

Les sources d'énergie

« Ne pas se moquer, ne pas se lamenter, ne pas détester, mais *COMPRENDRE.* »

Baruch SPINOZA

Plan général

- **1^{ère} partie : Définitions préalables**
- **2^{ème} partie: Les énergies**
 - *Origines des sources d'énergie*
 - *Caractéristiques des sources d'énergie*
 - *Les sources « fossiles »*
 - *Les sources « renouvelables »*
- **3^{ème} partie : L'intermittence**
 - *Le défi de l'intermittence*
 - *Le stockage de l'électricité*
- **Conclusions**

Définitions préalables

- **Puissance et énergie : ne pas confondre**
- **Coefficient de charge**
- **Énergies primaires vs énergies finales**

Puissance vs Énergie

- **La puissance est la capacité instantanée à produire**
- **L'énergie est le produit de la puissance par le temps**

Puissance : unités

- Kilowatt $KW = 1.000$ watt
- Mégawatt $MW = 1.000$ kW = 1 million watts
- Gigawatt $GW = 1.000$ MW = 1 million KW
- 10 mètres-carrés de panneau photovoltaïque ont une puissance de 1 KW
- 1 éolienne 2 MW (en moyenne)
- 1 réacteur nucléaire 1 GW (en moyenne)

Énergie produite (unités)

- Kilowatt-heure **KWh** = 3,6 MégaJoules
- Mégawatt-heure **MWh** = 1.000 KWh
- Gigawatt-heure **GWh** = 1 Million KWh
- Téra watt-heure **TWh** = 1 milliard KWh
- Tonne-équivalent-pétrole **Tep** = 11.630 KWh
- Un ménage français consomme 7.000 KWh d'électricité par an.
- La France consomme 500 TWh d'électricité chaque année.

Coefficient de charge

- **C'est le rapport entre ce que produit effectivement une source d'énergie sur une année (8.760 heures) et ce qu'elle pourrait produire si elle le faisait toute l'année à la puissance maximale.**
- **Exemple : éolienne 23 % , centrale thermique 70-80 % , photovoltaïque 11 %**
- **Les coefficients de charge des différentes sources d'énergie dépendent du climat, du lieu. Ils peuvent interagir les uns sur les autres.**

Coefficients de charge :

France électricité 2016 (%)

Nucléaire	69
Charbon	28
Fioule	5
Gaz	34
Hydraulique	28
éolien	20
Photo Voltaïque	14

Énergie primaire vs énergie finale

- **Énergie primaire = énergie disponible ou importée**
- **Énergie finale = énergie consommée (après transformation) = environ 50% Primaire**
- **Toutes les énergies primaires sont gratuites**
- **Vecteurs d'énergie : le bois, le gaz, les carburants, l'électricité...**
- **L'électricité n'est pas une énergie, mais un vecteur.**

Origines des énergies primaires

- **La terre** : calories de la terre, énergies fossiles carbonées, atomes radio-actifs fossiles.
- **Le soleil** : rayonnement infra-rouge, photons (lumière), calories de l'air, calories des océans, vent, réserves hydrauliques.
- **La lune** : marées (attraction lunaire)

Énergies de la terre

Au coeur de la terre (6.000 kms) la température est de **5.000°C**

En surface elle est en moyenne de **15°C**.

A moins 500 mètres elle est en moyenne de **30°C**

A moins 2.000 mètres **80°C**

Il existe des gradients de température selon la nature des couches géologiques, des failles, des nappes d'eau.

Radioactivité terrestre

A l'origine la terre devait être très radioactive

On estime actuellement que chaque jour **1.000 tonnes** de radioéléments se transforment en éléments stables.

Principaux radioisotopes utilisables : **Uranium 235 (U^{235})** et **Thorium 232 (Th^{232})**

Énergies fossiles carbonées (réserves estimées)

Milliards de Tep

Charbon	450
Pétrole	230
Gaz "naturel"	170

Pays possédant des réserves de charbon

CHINE, USA, AUSTRALIE, INDE, KAZAKSTAN,

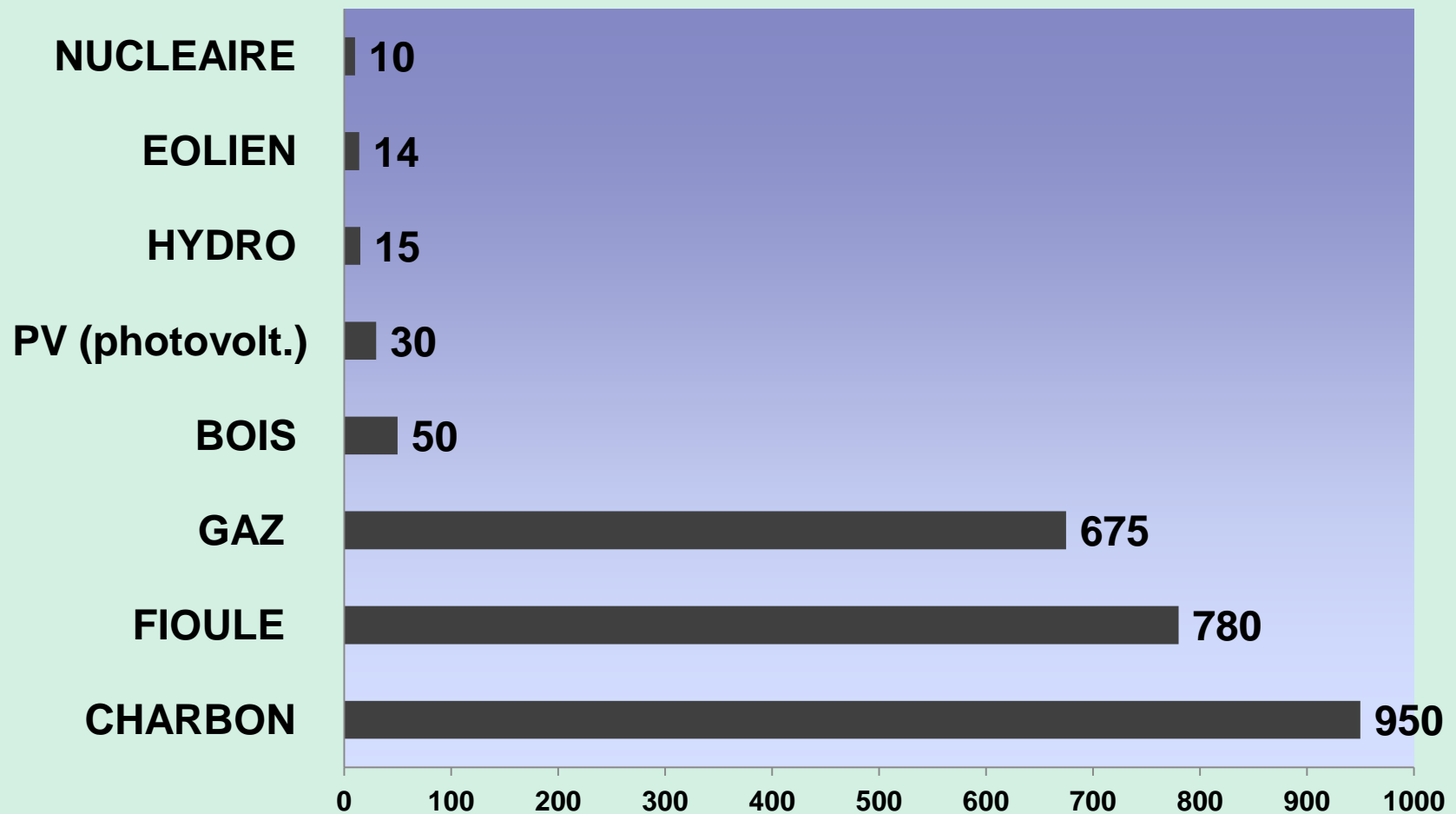
POLOGNE, RUSSIE, UKRAINE, AFRIQUE du SUD

À 9 ils disposent de 90 % des réserves mondiales

Caractéristiques des énergies

- dégagement de CO₂ et autres gaz (GES)
- coefficient de charge
- réserves de la ressource (en tep)
- rapidité de mobilisation (à la demande)
- Coût de l'investissement (par KW)
- durée de vie
- prix de revient du KWh

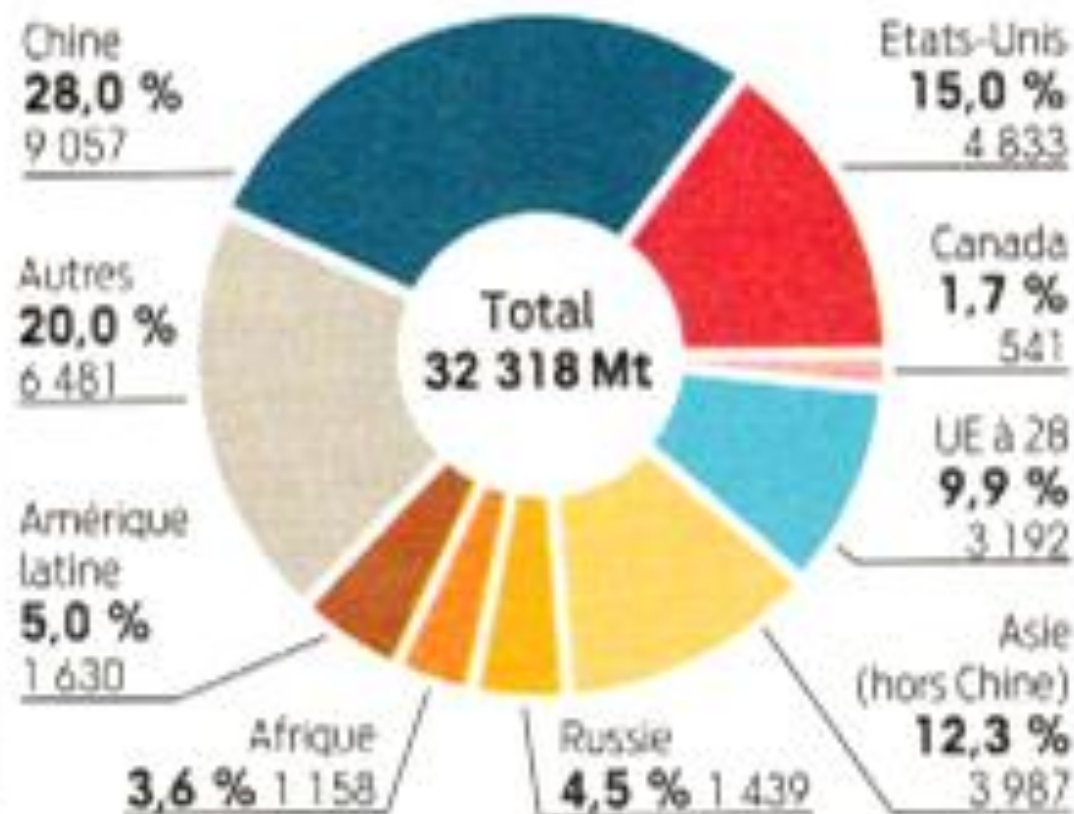
CO2 dégagé (g) par kWh d'électricité produit



Production mondiale de GES

LA CHINE ET LES ÉTATS-UNIS EN TÊTE DES ÉMISSIONS

Emissions de CO₂ en 2016, en millions de tonnes et en % du total



Source : Agence internationale de l'énergie (IEA), OCDE

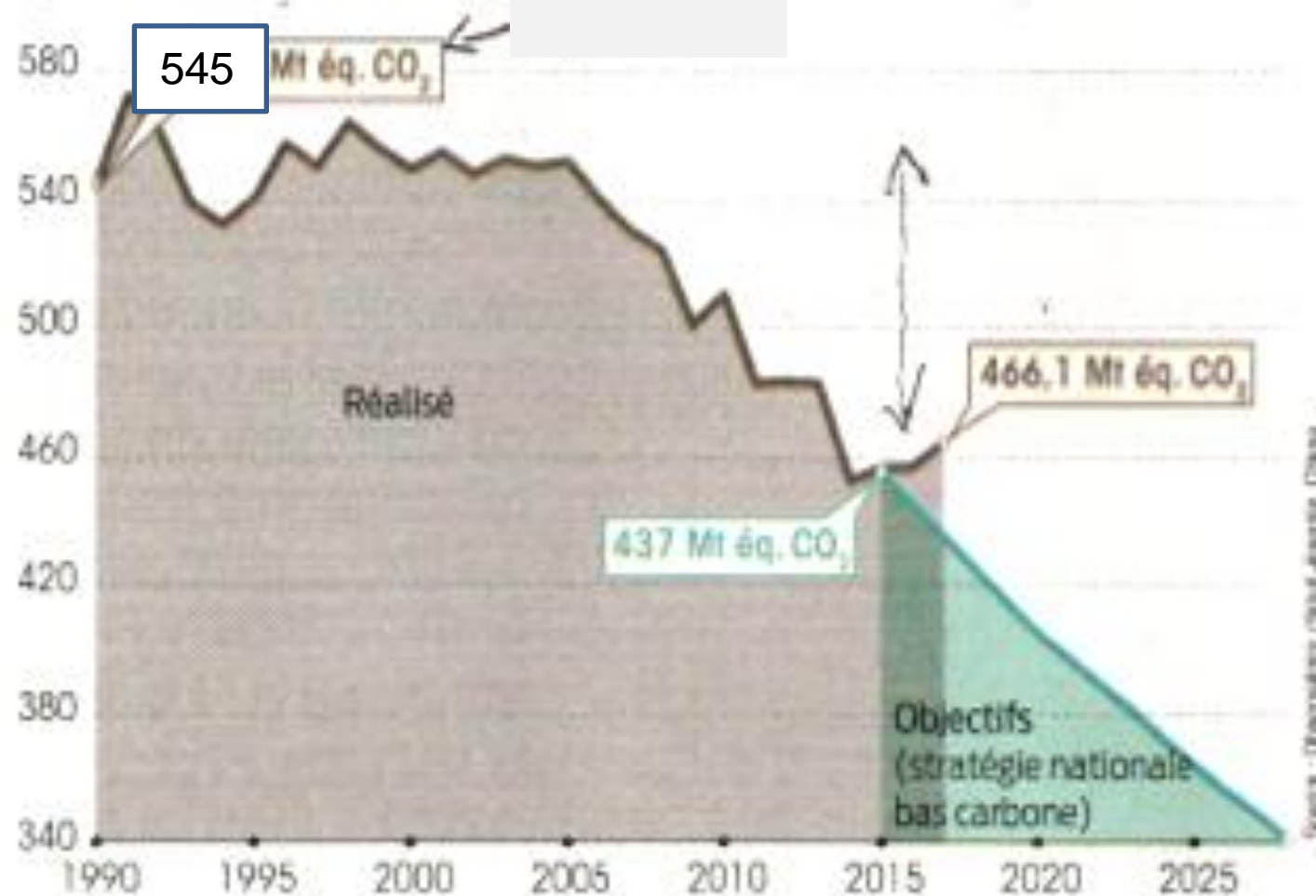
GES selon les continents

- **CHINE** 28 %
- **USA** 15 %
- **ASIE** 12,3 % (hors Chine)
- **AMERIQUE SUD** 5,0 %
- **AFRIQUE** 3,6 %
- **UE-28** 9,9 %
- **FRANCE** 1,38 %

Évolution des GES (France)

GAZ À EFFET DE SERRE : LA FRANCE DÉRAPE

Emissions de gaz à effet de serre en France, en millions de tonnes équivalent CO₂



Source : Observatoire climat-énergie, Citepa

Prix moyen du KWh électrique (centime d'€)

(FRANCE 2016) *source: Alternatives économiques, 2017*

Géothermie électrique	4,8
Éolien terrestre ancien	7,6
Éolien terrestre nouveau	6,8
Éolien en mer	17,4
Centrale photovoltaïque	10,5
Photovoltaïque résidentiel	25,4
Centrale thermique solaire	19,3
Nucléaire historique	6,0
EPR	11,0
Gaz	8,0

Quelle(s) caractéristique(s) retenir ?

- *KWh nécessaire (investissement + fonctionnement) par KWh produit
- *CO₂ émis (investissement + fonctionnement) par KWh produit
- *€ dépensé (investissement + fonctionnement) par KWh

Énergies primaires (Mtep)

	MONDE 2013	FRANCE 2014
CHARBON	3 901	8,8
PETROLE	4 198	77,4
GAZ	2 889	35,9
NUCLEAIRE	648	116,6
ENERGIES RENOUV.	513	18,0
TOTAL	18 500	257
Source :	AIE,2015	Wikipédia

Le charbon

- **La source fossile la plus riche en carbone**
- **Première source primaire pour l'électricité**
- **Peu transportable. Donc utilisée sur place**
- **Produit beaucoup de déchets : CO² , cendres**
- **Produits toxiques : micro-particules, soufre**
- **La source la + dangereuse : mines**
- **Rendement 35 à 45 % pour l'électricité**

Électricité production mondiale (TWh) 2013

CHARBON	9 632	
PÉTROLE	1 026	
GAZ	5 062	
NUCLÉAIRE	2 472	
HYDRO	3 801	
Autres	1 329	
TOTAL	23 322	France 530

Source A.I.E.

Pétrole

- Majoritairement consacré aux transports
- Utilisé aussi dans l'industrie chimique (plastiques)
- Réserves mondiales limitées

Gaz

- **excellent vecteur d'énergie, après l'électricité**
- **utilisé pour le chauffage et la production d'électricité**
- **sert à la production d'hydrogène pour l'industrie chimique**
- **pourrait servir aux transports**

Nucléaire (avantages)

- **disponibilité (coefficient de charge élevé)**
- **énergie très concentrée 1g d'uranium = 1 tep**
- **KWh le plus décarbonné**
- **durée de vie des installations élevée**
- **l'uranium = 5 % du coût du KWh, donc fonctionnement peu onéreux**

Nucléaire (inconvenients)

- demande de **gros investissements** (3.000 à 6.000 € par KW installé)
- **délai de construction** assez long (5 à 7 ans)
- **les déchets à vie longue** :
 - = 3 % pour ceux à vie longue et activité moyenne,
 - = 0,2 % pour ceux à haute activité
- **les réserves d'uranium** ne sont pas énormes (1 siècle)
- **le nucléaire fait peur** (référence à la bombe)

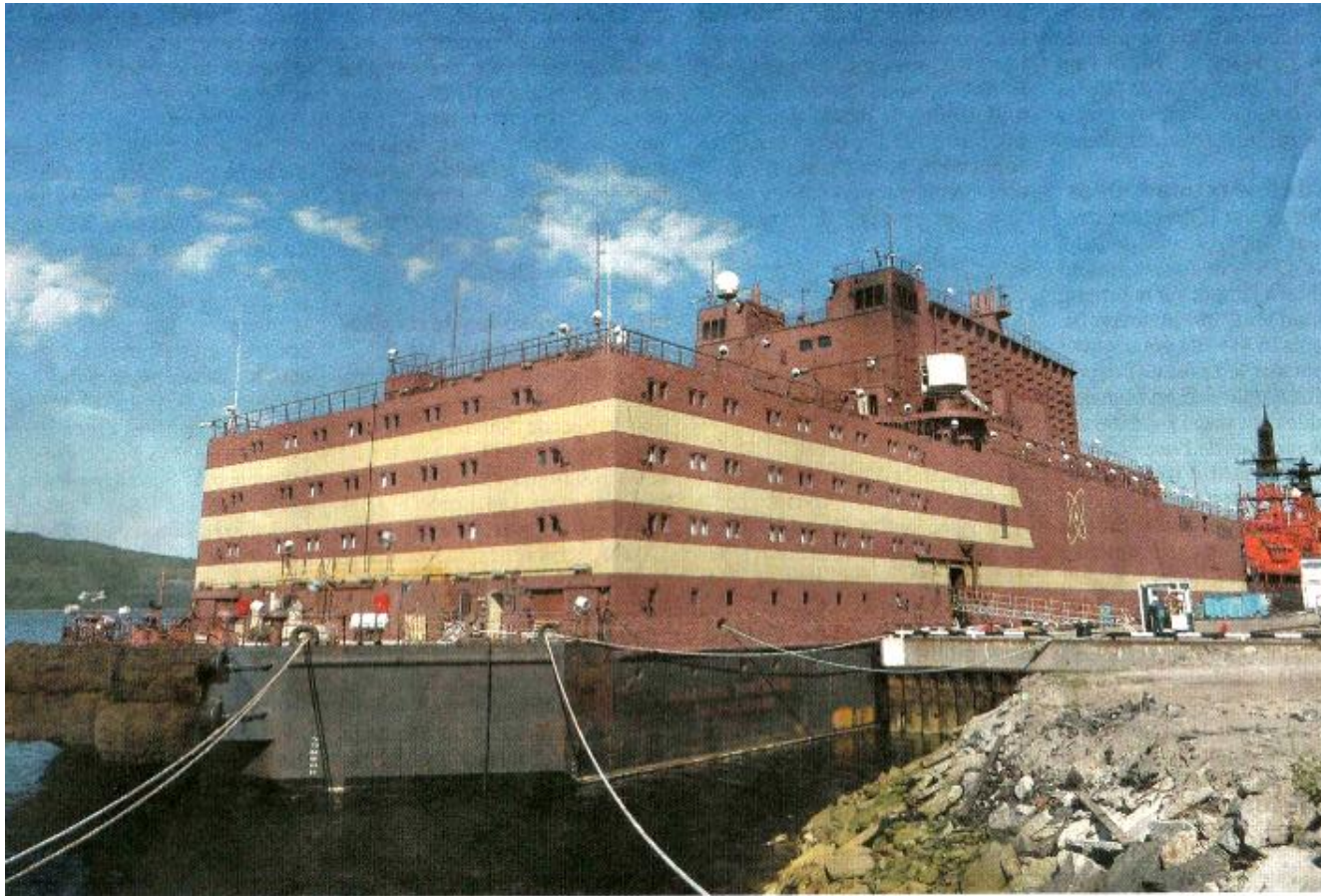
Les 10 pays au nucléaire

Part de l'électricité d'origine nucléaire	
Plus de 50 %	FRANCE, UKRAINE
De 20 à 40 %	SUEDE, COREE du SUD
De 15 à 20 %	USA, Gde BRETAGNE, RUSSIE
Moins de 15 %	CANADA, ALLEMAGNE, CHINE

Nucléaire (fin)

- **La Chine et l'Inde sont partenaires des universités américaines pour la recherche sur le nucléaire (Thorium)**
- **Certains pays envisagent de développer les petits réacteurs (35 MW) issus de la technologie des sous-marins ou porte-avions nucléaires**

Nucléaire (Rosatom)



Énergies « renouvelables »

- **Hydraulique**
- **Biomasse**
- **Éolien : terrestre, off-shore**
- **Solaire : thermique, photo-voltaïque (PV)**
- **Géothermie et aérothermie**

Hydraulique

- réponse rapide à la demande (électricité)
- énergie bon marché
- investissement lourd, modifie l'environnement
- peut servir au stockage de l'énergie (STEP)
par remontée d'eau dans les barrages.
- Inconvénients : production limitée par la
capacité du barrage et par la pluviométrie
(pluie ou neige)

Biomasse (1)

- **bois** : chauffage, production d'électricité (rendement 40% , plus si co-génération), stockage plus encombrant que le pétrole, évacuation des cendres
- **bio-carburants** : diester (huiles végétales), éthanol (céréales, sucre).
Inconvénients : rendements médiocres (en € ou en **KWh**), compétition avec l'alimentation

Biomasse (2)

Bio-méthane : par méthanisation des déchets organiques, contient du **CH₄** (70%), de l'**eau**, du **CO₂** et du **SH₂**

- * **Vecteur d'énergie, énergie stockable**
- * **Investissements lourds (4.500 à 6.000 € par kW).**
1 unité = 200 KW.
Il faut 750 méthaniseurs pour remplacer 1 réacteur
- * **Inconvénients** : transports des substrats et des déchets (compost).
- * **Utile** pour les revenus des agriculteurs, liquéfiable

Biomasse (3)

- **Méthanation**, à ne pas confondre avec méthanisation
- consiste à **produire du méthane (CH_4) à partir du CO_2 et de l'hydrogène (H_2)**
- **intérêt : créer un gaz moins léger que l'hydrogène , à stocker et à diffuser avec le gaz « naturel »**
- **inconvénient : le rendement énergétique est faible (inférieur à 30%)**

Éolien

- **éolien terrestre** : coefficient de charge entre 20 et 25 %, **production « intermittente »**, coût d'investissement modéré (1.000 à 1.500 € par KW installé)
- **éolien off shore** : coefficient de charge 30 à 35 %, « intermittent », **investissements plus lourds**
- l'éolien peut servir à **produire de l'hydrogène** par électrolyse (rendement de l'ordre de 50%).
Projets dans le ferroviaire
- **Problème : raccordement au réseau**

Solaire

- **THERMIQUE:** Chauffe-eau, excellent rendement
Centrales thermiques, gros potential. Ex: au Maroc (Noor, Atlas), 580 MW, vapeur d'eau à 400°C, stockée
- **PHOTOVOLTAÏQUE (PV):** coefficient de charge de 10 à 20%.
1 metre-carré de PV peut donner une puissance installée de 0,1 KW (France) et 110 KWh par an.
Courant continu à transformer en alternative (onduleurs).

Photo Voltaïque (exemple, 2018)

- * **30 m²** de toiture équipée de PV (ENGIE)
 - * Coût HT **6.000 €** après crédit d'impôt
 - * Puissance 3 KW, donc **2.000 € par KW**
 - * Production moyenne sur 25 ans : **3.100 KWh/an**
Baisse de puissance = 0,6% par an.
 - * **Amorti sur 15 ans.** Bénéfice sur 25 ans : 7.536 €
- Intérêt: si mise en place de tranches de tarif.***

Photo Voltaïque

exemple SONZAY 2017

Tracker solaire



Prévisions SONZAY

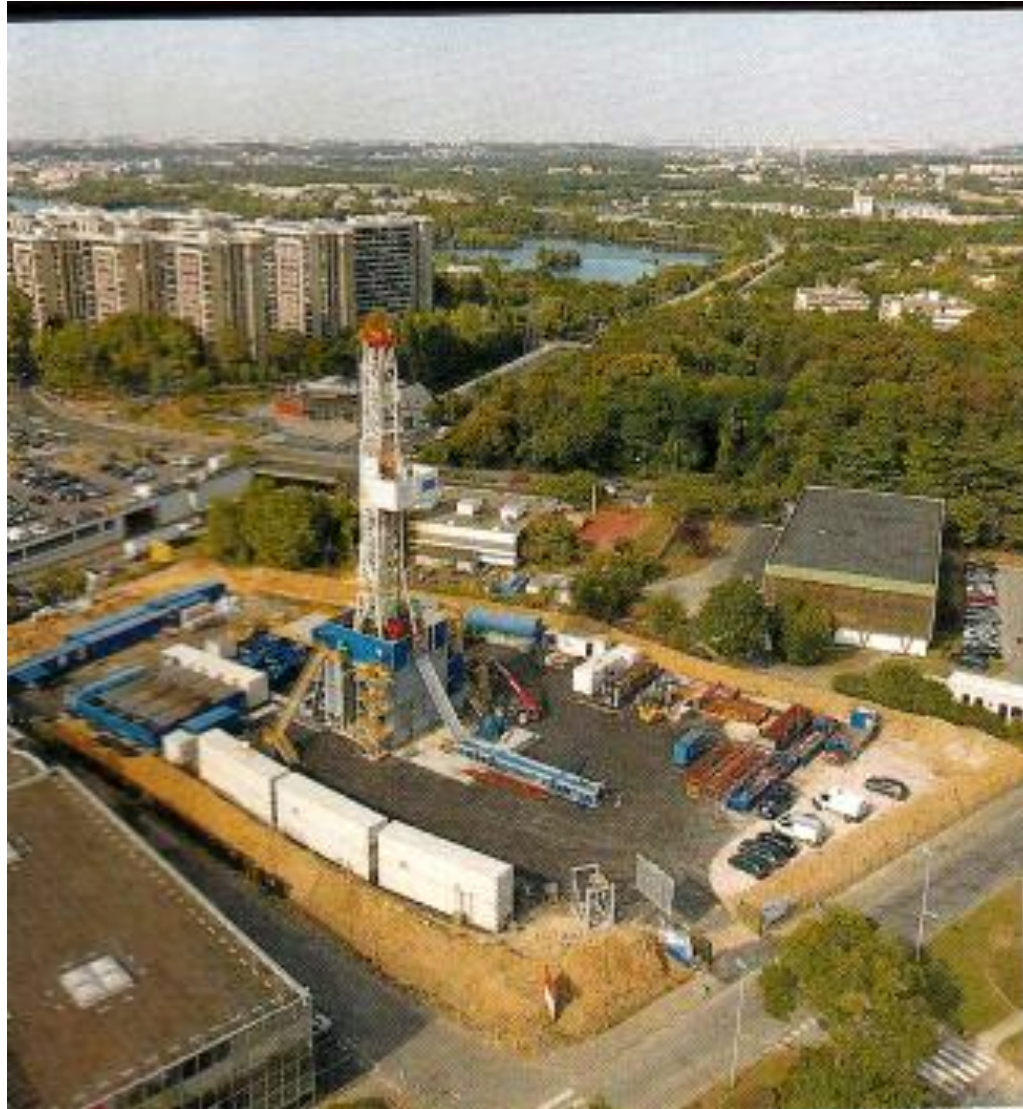
- * **Surface** : 74 m²
- * **Puissance** : 13 KW
- * **Production annuelle** annoncée : 27.200 KWh
- * **Coût HT** : 35.000 €, soit **2.700 €** par KW installé

Géothermie

- **Exemple récent** : GRIGNY-CHATILLON
Forage à 1.800 m , eau à 71°C
Chauffage de 10.000 logements HLM,
coût du KWh = **0,06 €**, en remplacement du gaz
Investissement : 29 millions €
- **Géothermie profonde** : pour chauffage urbain et
(si la température est $> 80^{\circ}\text{C}$) production électricité.
Possible en Bretagne, Massif central, Alsace,
Bassin parisien.
*Au Kénya (faille du Rift) centrale électrique de 520 MW
(eau à 250°C)*

GRIGNY-CHATILLON

(Alternatives Economiques, n°381, 2018)



Géothermie - Aérothermie

Géothermie superficielle : ou *Puits canadien*,

- * Profondeur 100 à 200 mètres.
- * Circulation d'air ou d'eau récupérant les calories du sol grâce à une pompe à chaleur (PAC).
- * Rendement d'un facteur 4 (4 KWh récupérés pour 1 KWh consommé).
- * **Avantage : réversibilité (l'été)**
- * **Inconvénient : coût du forage**

Puits canadien (exemple 1) (*chapelle Saint Martin*)



Puits canadien (exemple 2)

Salle culturelle à ROUZIERS



Aérothermie

- Aérothermie :

récupération des calories de l'air par une PAC , rendement moyen = facteur 3 à 4 (plus faible si l'air est en dessous de 0°C). **Coût = environ 500 à 700 € par KW**

Le défi de l'intermittence

Comment assurer la fourniture continue d'électricité avec des sources intermittentes ?

Cas extrême : remplacer une source thermique (réacteur nucléaire ou centrale à gaz) par des éoliennes ?

Source thermique, puissance = **1 GW** (en moyenne)

Eolienne terrestre, puissance = **2 MW**

Intermittence (suite)

- **Puissance** : il faut **500 éoliennes** pour remplacer 1 source thermique
 - **Énergie produite** : 1 MW éolien (par an) produit 3,25 fois moins de KWh qu'une source thermique
- Il faudra donc $3,25 \times 500 = 1.634$ **éoliennes** pour produire autant que la source thermique
(**6,57 TWh sur un an**)

Intermittence (suite)

Mais les **1.630 éoliennes** produisent leurs **6,57 TWh** lorsqu'il y a du vent, soit environ 23 % de l'année ;

c'est à dire que **1,251 TWh** sont tout de suite consommés (car prioritaires sur le réseau) .

Il reste donc un excédent de **5,32 TWh** à stocker.
Comment stocker de l'électricité ?

Stockage de l'énergie électrique

- **Le plus efficace** : La station de pompage réversible qui peut remonter de l'eau dans un barrage (**STEP**). **Rendement = 65 %** si on intègre le coût du pompage + celui de l'acheminement de l'électricité (venant des éoliennes ou autres sources) vers la STEP.
- **La production d'hydrogène** : par **électrolyse de l'eau**. L'électricité (en excès) des éoliennes servirait à cette électrolyse ; **rendement environ 50 %** (2 kWh d'électricité d'éoliennes pour produire 1 kWh d'hydrogène)

Stockage de l'énergie (suite)

- Avec la **STEP** il faudrait donc **680 éoliennes supplémentaires** pour assurer les pertes de rendement
- Avec **l'hydrogène** il faudrait **1.265 éoliennes supplémentaires**
- au total pour remplacer une source thermique (ex : un réacteur) il faudrait :
 - Avec la STEP **2.300** éoliennes
 - Avec l'hydrogène **2.900** éoliennes

Stockage de l'énergie (fin)

Pour remplacer 20 réacteurs nucléaires il faudrait soit 46.000 soit 57.000 éoliennes terrestres.

Pour sortir du nucléaire (tout de suite ou calmement ?) il en faudrait 3 fois plus.

Pour des raisons de clarté , ***cette simulation est une simplification.*** D'autres solutions peuvent améliorer cette perspective ; **mais ce ne sera ni simple ni « bon marché »**

Étude de l'Ademe (2014)

(*Alternatives Economiques, 2015*)

En 2014 l'ADEME a présenté son étude pour une électricité **100 % renouvelable** en 2050.

Conclusions :

- 1) **50.000 éoliennes**,
- 2) stabiliser la **production annuelle à 422 TWh**,
- 3) mettre en place **17 % de PV**,
- 4) développer les **compteurs « intelligents »**,
- 5) développer l'**hydrogène**, les **STEP**, et la **méthanation**.

Étude de l'Ademe (2014) (suite)

Projet mis sous le boisseau par la Ministre de l'écologie.

Avis de l'A.I.E. : **scénario très risqué** :
80 % de renouvelable serait + raisonnable

Projet allemand

Depuis 2006 l'Allemagne travaille sur le développement des énergies renouvelables (**projet « Kombikratdwerk-1 », puis -2**)

Problème de la stabilité du courant (tension et fréquence),
stabiliser la production à **600 TWh**,
60 % d'éolien, 20 % de PV, 10 % de biomasse
et 10 % d'hydraulique

Projet allemand (fin)

Intermittence, méthanation,
mini-expérimentation locale

Points à étudier:

- * le risque de blackout,
- * faire une évaluation économique,
- * prévoir des groupes électrogènes locaux.

Conclusions

- le premier objectif est **réduire fortement les GES**
- **Sortir au plus vite du charbon...**
- questions annexes : les métaux et les « **terres rares** »
- développer **l'approche économique**
- **la transition** n'est pas seulement française, ni européenne, **MAIS MONDIALE**
- de toute façon **ça coûtera cher (+ ou -)**

Les sources d'énergie

FIN

Merci pour votre
attention

Prix de électricité (France)

- **énergie** = 45 % , **abonnement** = 10 % ,
acheminement = 10 % , **taxes** = 20 % ,
TVA = 15 % . Taux variables selon consommation
- dans les taxes il y a la **CSPE** (Contribution Sociale au Prix de l'électricité) = 16% du prix
En **2003** : 1,5 Milliard € ,
en **2016** : 6,5 Milliards ,
en **2017** : 8 Milliards

Projet Négawatt (2017)

Énergies primaires : passer de **3.500 TWh** (en 2000) à **2.300 TWh** en 2050.

Énergies finales : passer de **2.000 TWh** (en 2.000) à **810 TWh** en 2.050.
grâce à la sobriété, l'efficacité, le transport divisé par 3, l'industrie divisée par 3

Émissions de GES : passer de **480** millions-t-équivalents CO₂ (en 2.000) à **80** M en 2050.

Mes sources

- *jancovici.com*
- *electricitymap.org*
- *carbon4.com*
- *fr.statista.com/statistiques*
- *insee.fr/fr/statistiques*
- *rte-France.com*
- *connaissancesdesenergies.org*

Mes sources (fin)

- « *Pourquoi le nucléaire* », Bertrand Barré, 2017, Editions DeBoeck
- « *Dormez tranquilles jusqu'en 2100* », Jean Marc Jancovici, 2015, Editions Odile Jacob
- Alternatives économiques

