



SOURCES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Chapitre n°1.

L'énergie dans le monde moderne

Plan du chapitre

1. Introduction
2. L'énergie en général
3. Production d'énergie électrique

1. Introduction

1. Introduction

1.1. Qu'est-ce-que l'énergie ?

- a. Définition
- b. Unités de l'énergie
- c. Préfixes des unités du système international
- d. Conservation et conversion de l'énergie

1.2. Qu'est-ce-que la puissance ?

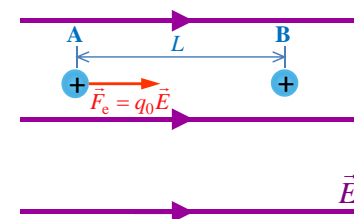
Résumons

1.1. Qu'est-ce-que l'énergie ?

a. Définition

Énergie = capacité d'un système à effectuer un travail

Symboles utilisés dans ce cours pour représenter l'énergie : W , \mathcal{E}



La charge $q_0 > 0$ se déplace d'une distance $L = AB$ sous l'effet de la force électrique \vec{F}_e .

$$W_{A \rightarrow B} = \int_A^B \vec{F}_e \cdot d\vec{\ell} = \int_A^B q_0 \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = \Delta \mathcal{E}_c \quad (\text{Théorème de l'énergie cinétique})$$

✓ Force électrique : force conservative

➡ Conservation de l'énergie mécanique : $\Delta \mathcal{E}_m - \Delta \mathcal{E}_c + \Delta \mathcal{E}_p = 0 \Rightarrow \Delta \mathcal{E}_c = -\Delta \mathcal{E}_p$

✓ D'où : $W_{A \rightarrow B} = -\Delta \mathcal{E}_p \Rightarrow \Delta \mathcal{E}_p = -\int_A^B q_0 \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$

1.1.b. Unités de l'énergie

Énergie = capacité d'un système à effectuer un travail

Unité du système international (USI) : joule (J)

- ✓ Mécanique : joule (J)
- ✓ Thermique : calorie (cal), *British Thermal Unit* (BTU)
 - 1 cal = 4,184 J
 - 1 BTU = 1055 J
- ✓ Nutrition : grande calorie (Cal) : 1 Cal = 1 kcal = 4184 J
- ✓ Électricité : watt-heure (Wh) : 1 Wh = 3600 J => 1 kWh = 3,6 MJ
- ✓ Industrie, économie : tonne d'équivalent pétrole (tep, toe en anglais) :
1 tep = 11630 kWh = 41,868 GJ ≈ 42 GJ

1.1.c. Préfixes du système international d'unités

10^n	Préfixe	Symbole	10^n	Préfixe	Symbole
10^{24}	yotta	Y	10^0	(aucun)	—
10^{21}	zetta	Z	10^{-1}	déci	d
10^{18}	exa	E	10^{-2}	centi	c
10^{15}	péta	P	10^{-3}	milli	m
10^{12}	téra	T	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^6	méga	M	10^{-12}	pico	p
10^3	kilo	k	10^{-15}	femto	f
10^2	hecto	h	10^{-18}	atto	a
10^1	déca	da	10^{-21}	zepto	z
10^0	(aucun)	—	10^{-24}	yocto	y

Source : Wikipédia

1.1.d. Conservation et conversion de l'énergie

Le bilan énergétique reste toujours exactement équilibré, même si l'énergie change de forme au cours du temps.

L'énergie peut se convertir.

Par exemple, dans une centrale nucléaire :

Énergie thermique (énergie **primaire** = énergie avant transformation, extraite de la fission des atomes d'uranium = énergie **absorbée**)

➔ Énergie mécanique

➔ Énergie électrique (énergie **finale ou utile**)

Le bilan global de cette conversion est caractérisée par un **rendement**.

$$\text{rendement} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie absorbée}}$$

1.2. Qu'est-ce que la puissance ?

Puissance = capacité d'un système à fournir un travail en un temps donné

Symboles utilisés dans ce cours pour représenter la puissance : P , \mathcal{P} , F

$$\text{puissance} = \frac{\text{énergie}}{\text{temps}}$$

Unité du système international (USI) : watt (W), 1 W = 1 J / s

- ✓ Autre unité : cheval-vapeur (cv) : 1 cv = 736 W

Attention ! Ne pas confondre énergie et puissance, ni leurs symboles avec leurs unités.

Plan du chapitre

2. L'énergie en général

2.1. Sources d'énergie primaire

- Classification
- Production mondiale par ressources en 2016
- Production mondiale par pays en 2016
- Extraction des ressources fossiles (Pétrole, charbon, gaz naturel, uranium)

2.2. Enjeux de l'énergie

2.1. Sources d'énergie primaire

a. Classification

Énergie primaire = énergie avant transformation

Énergies fossiles :

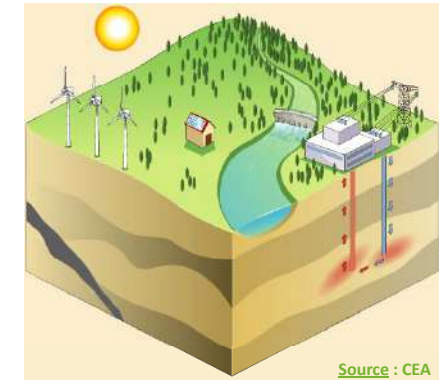
charbon, gaz, pétrole, uranium
Non renouvelables ☹️ épuisables



Source : CEA

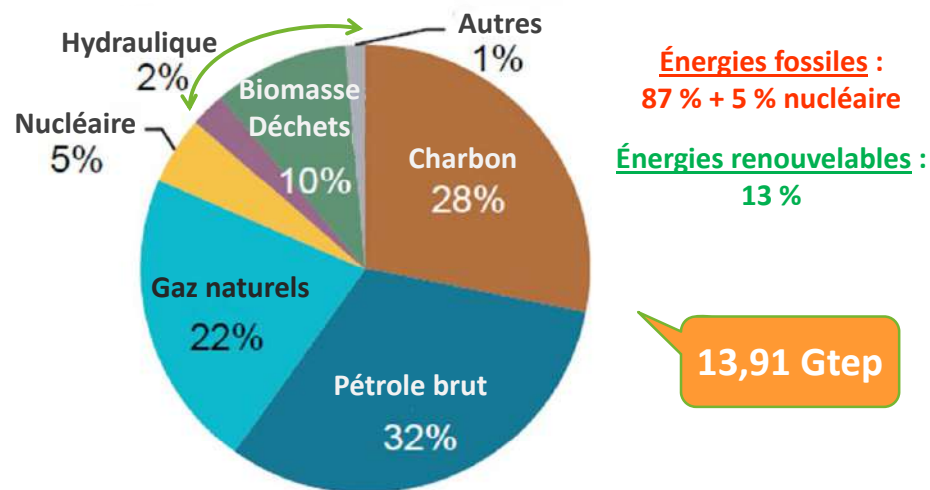
Énergies renouvelables :

solaire, hydraulique, éolien,
géothermie, biomasse, marées



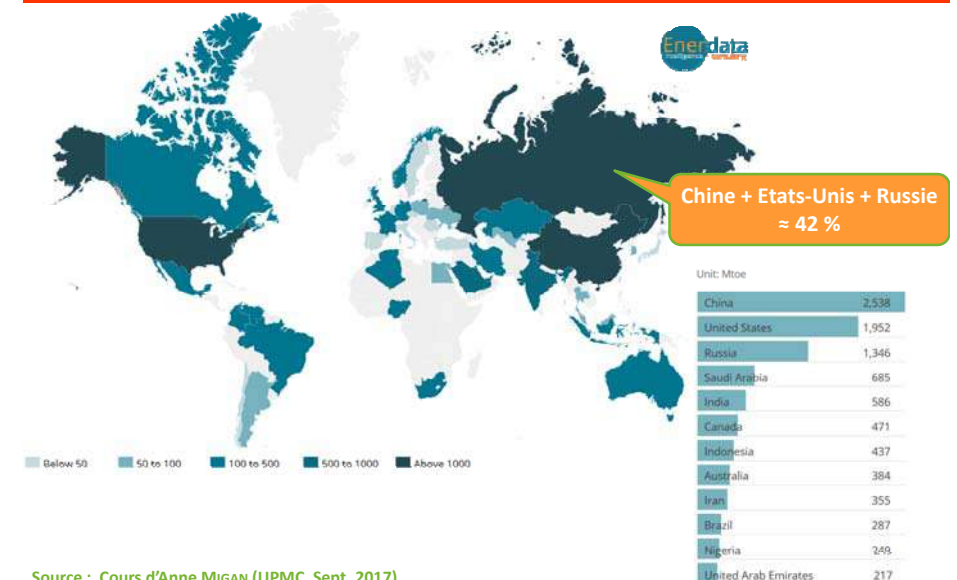
Source : CEA

2.1.b. Production mondiale par ressources en 2016



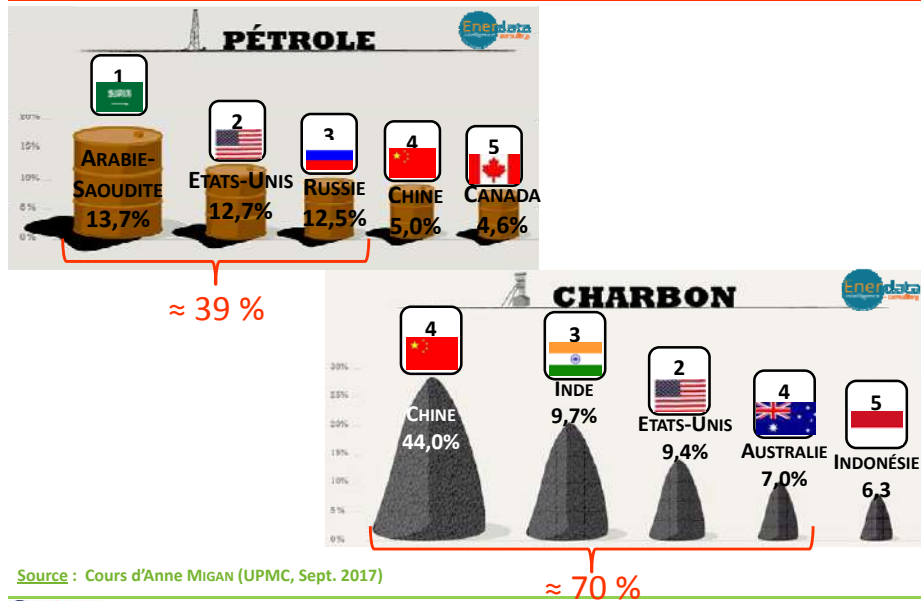
Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

2.1.c. Production mondiale par pays en 2016

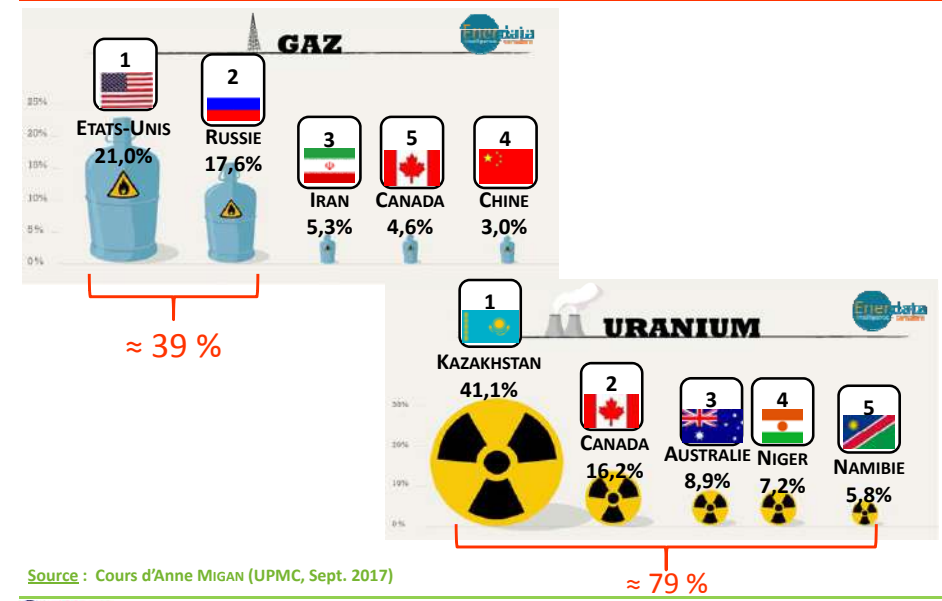


Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

2.1.d. Extraction des ressources fossiles (1)



2.1.d. Extraction des ressources fossiles (2)



Plan du chapitre

3. La production d'énergie électrique

3.1. Production d'électricité

- a. Dans le monde
- b. En France

3.2. Énergie fossile : centrales nucléaires REP

- a. Principe
- b. Le nucléaire en France
- c. Exemples
- d. Avantages et inconvénients

3.3. Énergie fossile : centrales thermiques

- a. Centrales thermiques classiques
- b. Centrales thermiques à cycle combiné
- c. Le thermique en France

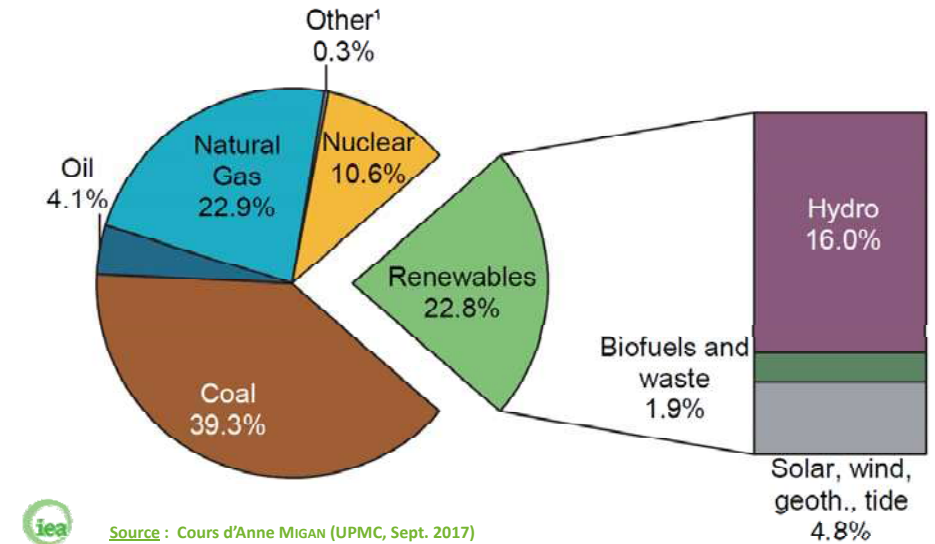
3.4. Énergie renouvelable : centrales hydrauliques

- a. Introduction : les énergie renouvelables en France
- b. L'hydroélectricité dans le monde et en France
- c. Exemples
- d. Avantages et inconvénients
- e. Préparation à l'étude du dimensionnement d'une petite centrale hydraulique



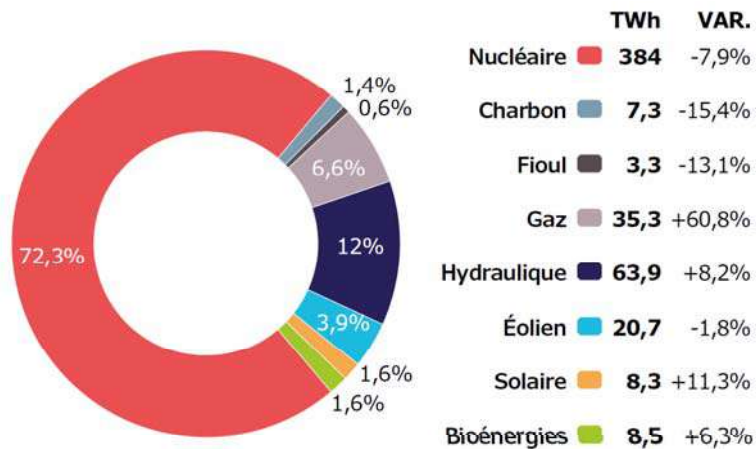
3.1. Production d'électricité

a. dans le monde (2015)



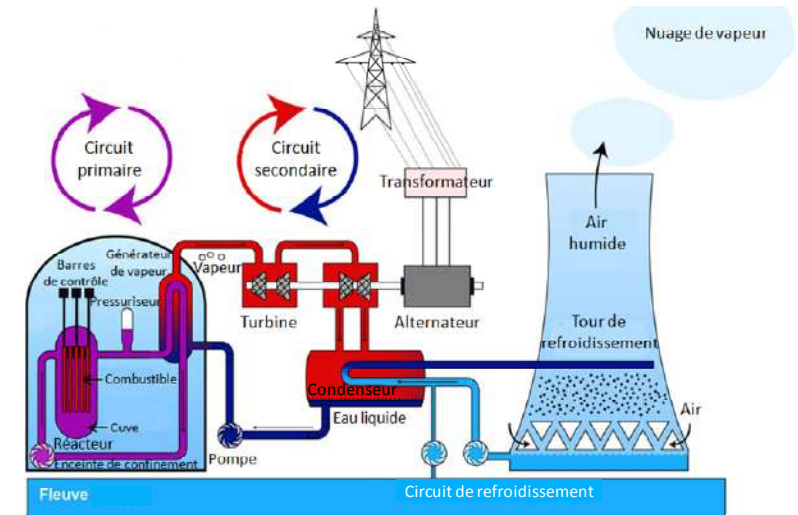
3.1.b. Production d'électricité en France (2016)

Énergie produite : 531,3 TWh
(-2,8% par rapport à 2015)



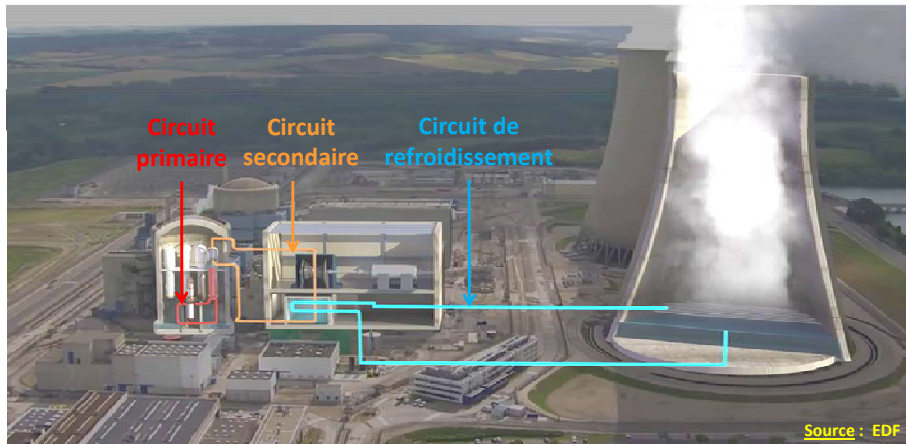
3.2. Sources d'énergie fossile

Centrale nucléaire : filière à eau sous pression (REP)



3.2.a. Centrales nucléaires REP – Principe (1)

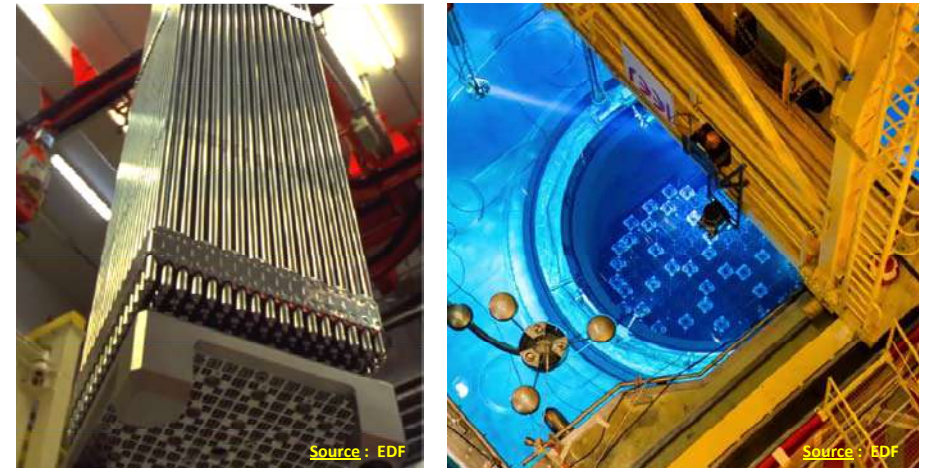
Une centrale nucléaire produit de l'électricité grâce à la chaleur dégagée lors de la fission des atomes d'uranium. La centrale fonctionne avec trois circuits d'eau totalement indépendants : le circuit **primaire**, le circuit **secondaire** et le circuit de **refroidissement**.



Source : EDF

3.2.a. Centrales nucléaires REP – Principe (2)

Le combustible est conditionné sous forme de petites pastilles d'uranium empilées dans de long tubes métalliques (**crayons**). Ces tubes sont placés dans une **cuve en acier remplie d'eau** et constituent ainsi le cœur du réacteur.



Source : EDF

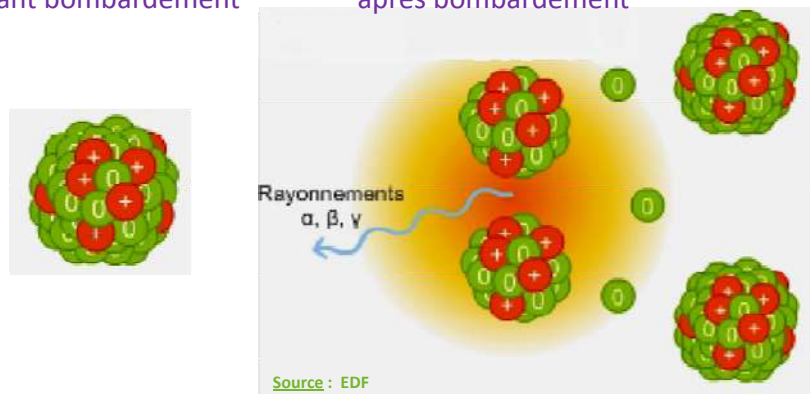
Source : EDF

3.2.a. Centrales nucléaires REP – Principe (3)

Un neutron bombarde un noyau d'uranium.
Le noyau se casse en libérant de l'énergie, des rayonnements et deux neutrons.
Les neutrons bombardent ainsi d'autres noyaux.

Noyau d'uranium
avant bombardement

Noyau d'uranium
après bombardement

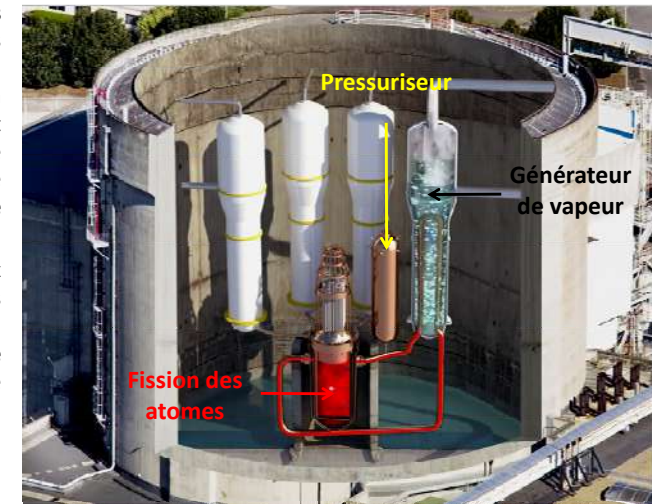


Source : EDF

3.2.a. Centrales nucléaires REP – Principe (4)

Sous l'effet de la **fission des atomes d'uranium**, les tubes chauffent l'eau à 320°C. Mise sous pression pour la maintenir à l'état liquide (**pressuriseur**), cette eau est ensuite dirigée jusqu'au **générateur de vapeur**.

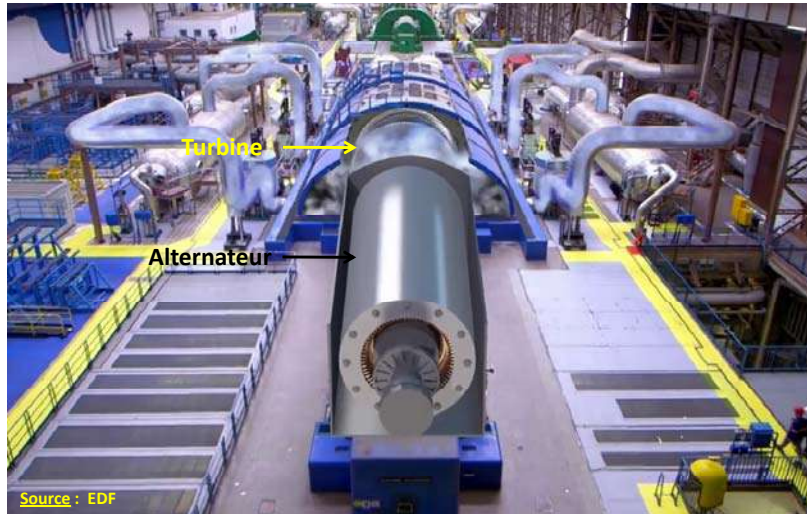
Au contact des tuyaux parcourus par l'eau très chaude du circuit primaire, l'eau du circuit **secondaire** s'échauffe à son tour, et se transforme en vapeur.



Source : EDF

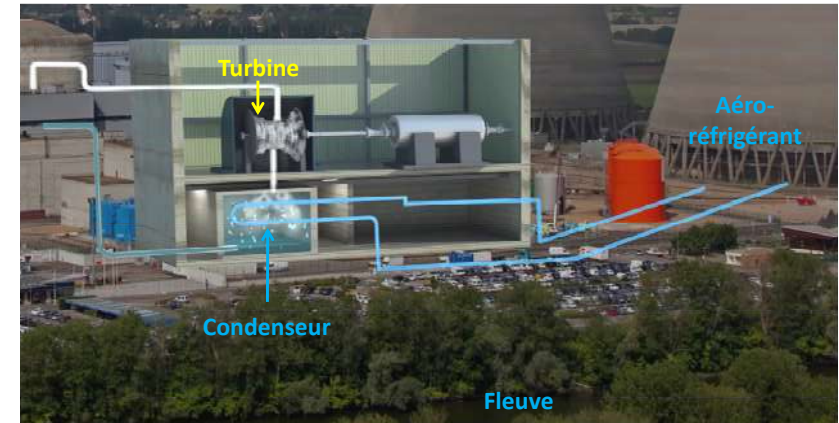
3.2.a. Centrales nucléaires REP – Principe (5)

La vapeur ainsi produite fait tourner une **turbine**, qui à son tour entraine un **alternateur**.



3.2.a. Centrales nucléaires REP – Principe (6)

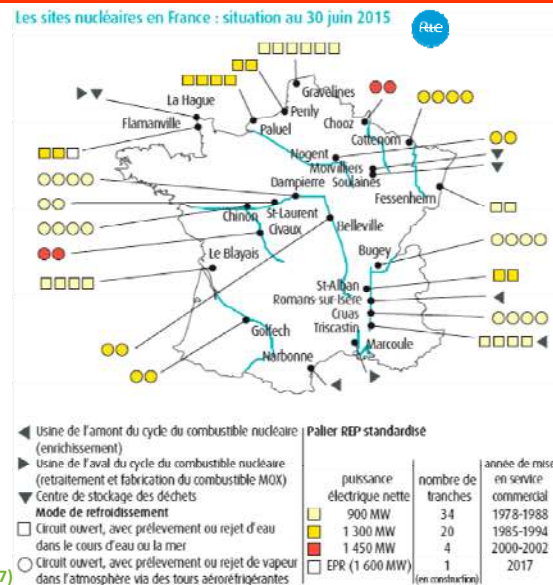
En sortant de la turbine, la vapeur est retransformée en eau grâce au **circuit de refroidissement** pour être renvoyée vers le **générateur de vapeur** pour un nouveau cycle. Cette vapeur passe pour cela dans un **condenseur**, alimenté par de l'eau froide prélevée dans la **mer** ou le **fleuve**, soit par de l'eau refroidie par les courants d'air qui circulent dans de grandes tours (**aéro-réfrigérants**).



3.2.b. Le nucléaire en France

- ✓ 58 réacteurs
- ✓ 1100 sites renfermant des déchets nucléaires.

USA / France / Japon :
55 % de la capacité nucléaire mondiale



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

3.2.c. Illustrations de centrales REP en France

Exemple 1

La centrale nucléaire de Saint Alban du Rhône (Isère – 50 km de Lyon)



- ✓ Mise en service en **1986**
- ✓ 2 réacteurs de **1300 MW**
- ✓ Facteur de charge de **68 %** en 2014

Production moyenne annuelle : **18 TWh**
(30 % de besoins de la région Rhône-Alpes en 2016)

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

3.2.c. Illustrations de centrales REP en France

Exemple 2

La centrale nucléaire de Fessenheim (Alsace – 100 km de Strasbourg)



- ✓ Mise en service en **1977**
- ✓ 2 réacteurs de **900 MW**

Production moyenne annuelle : **8,5 TWh**
(1,5 % de la production électrique d'origine nucléaire française en 2016)

Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

3.2.c. Illustrations de centrales REP en France

Exemple 3

La centrale nucléaire de Gravelines (Nord – 20 km de Dunkerque)



- ✓ Mise en service en **1980**
- ✓ 6 réacteurs de **900 MW**
- ✓ **5^{ème}** centrale plus puissante au monde

Production moyenne annuelle : **38 TWh**
(6,7 % de la production électrique d'origine nucléaire française en 2016)

Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

3.2.d. Centrales nucléaires : avantages & inconvénients

Avantages

Durée de vie (50 ans)
Pas d'effet de serre
Pas contaminatrice
Ressources abondantes
Combustible bon marché
Stabilité de la distribution électrique
Puissance très élevée (1000 MW)

Inconvénients

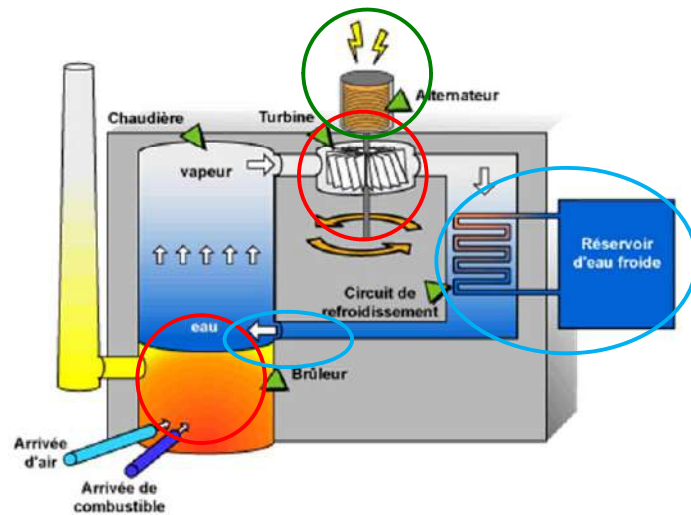
Investissement initial
Durée de construction (10 ans)
Etranglement de la production (cuves)
Prolifération nucléaire ou terrorisme
Déchets nucléaires
Possibilités d'accidents
Pas renouvelable

Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

3.3. Sources d'énergie fossile : Centrales thermiques



3.3.a. Centrales thermiques classiques (à flamme)



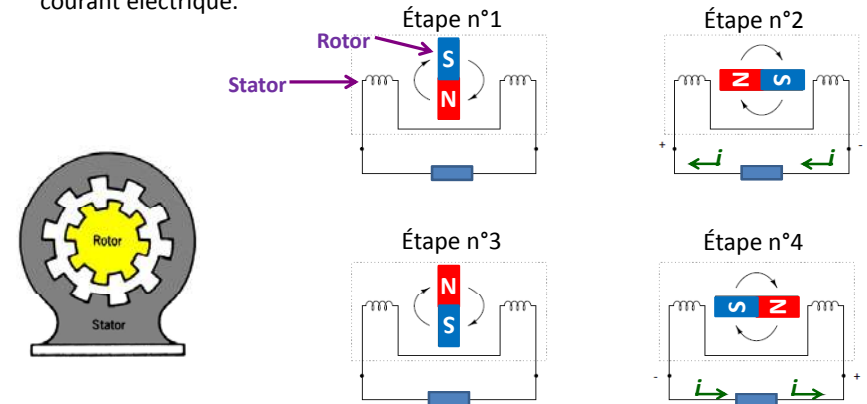
Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

3.3.a. Centrales thermiques classiques : alternateur

La vapeur d'eau sous pression fait tourner une turbine.

La turbine fait tourner l'axe de l'**alternateur (rotor + stator)** : sur cet axe est fixé le rotor (**aimant mobile**).

L'interaction entre le rotor et le stator (**bobines de fils de cuivre fixes**) crée le courant électrique.



3.3.a. Centrales thermiques classiques – Illustrations (1)

Exemple 1

La centrale Émile Huchet (Saint-Avold, Moselle)



- ✓ Mise en service en **1948**
- ✓ Combustibles : **charbon** et **gaz naturel**

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

3.3.a. Centrales thermiques classiques – Illustrations (2)

Exemple 2

La centrale de Porcheville (Yvelines – 50 km de Paris)



- ✓ 4 unités de **600 MW**
- ✓ Combustible : **fioul**
- ✓ Arrêt définitif en **2017**

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

3.3.a. Centrales thermiques classiques – Avantages & inconvénients

Avantages

Réserves abondantes (250 ans)
Combustible bon marché
Stabilité de la distribution électrique
Puissance très élevée (1000 MW)

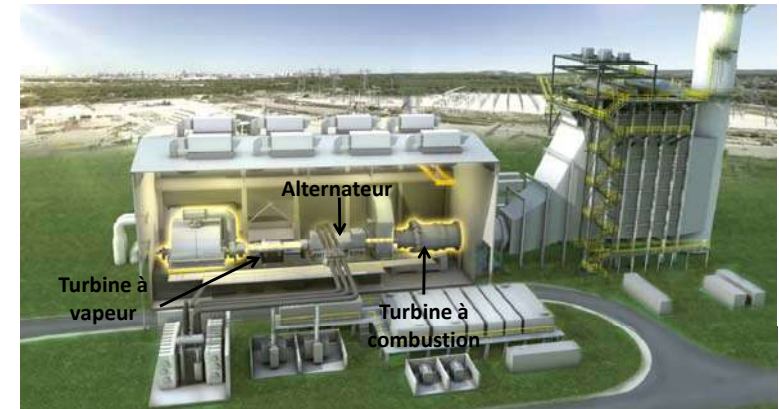
Inconvénients

Gaz à effet de serre (CO ₂)
Très contaminatrice (SO ₂ , NO ₂)
Pas renouvelable

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

3.3.b. Centrales thermiques à cycle combiné gaz – Principe (1)

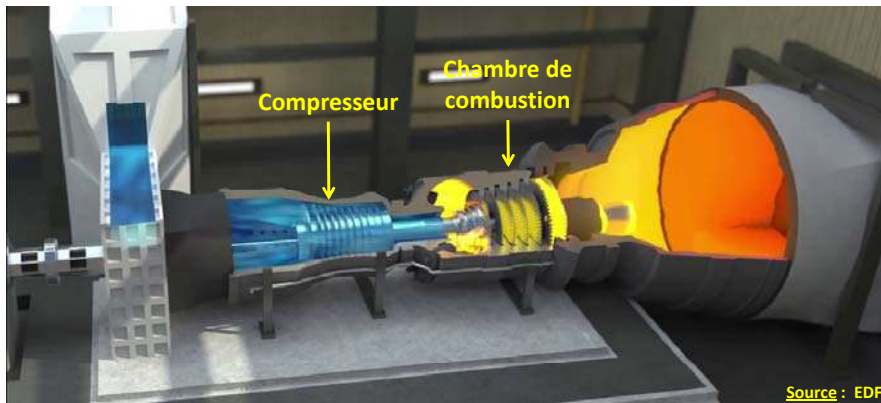
Ce type de centrale combine deux types de turbine : une **turbine à combustion** et une **turbine à vapeur**, toutes deux reliées à un **alternateur**, ce qui permet de produire une quantité plus importante d'électricité.



Source : EDF

3.3.b. Centrales thermiques à cycle combiné gaz – Principe (2)

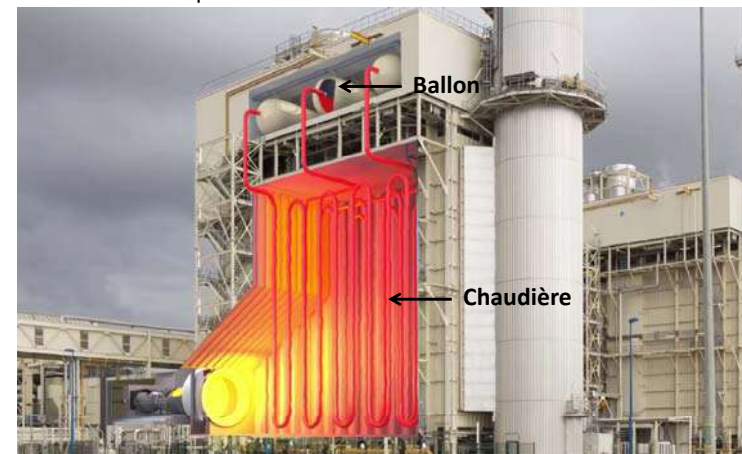
Dans la **turbine à combustion**, de l'air est injecté dans un **compresseur** à haute pression. L'air ainsi comprimé est ensuite propulsé dans la **chambre de combustion** où il se mélange au combustible. Le mélange air-gaz s'enflamme et produit des gaz d'échappement qui activent la rotation de la turbine à combustion, qui fait elle-même tourner l'alternateur.



Source : EDF

3.3.b. Centrales thermiques à cycle combiné gaz – Principe (3)

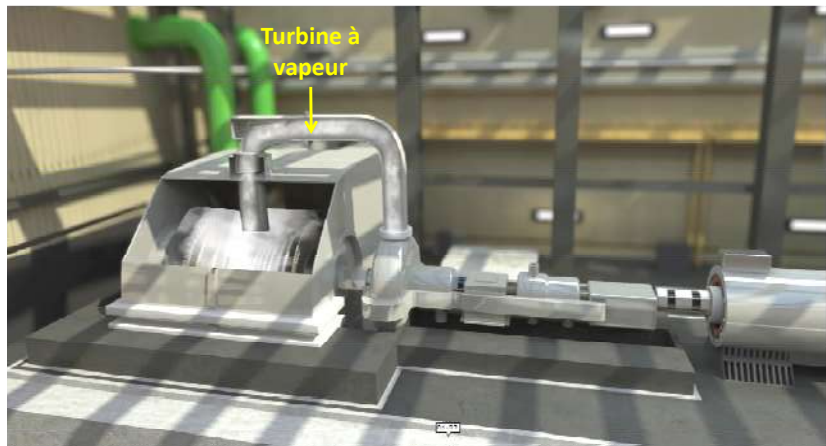
La chaleur des gaz qui sortent de la turbine à combustion est ensuite récupérée dans une **chaudière tapissée de tubes** dans lesquels circule de l'eau. L'eau ainsi chauffée est dirigée vers un **ballon** dans lequel elle se transforme en vapeur.



Source : EDF

3.3.b. Centrales thermiques à cycle combiné gaz – Principe (4)

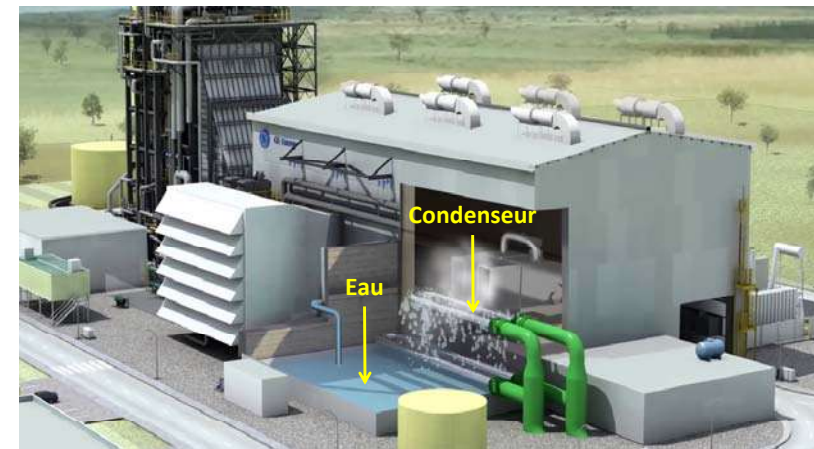
La vapeur est alors envoyée vers la **turbine à vapeur** et la fait tourner. L'énergie produite par la rotation de cette deuxième turbine est transmise à l'**alternateur** et s'ajoute à celle déjà transmise par la turbine à combustion.



Source : EDF

3.3.b. Centrales thermiques à cycle combiné gaz – Principe (5)

La vapeur qui est sortie de la turbine passe enfin dans un **condenseur** où circule de l'eau froide. Elle est ainsi retransformée en eau pour être renvoyée dans la **chaudière**.



Source : EDF

3.3.b. Centrales thermiques à cycle combiné gaz – Principe (6)

Les fumées issues de la combustion sont filtrées avant d'être évacuées par les **cheminées**. L'utilisation du gaz naturel comme combustible permet de diviser par deux les émissions de CO₂ par rapport à une centrale au charbon.

Flexibles et réactives, les centrales à cycle combiné gaz ont un rendement supérieur à celui des centrales classiques. Capables de monter en pleine puissance en moins d'une heure, elles répondent aux fortes variations de consommation (périodes de pointe).



Source : EDF

3.3.b. Centrales thermiques à cycle combiné gaz – Illustration

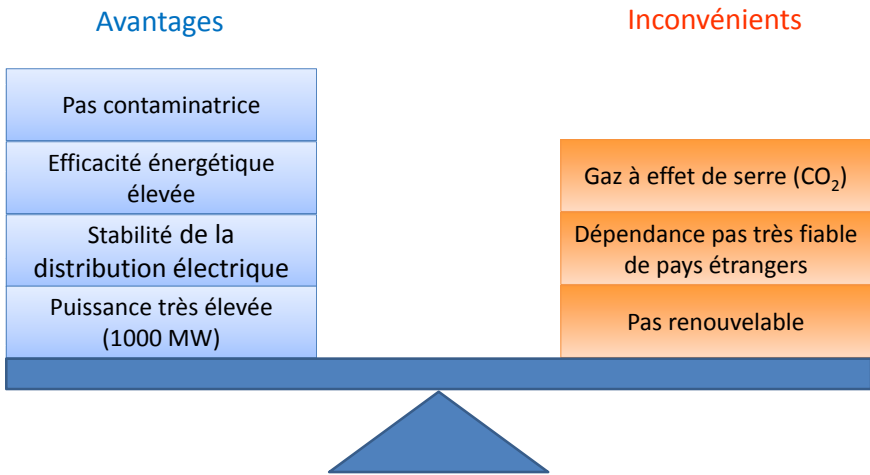
Exemple : La centrale de Bouchain (Nord)



- ✓ Mise en service en **2016**
- ✓ La plus performante du monde (**62,2 %** de rendement – **605 MW**)

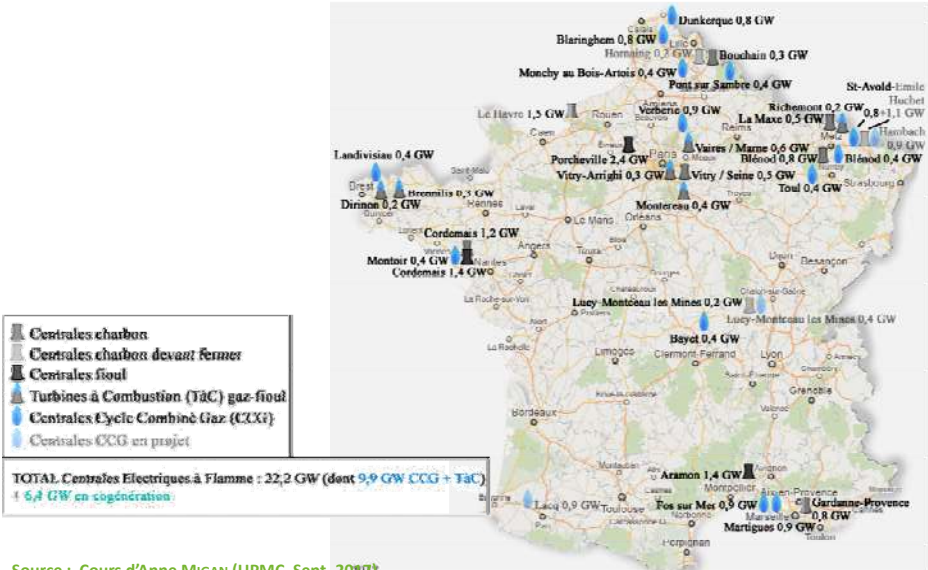
Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

3.3.b. Centrales thermiques à cycle combiné gaz – Avantages & inconvénients



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

3.3.c. Le thermique en France (2013)



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

Résumons

	Avantages	Inconvénients	Production de 1 GW pendant 1 an
Charbon	- Réserves assez importantes	- Transport peu envisageable sur de grandes distances - Pollution atmosphérique - Rejets de CO ₂	2,6 Mt de charbon
Pétrole	- Transportable	- Réserves limitées et localisées - Pollution atmosphérique - Rejets de CO ₂	1,8 Mt de pétrole
Gaz	- Transportable - Production de CO ₂ plus faible	- Réserves limitées et localisées - 10 fois plus nocifs, à l'état brut, que le CO ₂ vis-à-vis de l'effet de serre	1,65 Mt de gaz liquéfié
Nucléaire	- Pas de rejet de gaz à effet de serre - Adaptée à la production grande échelle	- Gestion des déchets sur de longues périodes - Pas de sûreté passive	25 tonnes d'uranium enrichi à 4 %

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

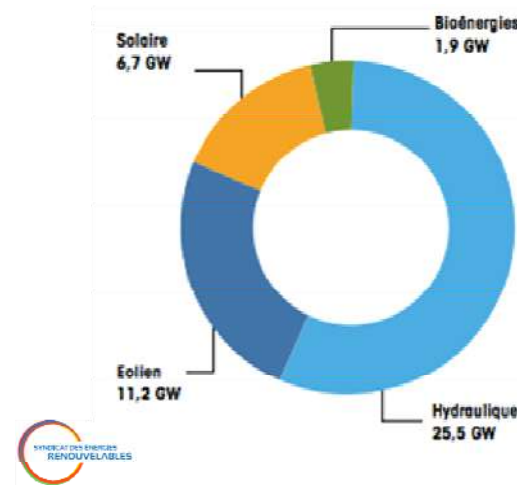
3.4. Sources d'énergie renouvelable : Centrales hydrauliques



Source : EDF

3.4.a. Les énergies renouvelables en France

Parc des énergies renouvelables en 2016

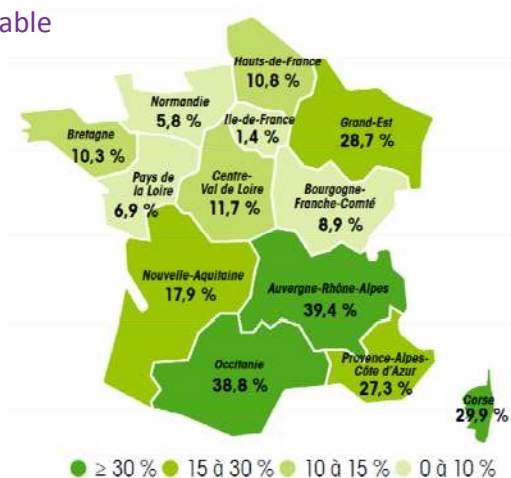


95 TWh d'électricité
d'origine renouvelable
20,1 % de la consommation
française

Source : Syndicat des énergies renouvelables

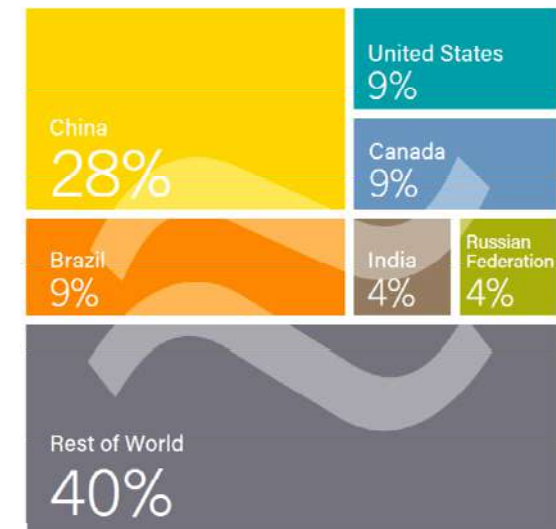
3.4.a. Les énergies renouvelables en France

Couverture de la consommation
par la production renouvelable
(Mars 2017)



Source : Syndicat des énergies renouvelables

3.4.b. L'hydroélectricité dans le monde

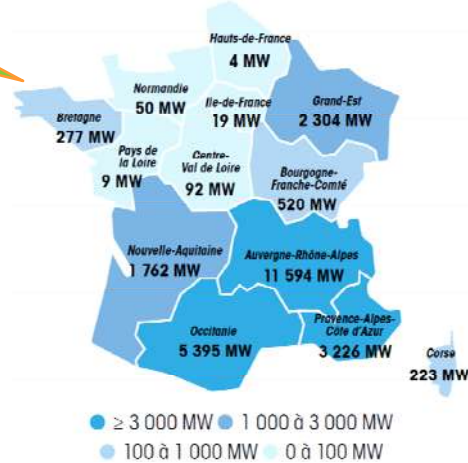


Source : REN21

3.4.b. L'hydroélectricité en France

2 000 centrales (25,48 GW)
56 TWh produits en 2016
11,6 % de la production 2016

Puissance hydraulique raccordée par région au 31 mars 2017



Source : Syndicat des énergies renouvelables



3.4.c. Illustrations de centrales hydrauliques

Exemple 1 : Le barrage des trois gorges (Chine)



- ✓ Le plus **grand** barrage hydraulique au monde.
- ✓ Longueur = 2 335 m ; hauteur = 185 m ; type poids
- ✓ Le plus **grand** générateur d'électricité au monde.
- ✓ **22 500 MW**

Production moyenne annuelle : **92 TWh**

Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

3.4.c. Illustrations de centrales hydrauliques

Exemple 2 : Le barrage de Grand'Maison (Isère)



- ✓ Le plus **important** barrage français, de type STEP.

Production moyenne annuelle : **1,4 TWh**

✓ **1800 MW**

3.4.d. Centrales hydrauliques – Avantages & inconvénients

Avantages

- Stocks pour l'irrigation
- Maîtrise des crues
- Pas d'effet de serre
- Pas contaminatrice
- Renouvelable
- Stabilité de la distribution électrique
- Puissance très élevée (1000 MW)

Inconvénients

- Conditions hydrologiques, géologiques...
- Possibilités d'accidents
- Terrains inondés

Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)