371
8	Romania	325
9	Finland	316
10	Czech Rep.	277
11	Poland	250
12	Bulgairia	225
13	United Kingdom	167
14	Slovenia	155
15	Greece	116
16	Slovakia	63
17	Belgium	57
18	Ireland	38
19	Luxembourg	35
20	Lithuania	27
21	Latvia	25
22	Hungary	12
23	Denmark	9
24	Estonia	5
25	Netherlands	2
26	Malta	0
27	Cyprus	0
	Total EU	12932

Bar Graph:

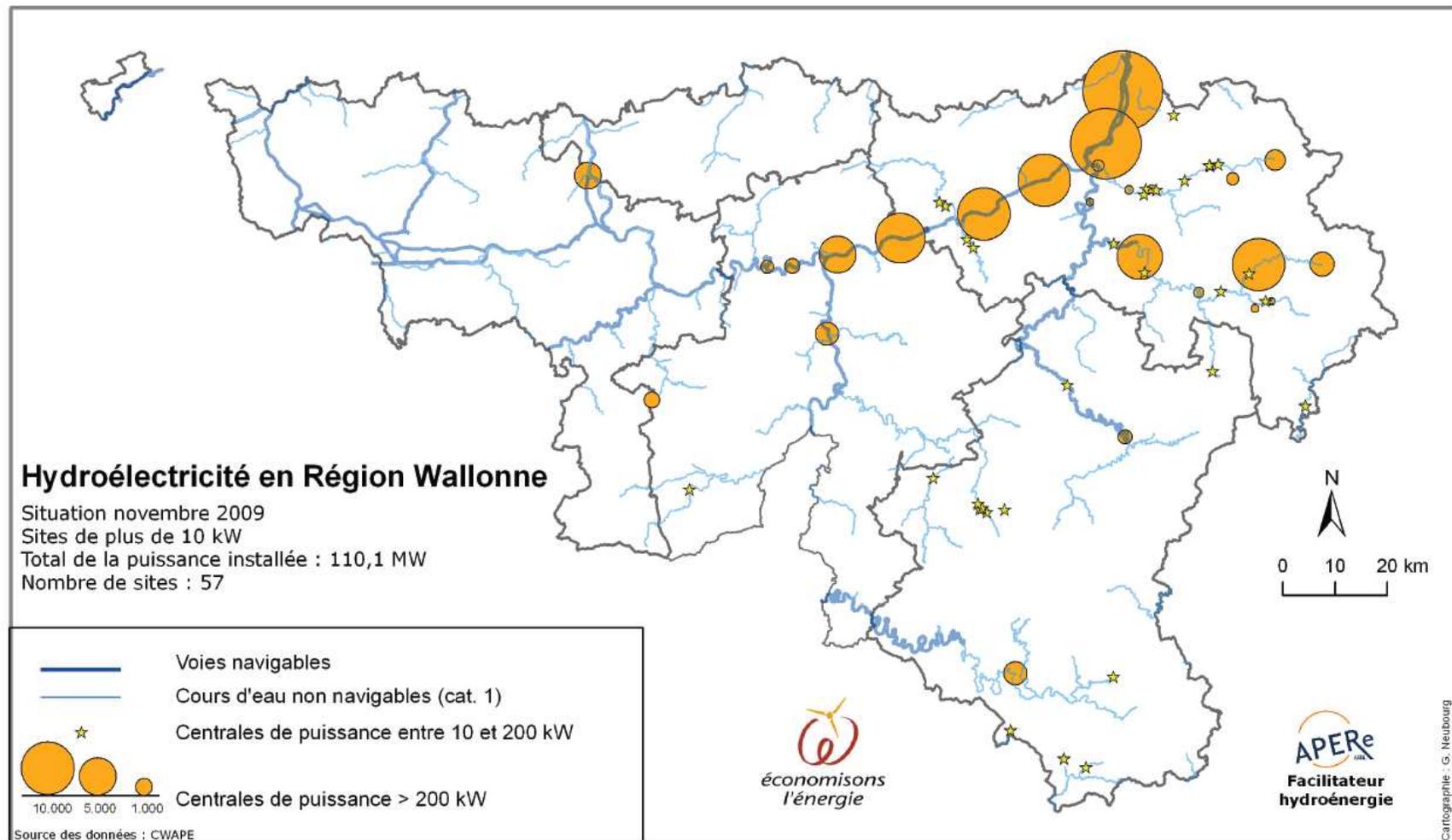


**Capacité totale installée fin 2008
Pour installation < 10 MW
En MW**

<http://www.energy.eu/>

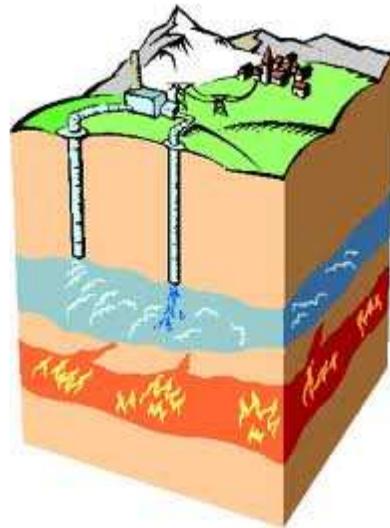
L'énergie hydraulique

- Production d'énergie hydraulique en RW



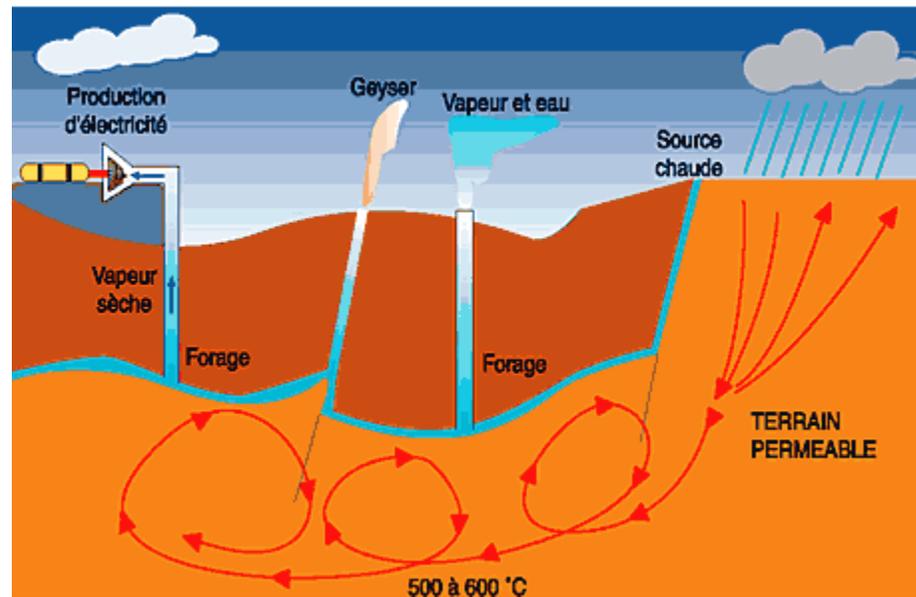
L'énergie géothermique

- = Utilisation de la chaleur présente dans la croûte terrestre pour produire chaleur et/ou électricité
- Exploitation de gisements géothermiques
 - Réservoirs de vapeur
 - Réservoirs d'eau chaude
- Mise en œuvre de 'pompes à chaleur'



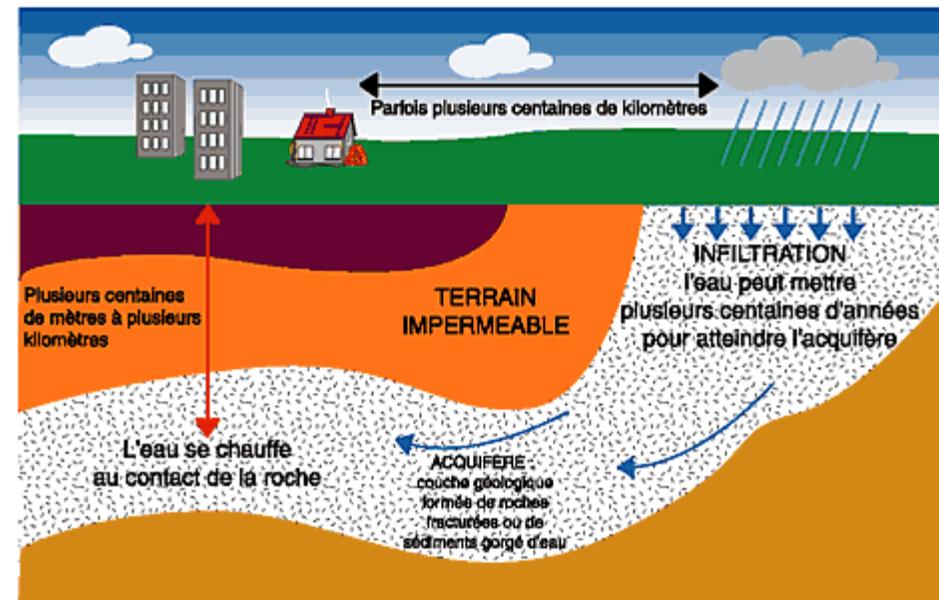
L'énergie géothermique

- Réservoirs de vapeur = haute énergie : $T > 150^{\circ}\text{C}$
 - ❑ Origine : eau de pluie infiltrées dans le sol et réchauffées par la proximité de la masse magmatique
 - ❑ Gisements localisés entre 1500 et 3000 m de profondeur
 - Régions volcaniques : grand rift africain, ceinture de feu du Pacifique,
 - Signes en surface : fumerolles, geysers, sources chaudes
 - ❑ Vapeur extraite par forage \rightarrow canalisations \rightarrow turbine + alternateur



L'énergie géothermique

- Réservoirs d'eau chaude = basse ou moyenne énergie : $50^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$
 - Situés dans bassins sédimentaires (entre 1000 et 2000 m)
 - nappes d'eau chaude (aquifères) = roches poreuses imbibées d'eau (grès, calcaire, sable)
 - Ex. Bassin parisien et aquitain
 - Applications diverses
 - Chauffage urbain et production ECS
 - Agriculture
 - Industrie
 - ...

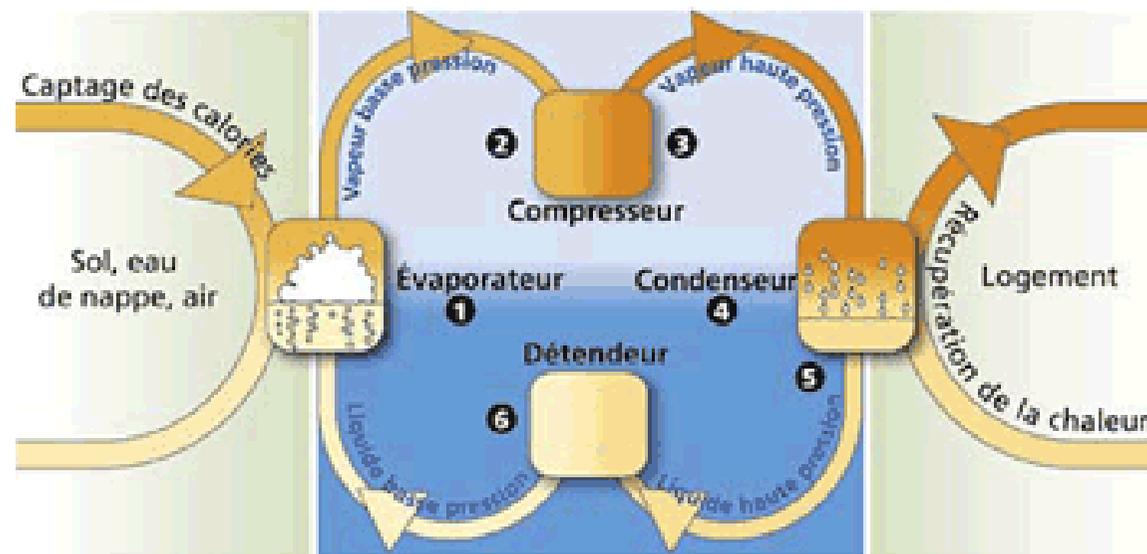


L'énergie géothermique

- Pompes à chaleur
 - ❑ Récupération de la chaleur captée par la terre en surface
 - ❑ Chaleur prélevée dans le sol et réinjectée à l'intérieur de la maison
 - Source froide = milieu d'où on extrait l'énergie
 - Source chaude = milieu où on réinjecte l'énergie
 - ❑ Naturellement : chaleur se transfère du milieu chaud vers froid
 - Ici cas contraire → besoin d'entrer de l'énergie dans le système
 - ❑ COP = coefficient de performance
 - = rapport entre quantité de chaleur produite et énergie électrique consommée par le compresseur
 - compris entre 3 et 5 pour les systèmes commerciaux

L'énergie géothermique

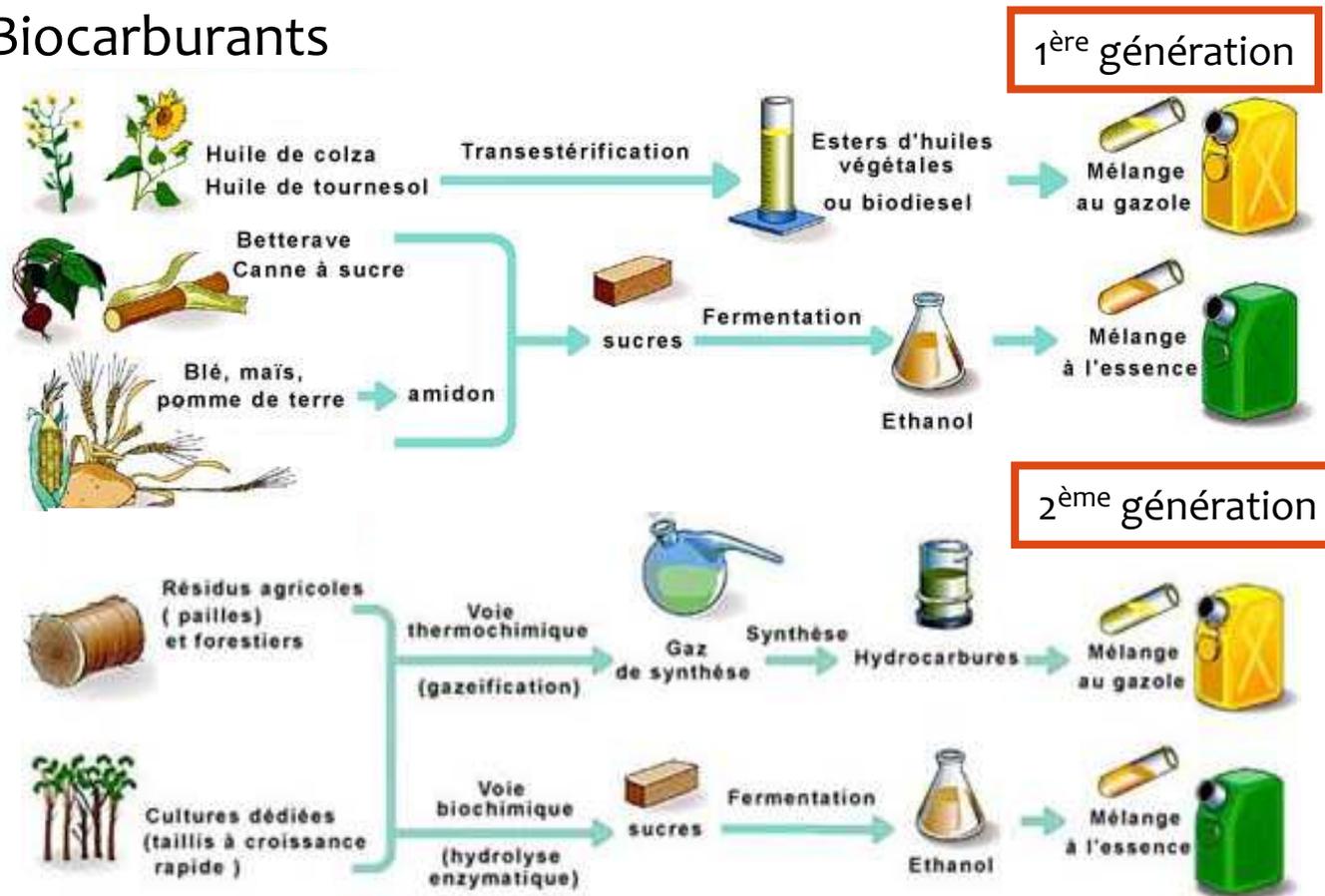
- Pompes à chaleur
 - ❑ Récupération de la chaleur via serpentins dans le sol
 - ❑ Chaleur transférée à une fluide frigorigène → évaporation
 - ❑ Élévation température par compression
 - ❑ Restitution chaleur à l'eau du circuit de chauffage → condensation
 - ❑ Abaissement pression du fluide frigorigène dans détenteur



La biomasse

■ Combustibles renouvelables

- Bois-énergie
- Biocarburants



- Biogaz

Pour conclure ...

Conclusions

- Nécessiter de diversifier les sources et vecteurs énergétiques
- Renouvelable se développe mais restera limité
- Favoriser les mesures permettant la réduction de consommation d'énergie
 - Responsabilisation des acteurs
- Favoriser la recherche dans le domaine de l'énergie
 - Amélioration de l'efficacité énergétique
 - Thermique du bâtiment
 - Rendements des étapes de conversion (cogénération, ...)
 - ...
 - Nouvelles voies : hydrogène, fusion nucléaire ?
- ...

Liens utiles

- www.apere.org
- www.valbiom.be
- www.energy.eu
- www.ifpenergiesnouvelles.fr
- <http://economie.fgov.be/fr/statistiques/chiffres/energie/prix/index.jsp>
- [//www.energies-renouvelables.org/](http://www.energies-renouvelables.org/)
- http://ec.europa.eu/energy/renewables/transparency_platform/action_plan_en.htm

Merci pour votre attention !
