

Université Joseph Fourier, Grenoble – 2015/2016
L2 S3 PHY236 et GEL23b – option Énergétique

Johann Collot – collot@in2p3.fr

Monique Giroud – monique.giroud@ujf-grenoble.fr

Stéphane Grenier – stephane.grenier@grenoble.cnrs.fr

Hervé Guillou – herve.guillou@ujf-grenoble.fr

Guillaume Laurent – guillaume.laurent@lpsc.in2p3.fr

I. Énergie : Conversion, Transport et Stockage

2. Remarques préliminaires

L'énergie n'a d'intérêt pour nos sociétés que si l'on peut l'utiliser aisément. Elle doit être malléable : convertible, transportable et le cas échéant, elle doit pouvoir être stockée.

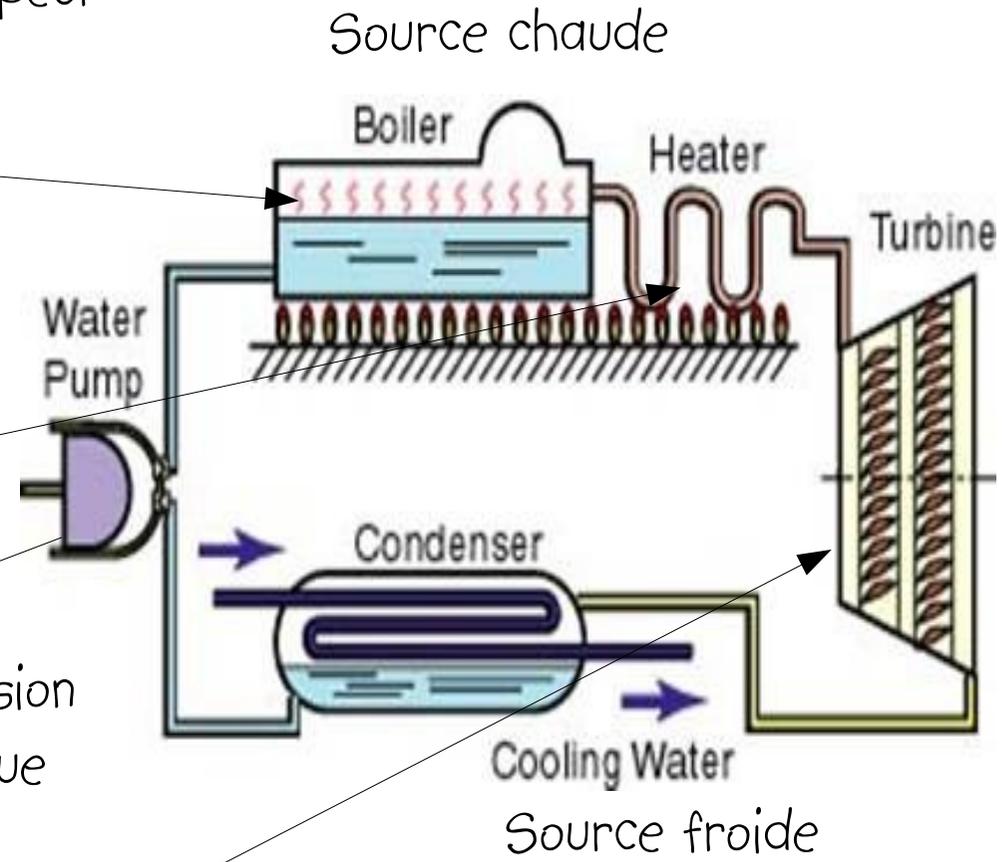
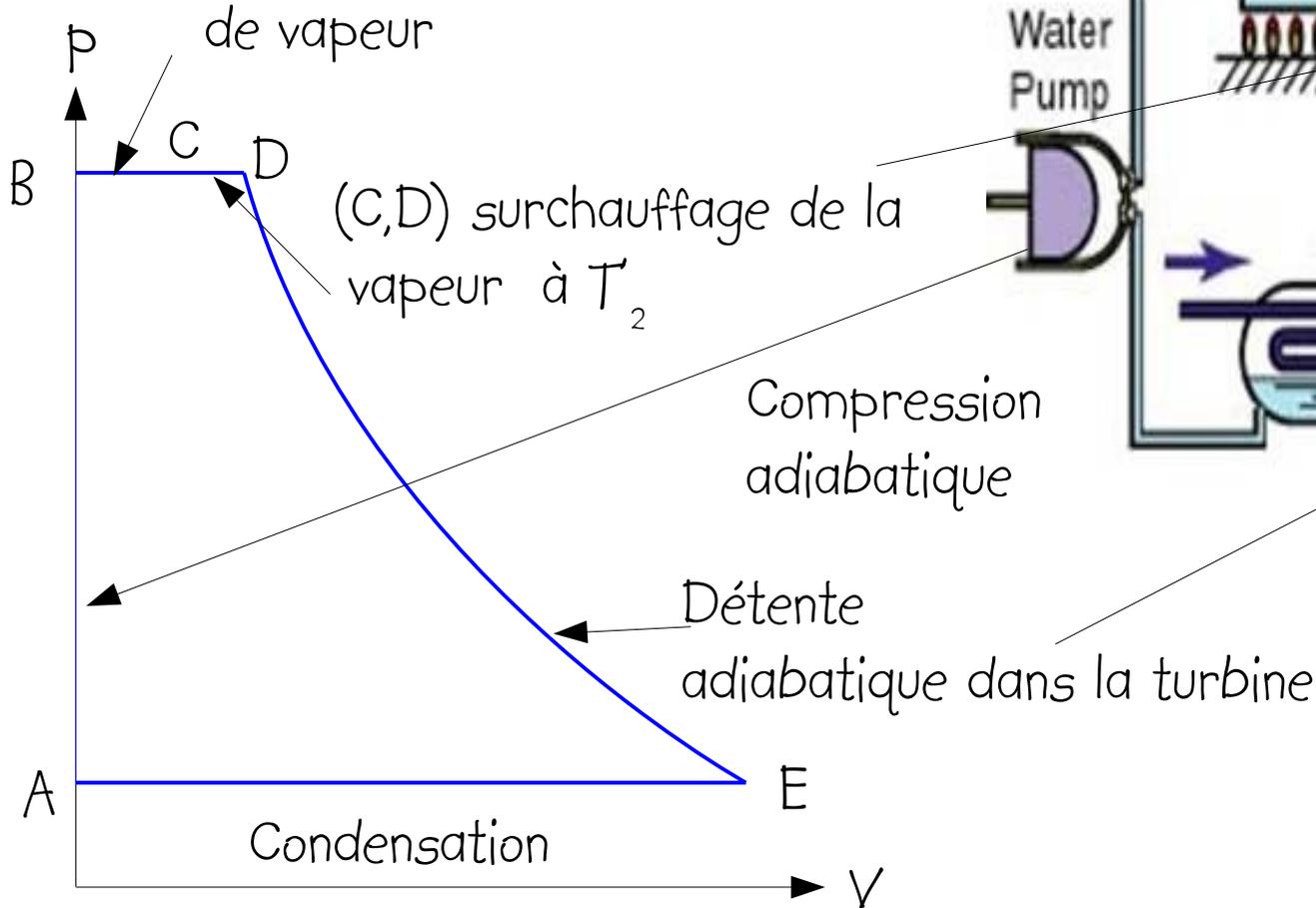
Toute conversion énergétique se fait avec un rendement toujours inférieur à 100%, rarement supérieur à 90% - et qui n'excède pas 55% dans le cas de machines thermiques.

À l'exception des carburants liquides et du gaz, le stockage et la restitution de l'énergie secondaire en grandes quantités ne sont pas des opérations faciles. Cette difficulté conduit au surdimensionnement des installations de production/conversion pour faire face aux pics de la demande.

L'électricité s'est imposée comme le plus versatile et le plus commode des vecteurs énergétiques. À elle seule, elle peut fournir tout le confort d'une maison, ce que les autres sources énergétiques ne peuvent faire. De fait, la consommation électrique augmente plus vite que la consommation globale.

3. Turbine à vapeur

(B,C) Vaporisation et chauffage jusqu'à température T_1 dans le générateur



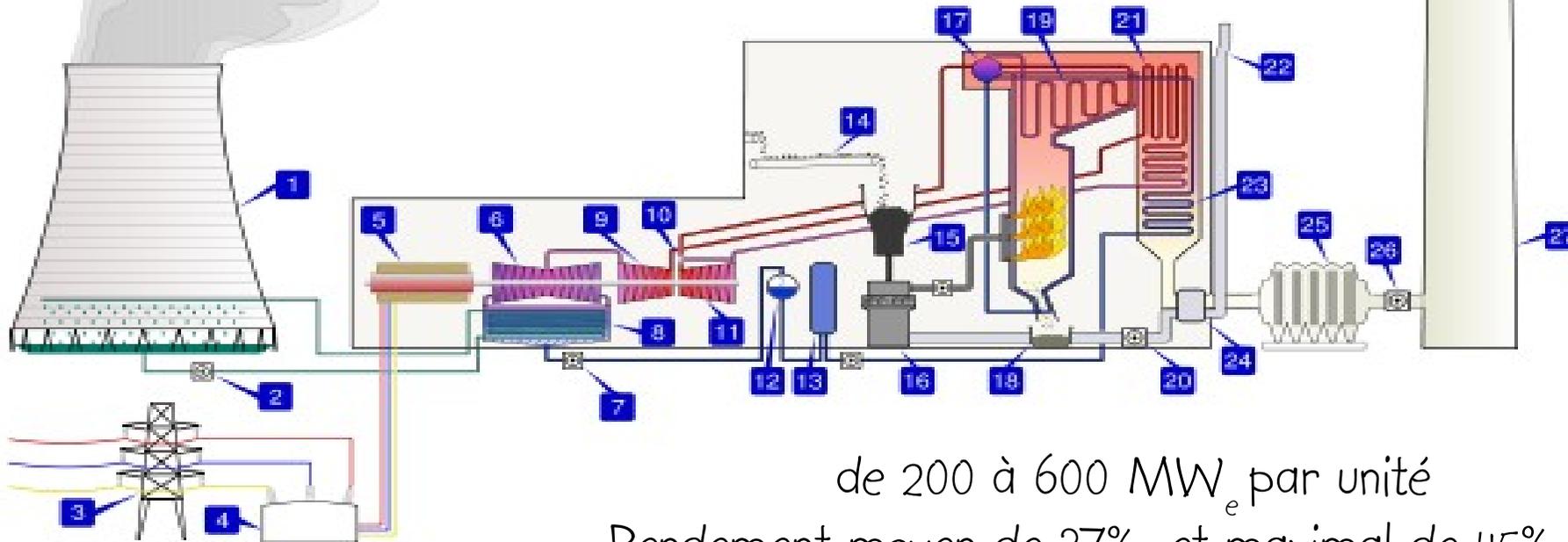
Installation à vapeur pour la conversion de chaleur en énergie mécanique (puis en électricité)

Cycle de Rankine avec surchauffeur ou cycle de Hirn

Rendement global ~ 30%

3. Centrale électrique à charbon

1. Tour de refroidissement
2. Pompe de la tour de refroidissement
3. Ligne de transmission triphasée
4. Transformateur step-up
5. Alternateur
6. Turbine vapeur à basse pression
7. Pompe à eau de la bouilloire
8. Condenseur
9. Turbine à vapeur à pression intermédiaire
10. Valve de contrôle de vapeur
11. Turbine vapeur à haute pression
12. Dégazeur
13. Calorificateur aquatique
14. Convoyeur à charbon
15. Entonnoir à charbon
16. Pulvérisateur de charbon
17. Tambour bouilloire à vapeur
18. Entonnoir à cendres
19. Supercalorificateur
20. Ventilateur à traction forcée
21. Recalorificateur
22. Prise d'air de combustion
23. Économiseur
24. Préalcalorificateur à air
25. Précipitateur électrique
26. Ventilateur à traction induite
27. Pile de cheminée à gaz



de 200 à 600 MW_e par unité

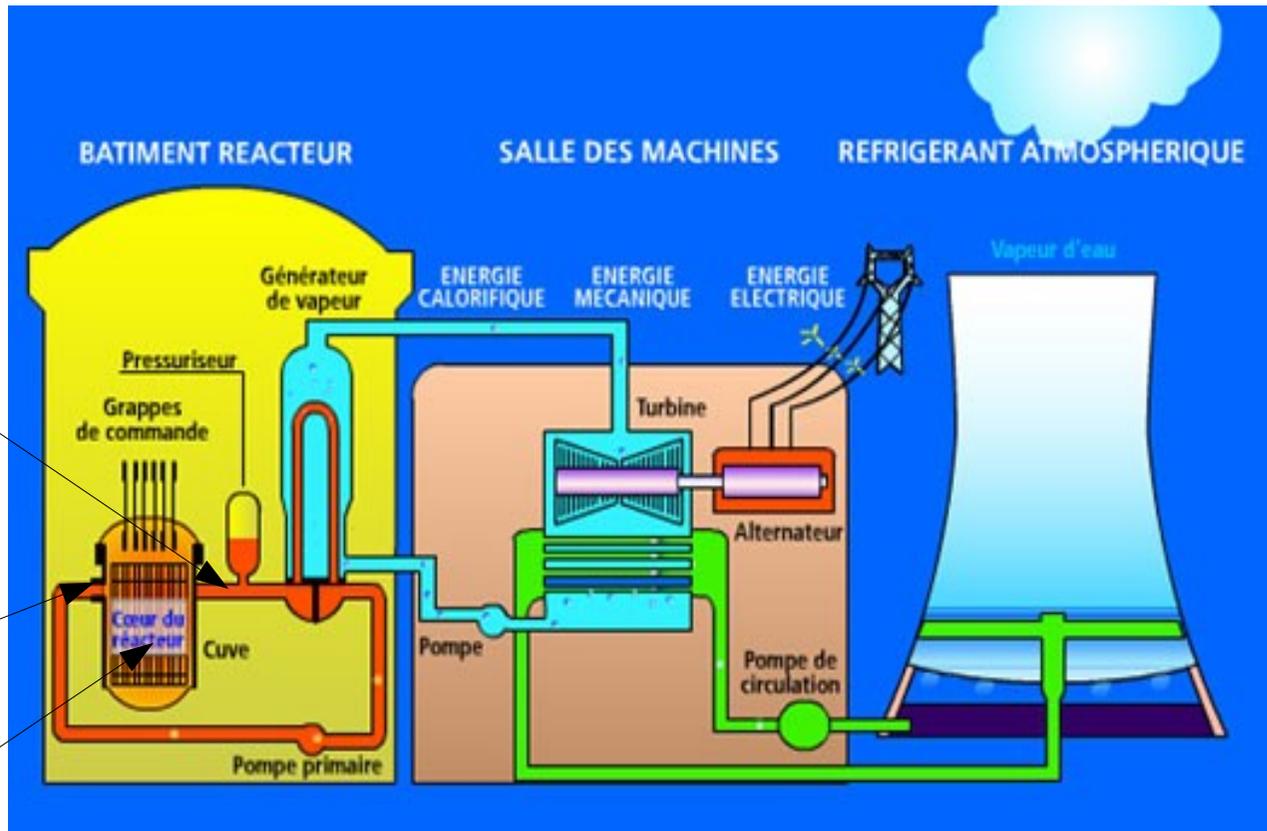
Rendement moyen de 37% et maximal de 45%

Deux centrales à charbon se construisent chaque semaine en Chine.

Plus de 60% de l'électricité provient du charbon en Allemagne.

4. Centrale électronucléaire

exemple : réacteur à eau pressurisée



$$T_s = 325 \text{ } ^\circ\text{C}$$

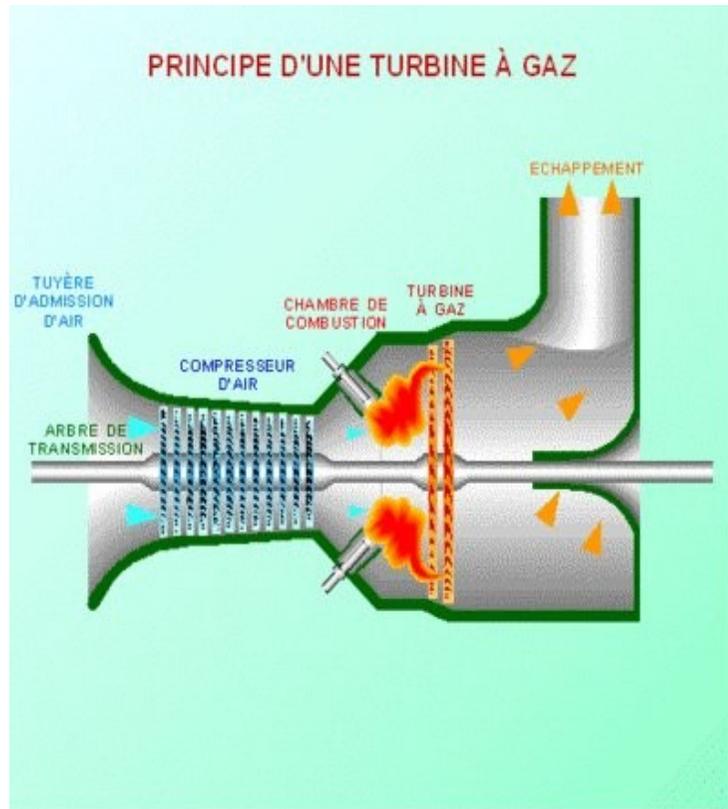
$$T_e = 285 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 155 \text{ bar}$$

de 900 à 1450 MW_e par unité

Rendement actuel de l'ordre de 30% , atteindra 35% pour les EPR pour 1600 MW_e

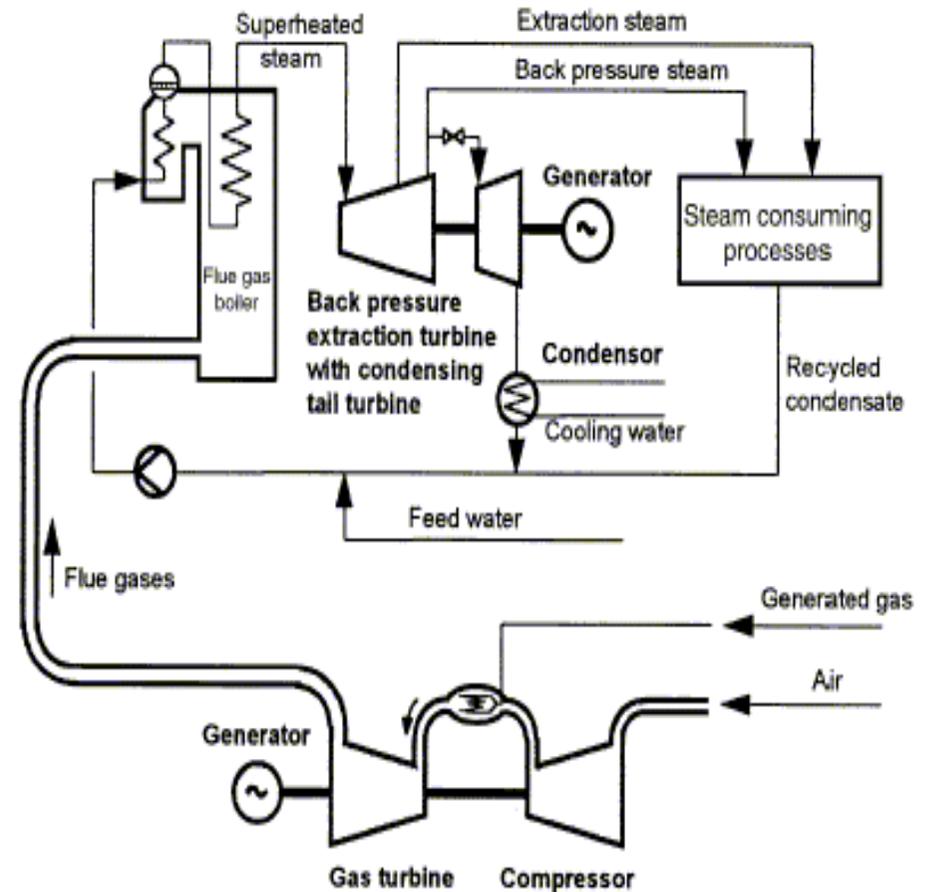
5. Centrale électrique à gaz à cycle combiné : turbine à gaz + machine thermique avec turbine à vapeur alimentée par les gaz d'échappement



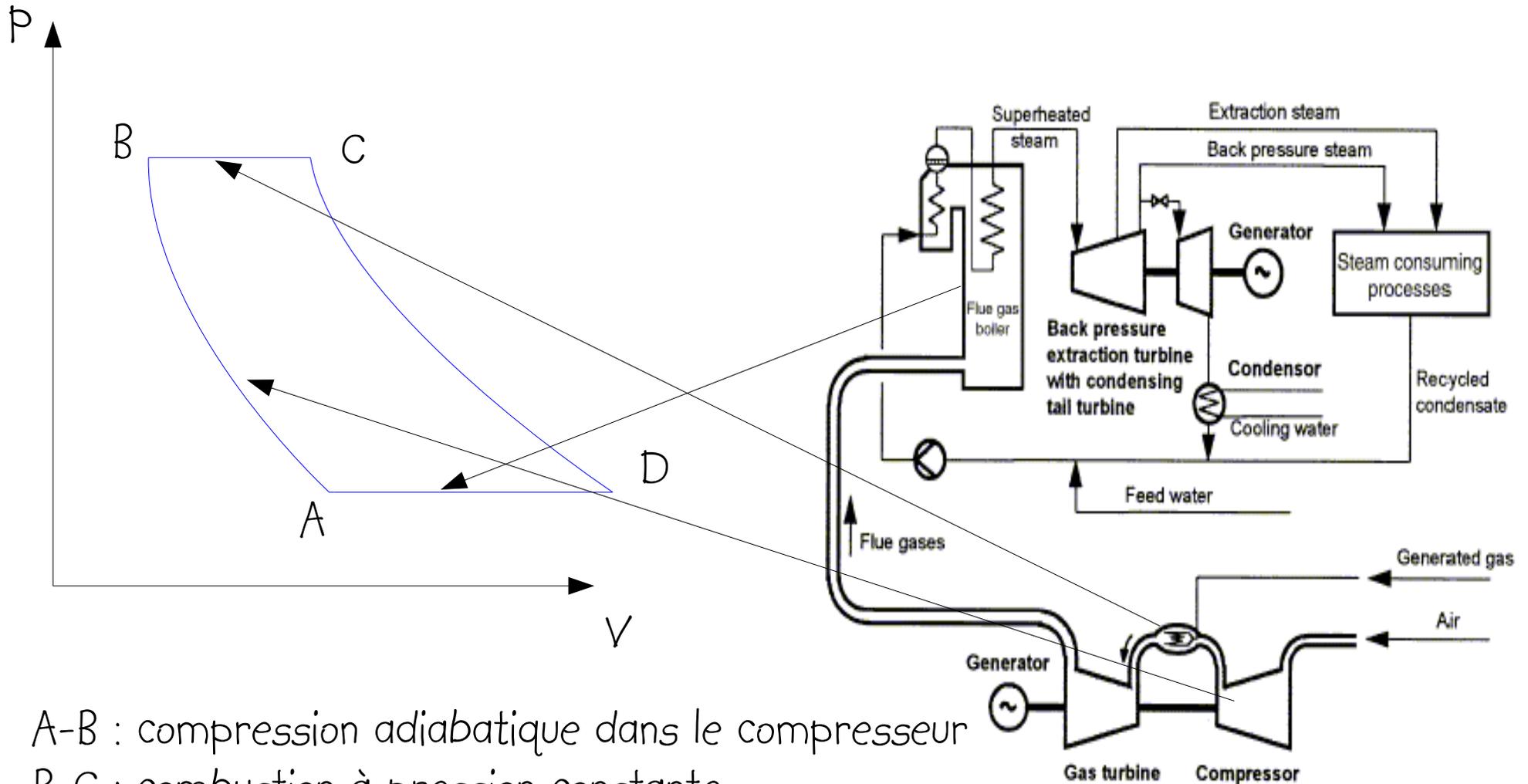
Dans une turbine à gaz, la combustion s'effectue à pression constante

qq's MW_e à $200 MW_e$

rendement $\sim 55\%$



5.1 Centrale électrique à gaz à cycle combiné : cycle de Joule



A-B : compression adiabatique dans le compresseur

B-C : combustion à pression constante

C-D : détente adiabatique dans la turbine

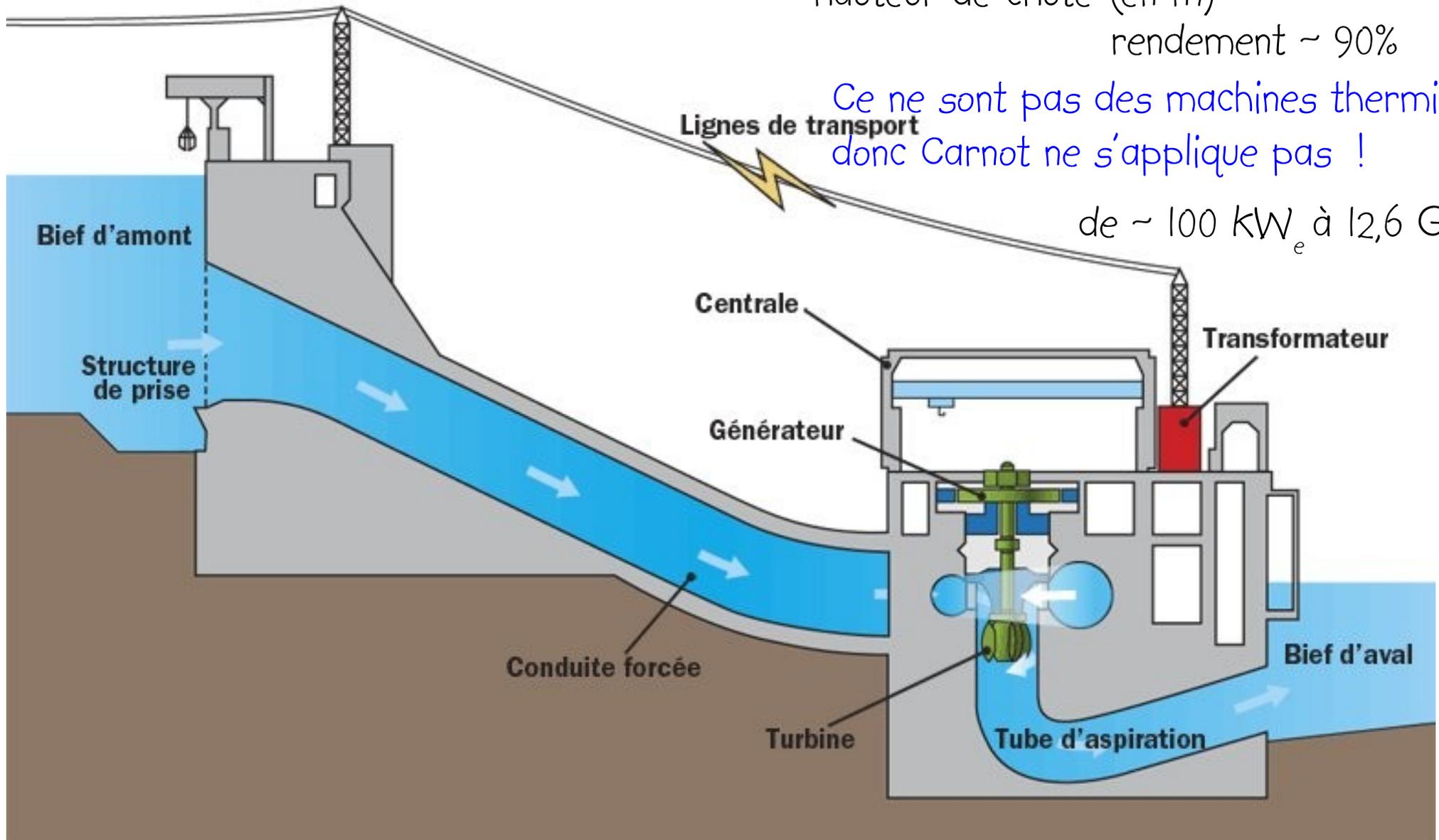
D-A : récupération de chaleur dans la machine thermique

6. Barrage hydroélectrique : Puissance (W) = rendement \times débit (litre/s) \times 9,81 \times hauteur de chute (en m)

rendement \sim 90%

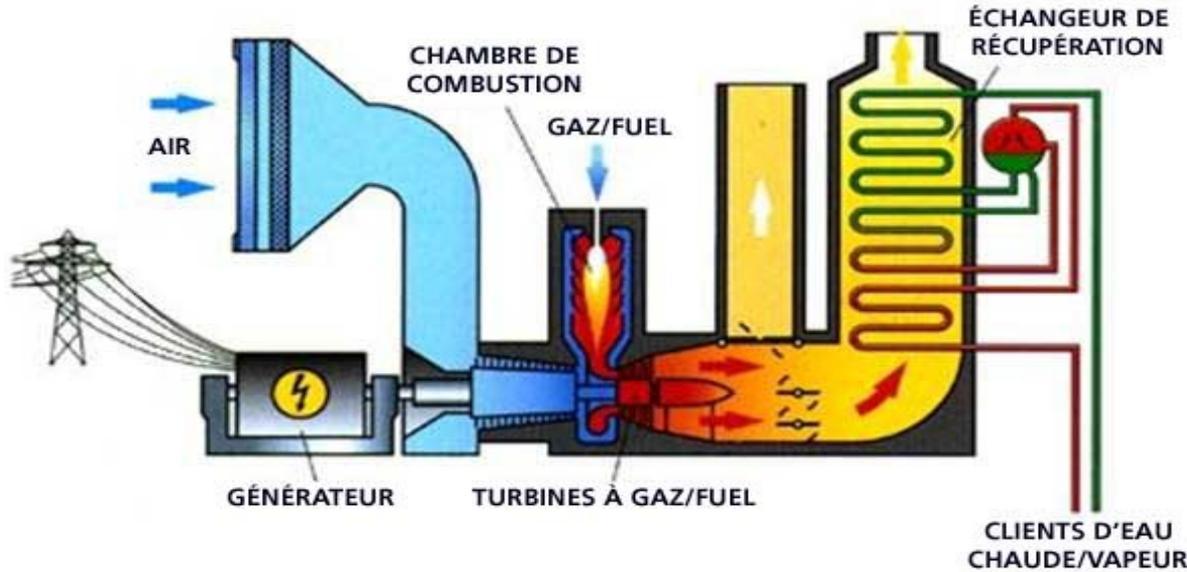
Ce ne sont pas des machines thermiques
donc Carnot ne s'applique pas !

de \sim 100 kW_e à 12,6 GW_e



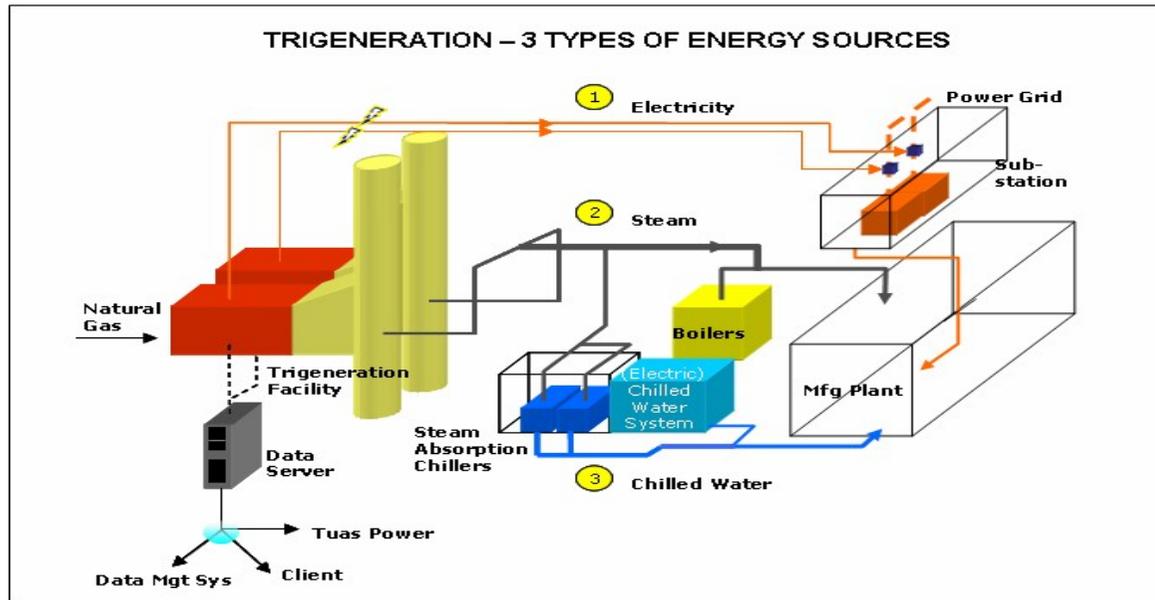
7. Cogénération et trigénération :

Schéma : centrale de cogénération avec turbine à gaz



cogénération :
électricité et chaleur

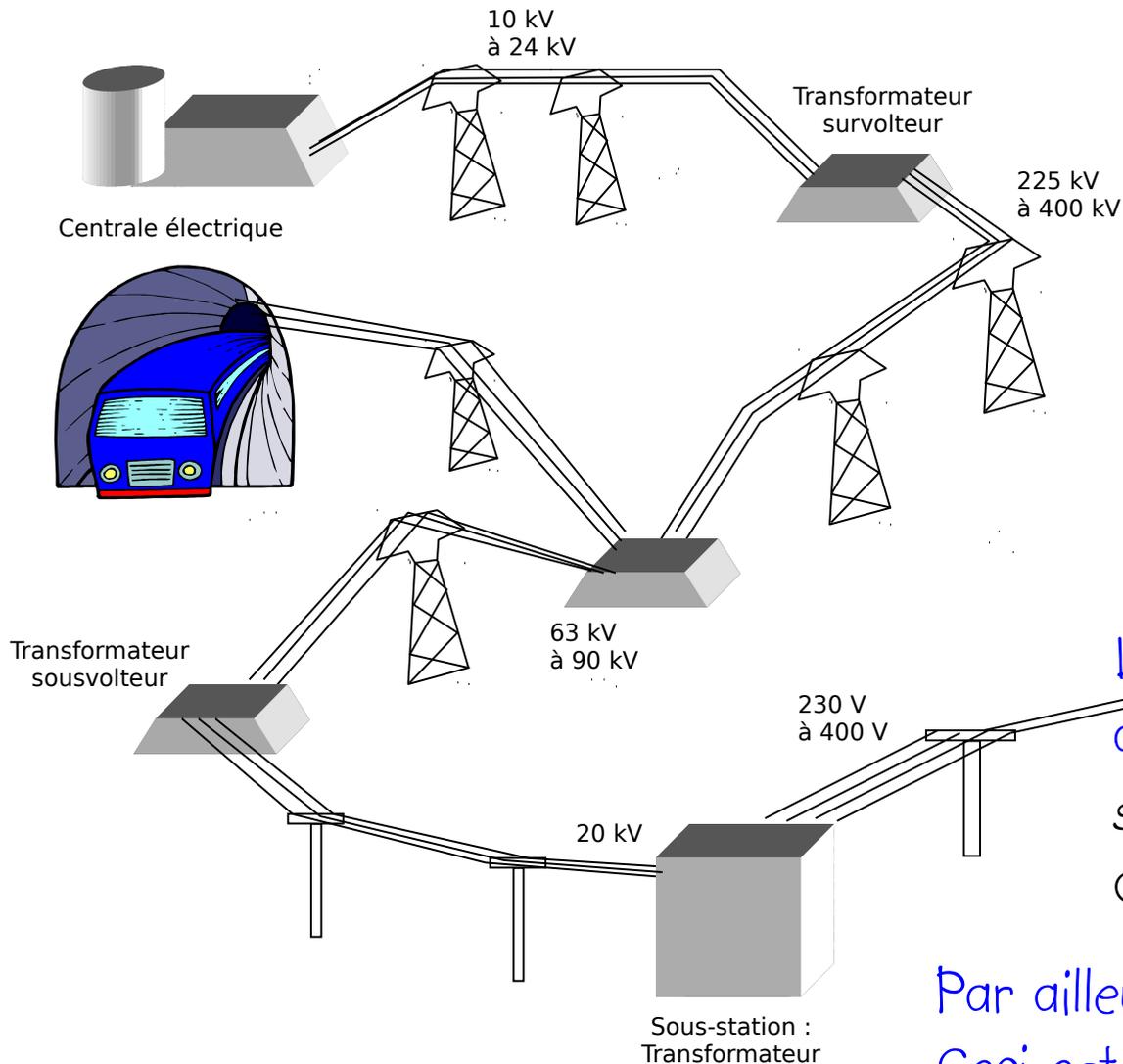
rendement jusqu'à 90%



Trigénération :
électricité, chaleur et froid

très haut rendement 80-95%

8. Transport de l'électricité :



$$P_{\text{fournie}} = U I$$

R étant la résistance de la ligne de transport :

$$P_{\text{Joule}} = R I^2 = \frac{R P_{\text{fournie}}^2}{U^2}$$

C'est la raison pour laquelle on utilise des lignes THT (225-400 kV) pour l'acheminement de l'électricité.

Les lignes THT sont par ailleurs en alliage d'aluminium nu (le cuivre serait moins résistif mais trop coûteux et trop lourd) afin de limiter R.

Par ailleurs, on doit transformer la tension. Ceci est plus facile à réaliser si l'électricité est produite en mode alternatif (triphase).

8.1 Transport de l'électricité :

échelle nationale THT : 400 kV

échelle régionale ou locale HT : 225 kV, 90 kV et 63 kV

échelle locale / distribution moyenne tension : 20 kV ou 15 kV

échelle locale / distribution basse tension : 380 V ou 220 V

Compensation d'une installation :

Puissance moyenne aux bornes d'un appareil électrique monophasé parcouru par un courant alternatif : $P = UI \cos \varphi$ U et I tension et courant efficaces.

où : φ est le déphasage entre la tension et le courant

si : $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ l'appareil est un générateur.

si : $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$ l'appareil est un moteur.

8.2 Transport de l'électricité :

Puissance active (W): $P_{\text{active}} = P = U I \cos \varphi$ (puissance moyenne fournie)

Puissance réactive (VAR): $P_{\text{réactive}} = Q = U I \sin \varphi$ (qui peut être emmagasinée et restituée)

Puissance apparente (VA): $P_{\text{apparente}} = S = U I$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Pour une résistance pure R : $P = R I^2$ et $Q = 0$

Pour une impédance pure L : $P = 0$ et $Q = L \omega I^2 = U^2 / L \omega$ (absorbée)

Pour une capacité pure C : $P = 0$ et $Q = - I^2 / C \omega = - C \omega U^2$ (fournie)

On peut mesurer Q, en mesurant P avec un wattmètre, I avec un ampèremètre et U avec un voltmètre : $\cos \varphi = \frac{P}{U I}$ $Q = P \operatorname{tg} \varphi$

8.3 Transport de l'électricité :

On montre qu'il est avantageux de centraliser la production de puissance active mais de délocaliser l'approvisionnement de puissance réactive. En conséquence, un réseau de distribution travaillera à grand $\cos \Phi$ (< 1 car il est important de garder une marge de puissance réactive sur le réseau : stockage-restitution, pointes d'appel de courants)

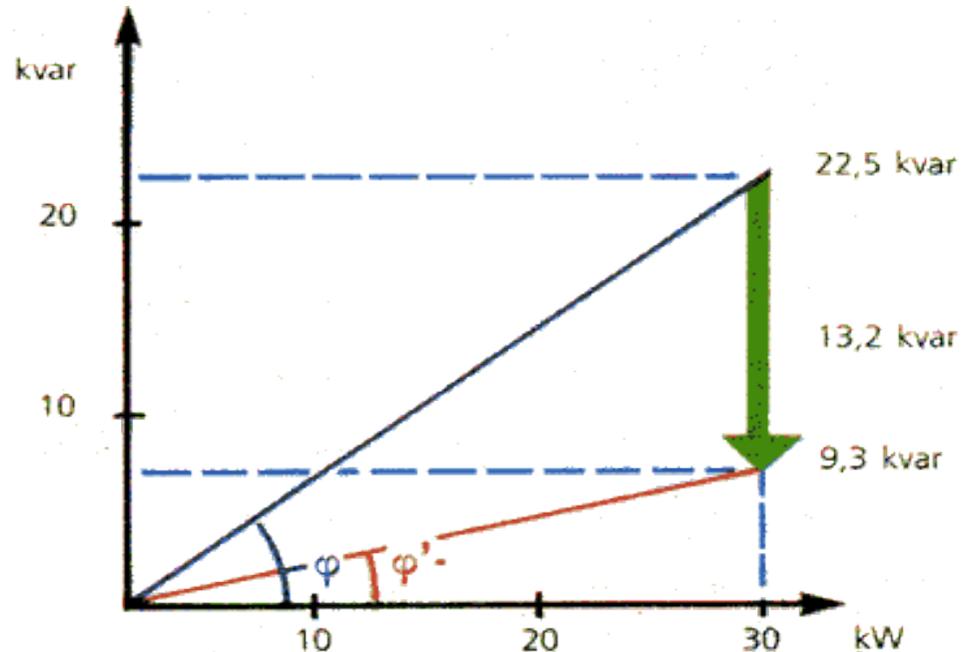
Chez l'utilisateur, il sera également important de maintenir une valeur élevée de $\cos \phi$ car sinon :

-pour une puissance active constante, le courant appelé augmente lorsque $\cos \phi$ diminue produisant des pertes par effet Joule plus importantes et des chutes de tension plus fortes qui peuvent conduire à un surdimensionnement des lignes, des générateurs et des moteurs...

Valeurs de $\cos \phi$ pour quelques appareils : moteurs asynchrones : 0,15-0,85 selon la charge, lampes fluo compensées : 0,93 , fours à induction : 0,85 poste de soudure à l'arc non compensé : 0,5

8.4 Transport de l'électricité :

Compensation ou relèvement du facteur de puissance : (ici aux bornes du moteur inductif)

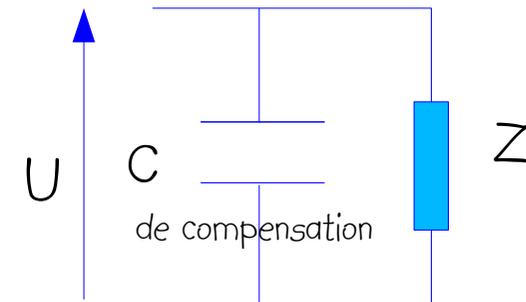


22,5 kvar : puissance réactive appelée par le moteur seul ($\tan \varphi = 0,75$)

13,2 kvar : puissance réactive fournie par les condensateurs

9,3 kvar : puissance réactive appelée par l'ensemble moteur et condensateurs ($\tan \varphi' = 0,31$)

30 kW : puissance active appelée par le moteur



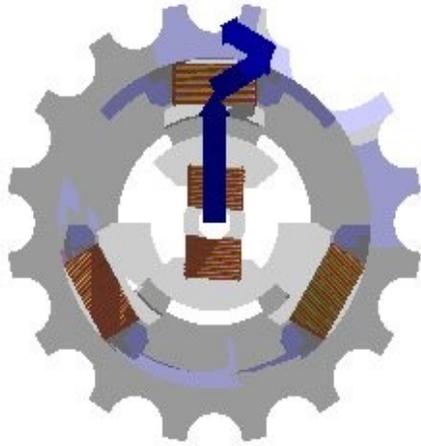
$$P(\tan \varphi - \tan \varphi') = C \omega U^2$$

Si on surcompense, on envoie alors de la puissance réactive capacitive sur le réseau ... ce qui n'est pas mieux .

Pour les gros consommateurs :

$$1 > \cos \varphi > 0.96$$

8.5 Transport de l'électricité :

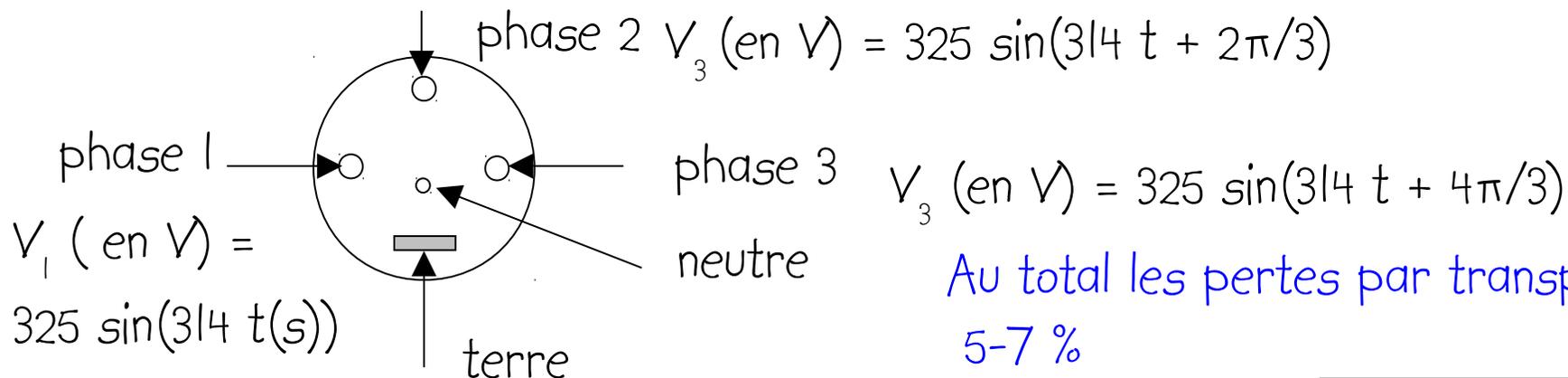


Plus de 95% de l'électricité est produite en mode triphasé à l'aide d'alternateurs synchrones qui ont un excellent rendement (jusqu'à 99% !).

$$P_{\text{active}} = \sqrt{3} U I \cos \phi$$

Pour une même puissance active reçue par l'utilisateur, le courant circulant baisse notablement réduisant ainsi les pertes par effet Joule.

De plus la puissance fluctuante est nulle ce qui annule les contraintes mécaniques variables sur les générateurs et les moteurs .



Au total les pertes par transport sont de 5-7 %

9. Transport de la chaleur

Ceci se fait avec beaucoup plus de difficultés et de pertes que le transport de l'électricité ! Donc partout où on le peut, on évitera cette opération.

Cependant, elle est absolument nécessaire lorsque l'on doit :

- acheminer de la chaleur à son point d'utilisation : **chauffage** ;
- faciliter son transfert : **échangeurs** ;
- extraire la chaleur indésirable des systèmes qui la produisent : **réfrigération** ;
- ou au contraire éviter qu'elle se propage : **isolation thermique**.

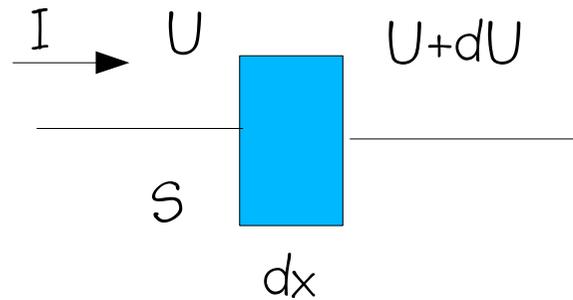
La propagation de la chaleur d'un point chaud vers un point froid est un processus **irréversible** qui se fait selon trois modes physiques distincts :

- conduction** par le biais de l'interaction et du mouvement des constituants microscopiques (atomes, molécules et électrons) des corps ;
- convection** : c.-à-d. la circulation d'un fluide chauffé qui transporte cette chaleur ;
- rayonnement** électromagnétique à travers l'espace et sur de longues distances (exemple du soleil à la terre)

9.1 Transport de la chaleur : conduction en régime permanent

Transfert de chaleur provoqué par une différence de températures entre deux points d'un même milieu sans déplacement global de matière.

Par analogie avec la loi d'Ohm dans une portion infinitésimale de conducteur électrique :

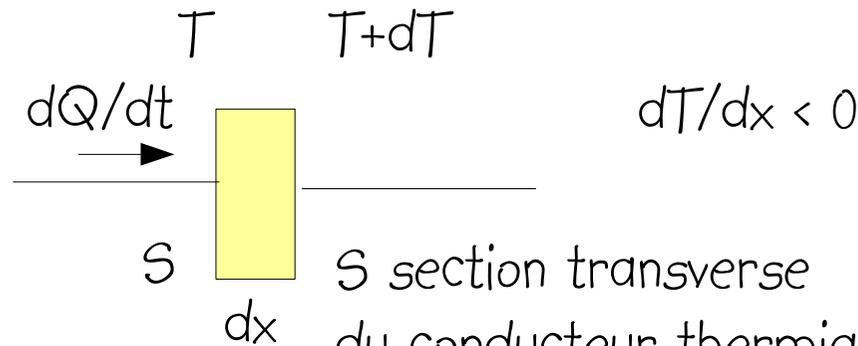


$$dU = I dR = I \rho \frac{dx}{S}$$

$$I = \frac{1}{\rho} S \frac{dU}{dx}$$

S : section transverse du conducteur

où ρ ($\Omega \cdot m$) est la résistivité électrique du milieu ; $1/\rho$ est sa conductivité électrique



Loi de Fourier :

Ici la chaleur descend les températures !

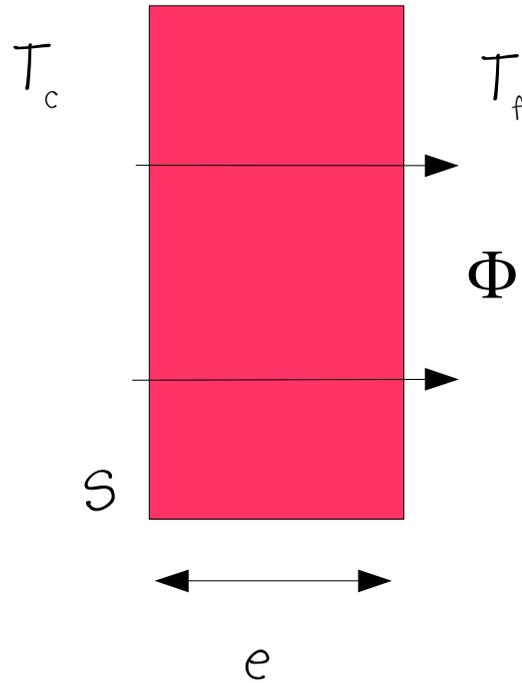
$$\frac{dQ}{dt} = -k S \frac{dT}{dx}$$

dQ/dt [W] est la puissance thermique transmise.

où k [$W m^{-1} K^{-1}$] est la conductivité thermique du matériau.

9.2 Transport de la chaleur : conduction

Cas d'une barre (ou d'un mur) de section S constante en régime permanent :



$$\frac{dQ}{dt} = -k S \frac{dT}{dx}$$

$$\Phi dx = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} dx = -k dT$$

Φ est le flux de chaleur (W m^{-2}). Φ est constant, car en régime permanent la chaleur ne peut s'accumuler.

$$\Phi \int_{x_1}^{x_2} dx = - \int_{T_c}^{T_f} k dT$$

$$\Phi e = - \int_{T_c}^{T_f} k dT$$

$$\Phi = - \frac{1}{e} \int_{T_c}^{T_f} k dT = \frac{1}{e} (\lambda(T_c) - \lambda(T_f)) \quad \text{où} \quad \lambda(T) = \int_0^T k(T') dT'$$

est la conductivité thermique intégrale (W m^{-1}).

si k est constant : $\lambda(T) = k T$ et : $\Phi = \frac{k}{e} (T_c - T_f) = K (T_c - T_f)$

où K est la conductance thermique ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$).

Mais k en général varie en fonction de T

9.3 Conductivité en $W m^{-1} K^{-1}$

Acier doux 46 Acier inoxydable (18% Chrome, 8% Nickel) 26

Air (100 kPa) 0,0262 Aluminium (pureté de 99,9%) 237

Argent 418 Béton 0,92 Bois de chêne 0,16

Bois de pin (parallèle aux fibres) 0,36 Bois de pin (perpendiculaire aux fibres) 0,15

Brique (terre cuite) 0,84 Charbon de bois ($0,2 g/cm^3$) 0,055

Contreplaqué 0,11 Cuivre 390 Diamant 1000-2600 Eau 0,6 Glace 2,1

Fer 80 Fonte 100 Granite ($2,8 g/cm^3$) 2,2 Grès ($2,2 g/cm^3$) 1,3

Laine 0,05 Laine de roche (150 à 175 kg/m^3) 0,045

Laine de verre 0,04 Marbre 0,30 Mortier de chaux 0,87

Mousse de Polyuréthane rigide 0,025 Or 317 Paille (perpendiculaire aux fibres) 0,04

Polystyrène expansé 0,036 Terre (sèche) 0,75 Verre 1,2

Dans les bâtiments,
le béton, la brique ...
ne valent pas le bois !

Air à pression
atmosphérique est
un très bon isolant.
Mais attention à
la convection !

9.4 Convection

Les mouvements naturels (convection naturelle) ou forcés (convection forcée) au sein d'un fluide conduisent au transport de chaleur.

La **convection naturelle** est produite par les différences de masses volumiques considérables résultant d'écart de températures dans les fluides, qui sous l'effet de la pesanteur conduisent à des déplacements de matière.

La convection naturelle est très difficile à modéliser simplement.

Dans le **cas simple**, où la **convection naturelle s'opère entre une surface plane conductrice et un grand volume de fluide**, le flux de chaleur transféré de la surface vers le fluide prend la forme suivante :

$$Q(\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) = h(T_S - T_F) \text{ où : } T_S \text{ est la température de surface}$$

$h \approx 6 (+/-2) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ dans l'air

$h \approx 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ dans l'eau

$h \approx 30\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ dans l'eau bouillante

T_F est la température du fluide relevée

loin de la plaque

h est le coefficient de convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

9.10 Convection forcée

Ici l'écoulement du fluide est provoqué par un dispositif extérieur (ventilateur, pompe..) indépendant de la répartition des températures. Là encore, pour les cas les plus simples, le flux de chaleur transféré peut s'écrire sous la forme :

$$Q (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) = h(T_C - T_F)$$

où : T_C est la température chaude au sein du fluide

T_F est la température froide

h est le coefficient de convection forcée ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

La valeur de h dépend grandement des conditions de l'écoulement : laminaire, turbulent et de l'état du fluide : monophasique, diphasique ...

Du fait des différences de masse volumique, h est beaucoup plus grand dans les liquides que dans les gaz (refroidissement forcé à eau des moteurs thermiques ...)

10. Transport par rayonnement

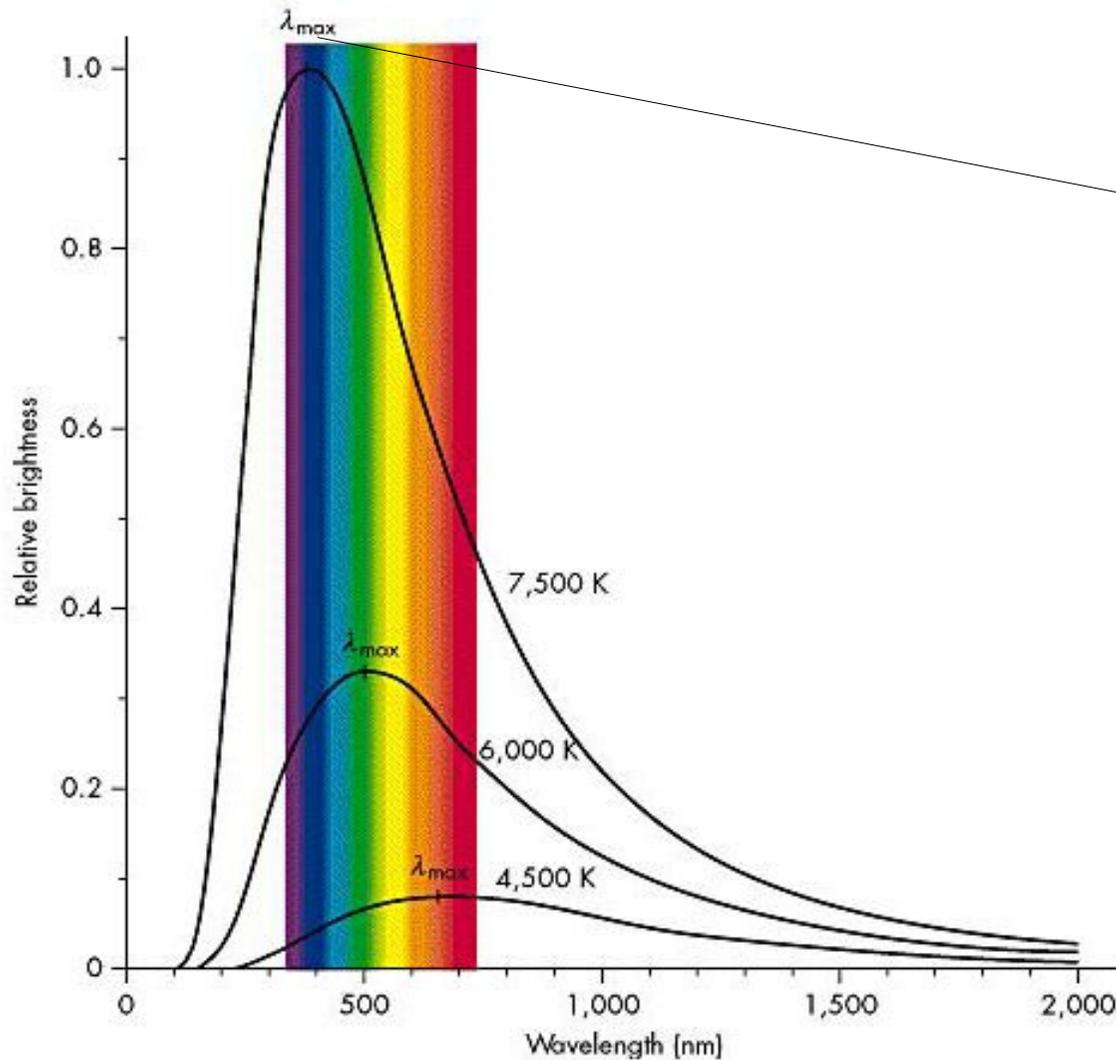
Un corps à la température T émet un rayonnement électromagnétique d'origine thermique (oscillation thermique des charges électriques à la surface de la matière). Le flux de chaleur radiée est décrit par la loi de Stefan :

$$Q(\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) = \epsilon \sigma T^4$$

où : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan
 $\epsilon (< 1)$ est l'émissivité de surface du corps
 T est en K

Pour un corps parfaitement noir (qui absorbe la totalité du rayonnement électromagnétique), l'émissivité est égale à 1 .

10.1 Spectre d'émission d'un corps noir



Loi de Wien :

$$\lambda_{max} T = \text{cte} = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Émittance spectrale d'un corps noir :

$$S(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} \quad [\text{W m}^{-2} / \text{m}]$$

Constante de Boltzmann :

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

Constante de Planck

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

Il l'hydrogène

Il pourrait être un nouveau vecteur d'énergie utilisable dans les transports. En France environ le quart de l'énergie primaire est consommée dans les transports. Il pourrait - dans le long terme - remplacer le pétrole.

L'hydrogène est l'élément le plus abondant sur Terre et dans l'Univers, mais il est essentiellement lié à l'eau (H_2O).

Production d'énergie par : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2 O + 280 \text{ kJ/mole}$ ou 140 MJ/kg ou 8,75 MJ/l d' H_2 à 700 bars (4,6 fois moins qu'un litre d'essence !)

mais également en tant qu'apport (10%) au gaz naturel : ce qui permet d'améliorer son pouvoir calorifique et de réduire l'émission de CO_2 .

11.1 l'hydrogène

Actuellement plus de 70% de l'hydrogène est produit par reformage catalytique de gaz naturel à 800-950 °C. On consomme environ 0,7 J de méthane pour reformer 1 J de CH_4 et obtenir environ 1,2 J d'hydrogène (rendement : $1,2/1,7 = 70\%$).

On pourrait également produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau mais il faut 4 à 5,2 kWh d'électricité pour obtenir 1 Nm^3 d' H_2 (1 m^3 sec à 0 °C sous une pression de 760 mm de mercure)

Au coût actuel de l'électricité, cela conduit à un coût de production de l'hydrogène par voie électrolytique qui est le double de celui par reformage.

L'hydrogène peut être stocké à 700 bars dans des réservoirs en matériaux composites (mais densité d'énergie volumique 4 fois moindre que celle de l'essence).

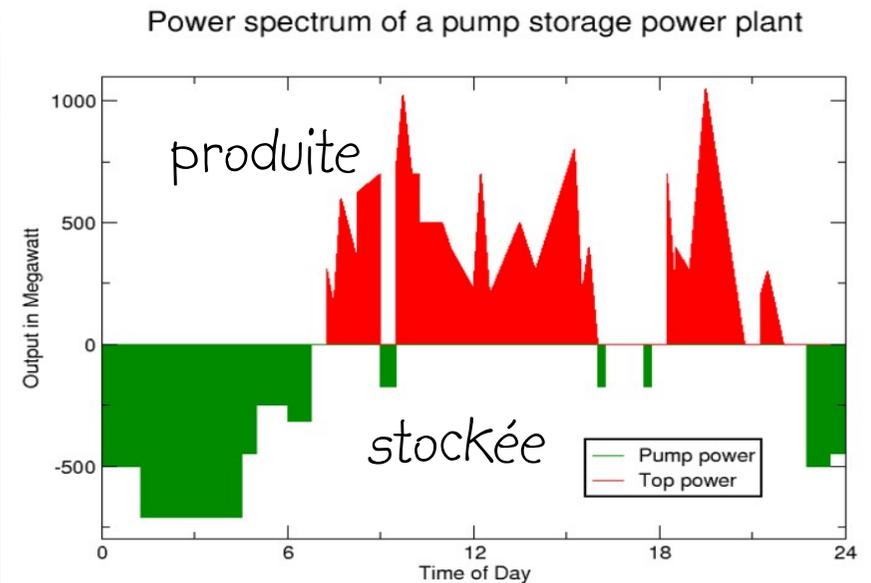
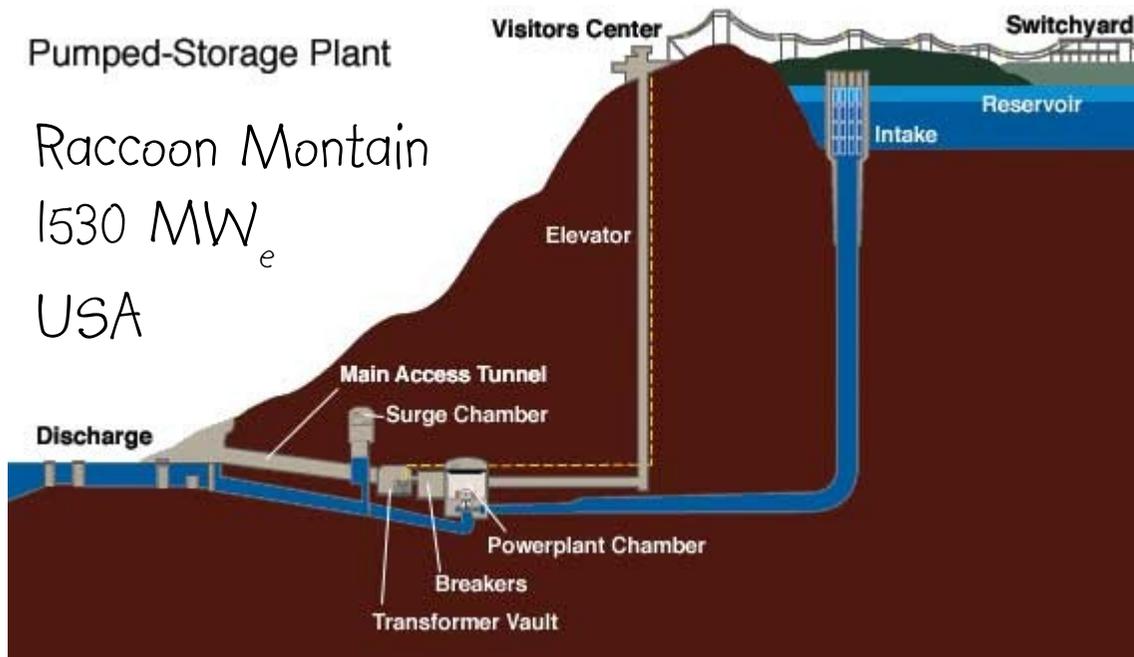
L'hydrogène peut être utilisé dans les piles à combustibles, comme carburant principal dans les moteurs à explosion et mélangé à du gaz naturel pour la propulsion de véhicules (bus de ville...).

Dans le futur, il pourrait être utilisé sous forme liquide en tant que carburant dans les avions.

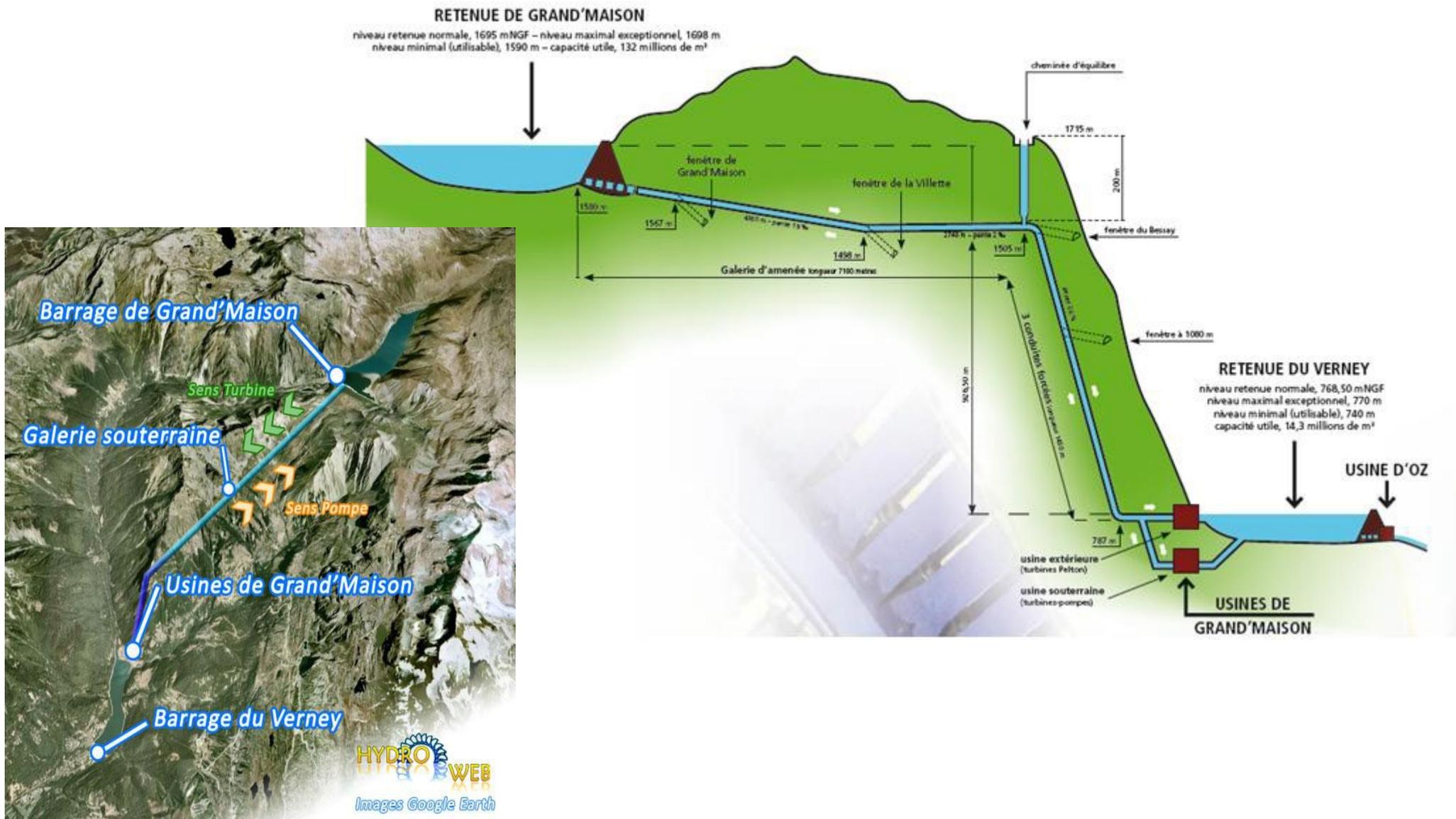
12. Stockage hydraulique

Le pompage-turbinage entre deux barrages (exemple Grand'Maison 1070 MW_e) permet de stocker de grandes quantités d'électricité sous la forme d'énergie potentielle de pesanteur. En quelques minutes, on peut passer du mode stockage au mode production. Le rendement d'un cycle est de 70-85%. C'est actuellement le moyen le plus efficace de stockage de grandes quantités d'électricité.

La puissance mondiale de pompage-turbinage installée était de 90 GW_e en 2000.



12.1 STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) de Grand'Maison



13. Batteries et accumulateurs

Ils sont de plus en plus courants eu égard au développement des appareils nomades autonomes. Mais *l'électricité se stocke mal* ! c'est l'un des facteurs qui freinent le développement du solaire photovoltaïque ou de l'éolien .

Ils sont caractérisés par :

- leur tension par cellule (V)
- leur densité d'énergie massique (Wh/kg)
- leur densité de puissance massique (W/kg)
- leur rendement énergétique (%)
- leur temps de vie (ans)
- leur cyclabilité : nombre total de cycles dans leur vie
- leur coût : Wh/€
- leur taux de décharge mensuelle (%)

Ils sont également utilisés en stockage-déstockage pour lisser la charge des réseaux électriques ou en tant que générateurs de secours : jusqu'à 27 MW sur 15 mn .

13.1 Batteries et accumulateurs

type	Tension (V)	densité d'énergie (Wh/kg)	densité de puissance (W/kg)	rendement (%)	coût (Wh/Eur)	décharge mensuelle (%/mois)	durée de vie (ans)
Pb-Acide	2,1	30-40	180-700	70-92	8-10	3-4	3 (voiture) , 20 (fixe)
Ni-Fe	1,2	50	100	65	7-9	20-30	50
Ni-MH	1,2	30-80	250-1000	66	1,5	20	
Ni-Zn	1,7	60	900		3-4		
Li-Ion	3,6	160	1800	99,9	3,5-6	5-10	2-3
Li-Polymer	3,7	130-200	3000	99,8	3,5-6	5	2-3

Pour le solaire photovoltaïque autonome, la batterie Pb-Acide reste l'accumulateur de référence.

Ce type d'accumulateurs est également très employé pour l'automobile mais les batteries Ni-MH, Li-Ion & Li-Polymer prennent de plus en plus le relais dans les véhicules hybrides et électriques.

14. Supercondensateurs

Ce sont des condensateurs dont la capacité peut atteindre 3000 farads et plus. Leur tension maximale est actuellement limitée à 2,7 V.

Énergie maximale stockée : 10 kJ

Ils peuvent être chargés ou déchargés sous de forts courants et rapidement (quelques secondes).

Leur densité de puissance va de 1000 à 5000 W/kg pour une densité d'énergie allant de 4 à 6 Wh/kg.

Ils sont utilisés dans les véhicules hybrides et électriques et sur certains moteurs stop & start.

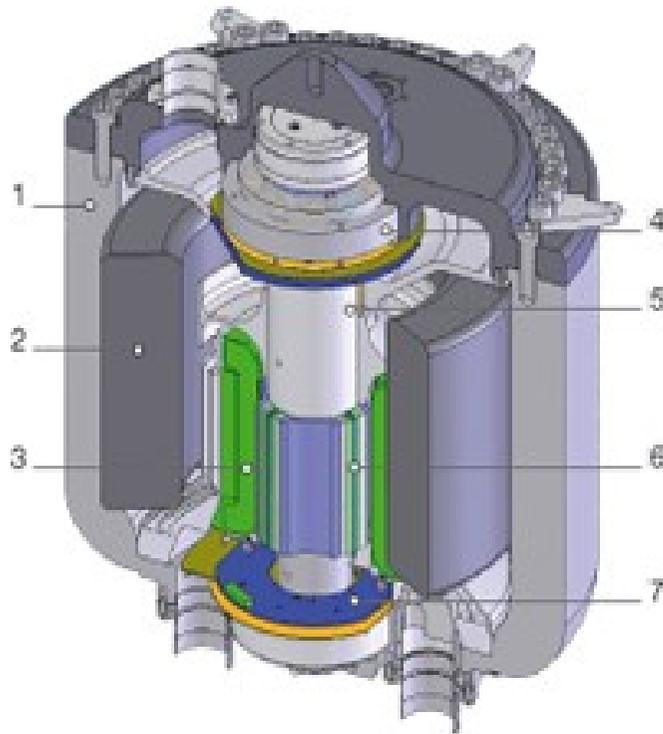


15. Volants d'inertie

Ce sont des disques pleins en rotation rapide couplés à un moteur électrique réversible.

L'énergie stockée est donnée par : $\frac{1}{2} I \omega^2$ où I est le moment d'inertie et ω est la vitesse de rotation.

exemple : volant d'inertie monté sur palier magnétique dans le vide pour onduleurs



1. enceinte principale (générateurs électriques de secours)

2. volant d'inertie en fibre de carbone composite

3. stator magnétique

4. palier magnétique supérieur

5. système d'extraction d'air moléculaire

6. rotor magnétique

7. palier magnétique inférieur

Ces appareils ont en général un bon rendement > 90% .

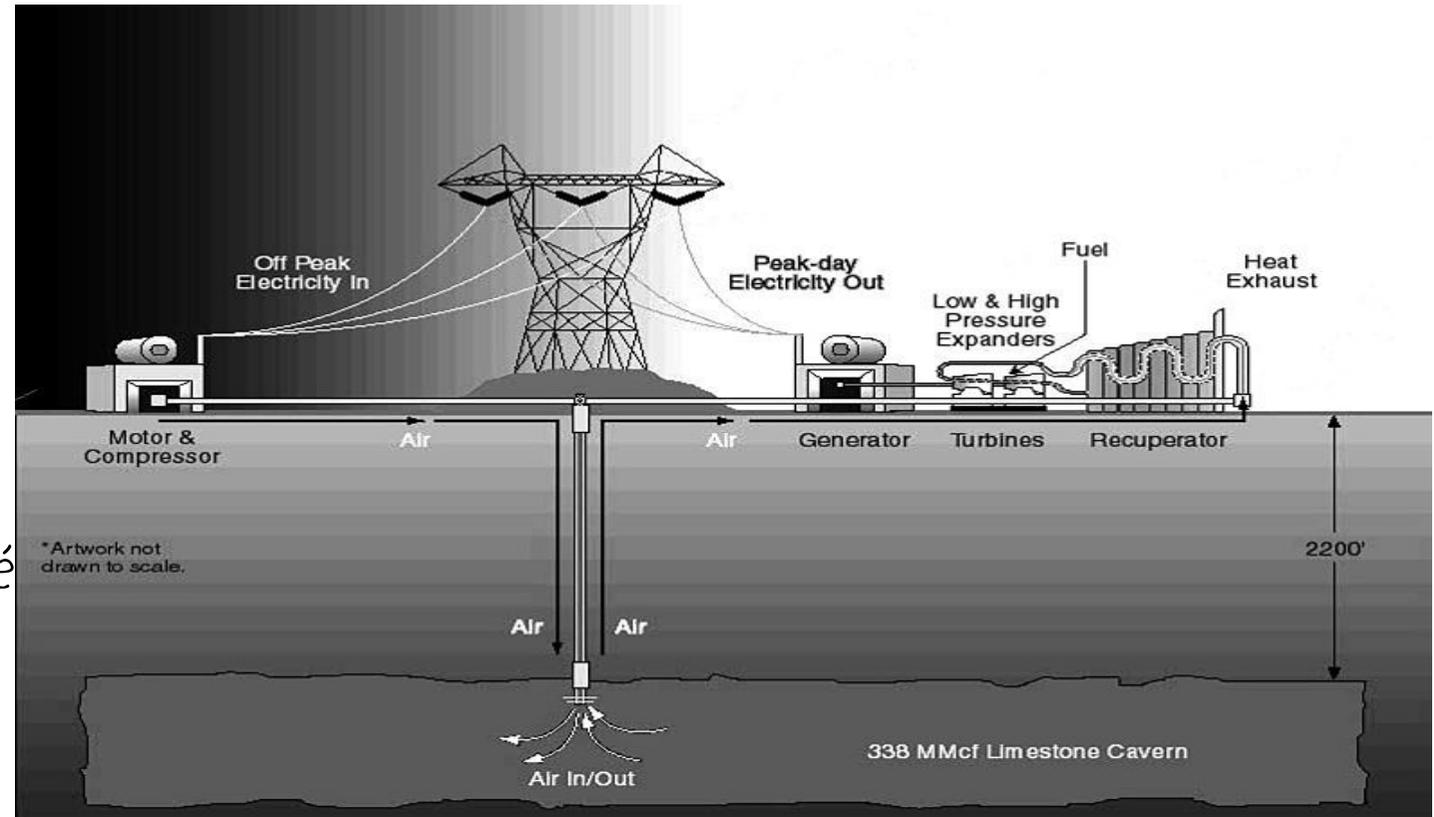
On les utilise pour lisser la charge électrique sur quelques secondes dans les réseaux électriques.

On commence à les réutiliser en tant que batterie mécanique dans le transport.

16. Air comprimé :

Durant les périodes creuses, l'électricité est utilisée pour compresser de l'air dans une vieille mine. La chaleur de la compression est évacuée.

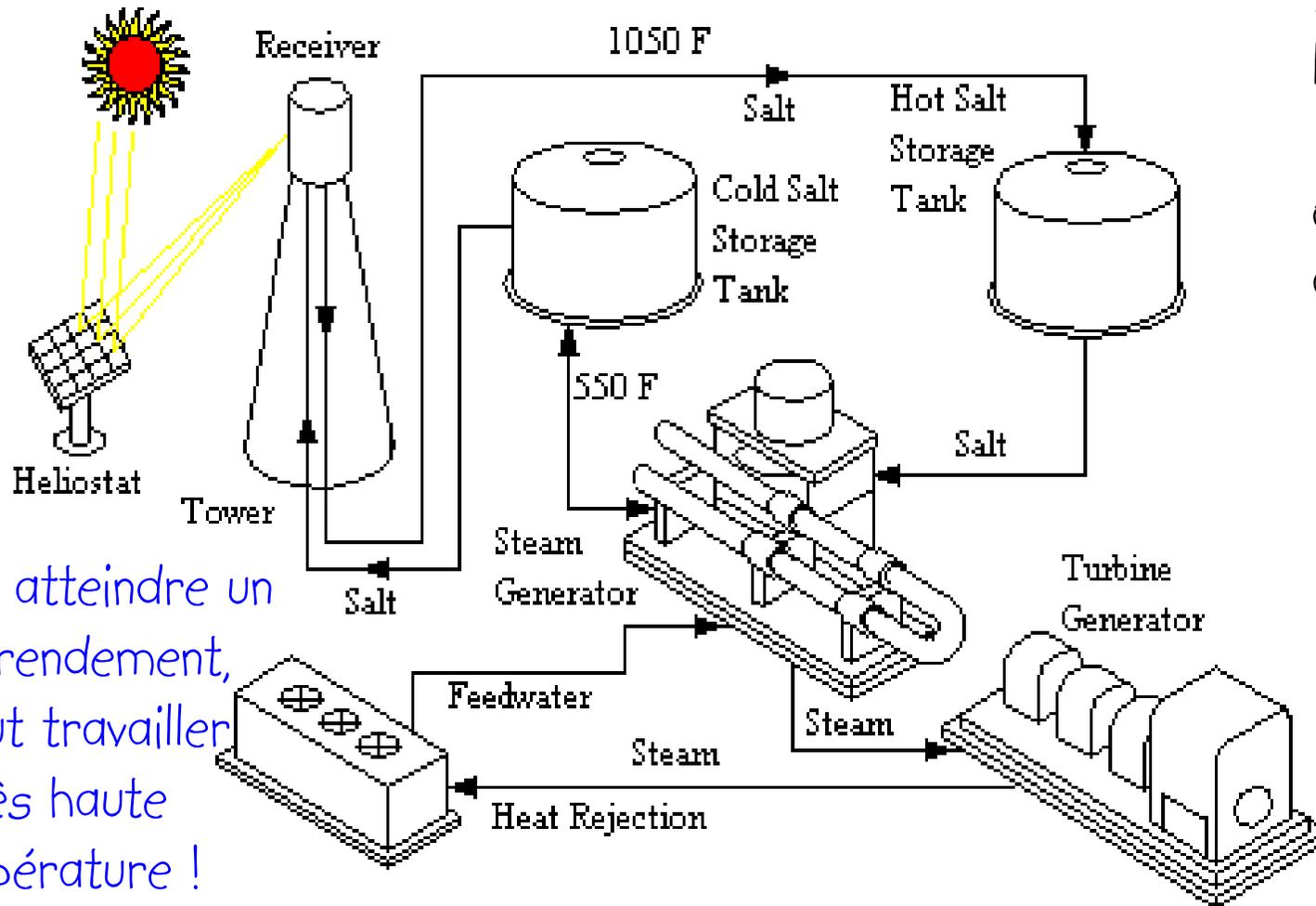
Durant les pics de consommation, l'air réchauffé est turbiné pour produire de l'électricité. De l'énergie est perdue à la compression et consommée pour réchauffer l'air avant de le turbiner.. Le rendement est d'environ 50%.



Des centrales de ce type existent en Allemagne et aux États-Unis. Elles peuvent produire jusqu'à 300 MW mais sur quelques heures uniquement.

18. Stockage de la chaleur :

Peu utilisé de nos jours, le stockage de chaleur à une grande échelle fait l'objet de nombreux projets de recherche ...



Pour atteindre un bon rendement, il faut travailler à très haute température !

L'énergie stockée prend la simple forme :

$$\Delta Q = C \Delta T$$

où C est la capacité calorifique du réservoir

$$C = 4,18 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$$

pour l'eau entre 0-100 °C

$$C = 4,5 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$$

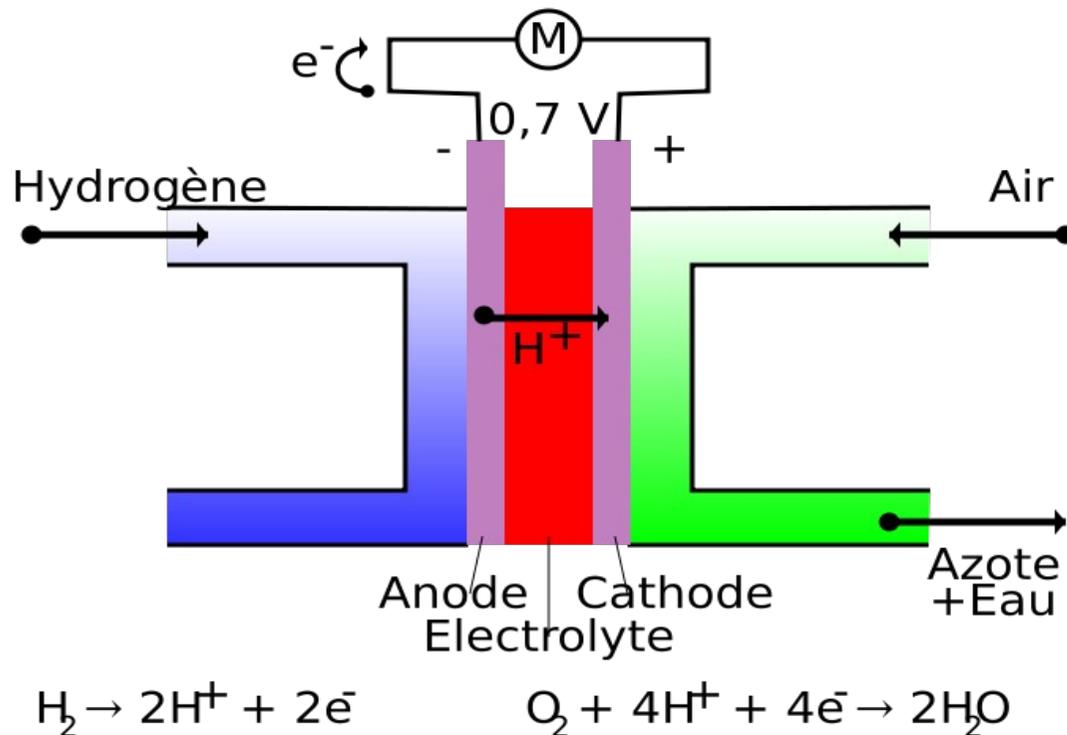
pour des sels fondus tels que mélange $\text{LiF}-\text{BeF}_2$ à 650 °C

Projet du National Solar Thermal Test Facility à Albuquerque au Nouveau Mexique

19. Les piles à combustibles (PAC) :

Pour la plupart, elles réalisent de manière non explosive la réaction : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

Leur principe est connu depuis 1839 ! mais leur technologie ne s'est développée que durant la seconde moitié du XX^{ième} siècle .

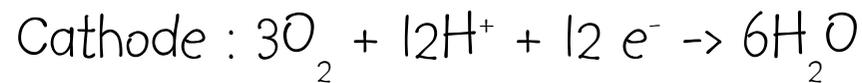
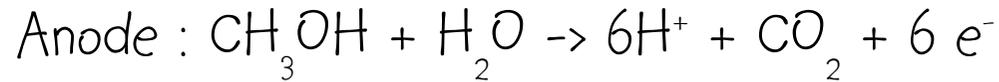


Le rendement global peut aller jusqu'à 80% mais puisqu'elles produisent de la chaleur, le rendement électrique n'est que de 35-60% .

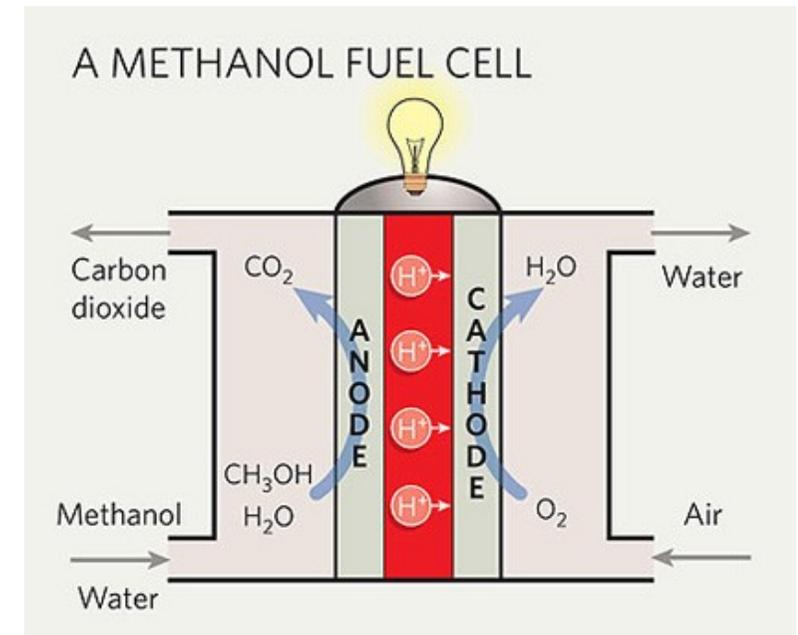
Elles sont utilisées - à titre expérimental - pour la production d'électricité sur des véhicules électriques. Leur coût est encore trop élevé (>1000 €/kW) et leur durée de vie trop faible (< 10 ans) pour une utilisation économique.

19. Les piles à combustibles (PAC) à méthanol :

Elles réalisent les réactions suivantes :



Elles produisent du CO_2 !



Des prototypes sont en test depuis une dizaine d'années dans des applications nomades.



réservoir de
méthanol sur
téléphone portable

20. Pour en savoir plus :

- Vibrations, Propagation et diffusion - Michel Soutif - Dunod
- L'Énergie - Ressources, Technologies et environnement,
C. Ngô - UniverSciences Dunod
- L'Énergie de demain - Techniques, Environnement, Économie -
J.L. Bobin, E. Huffer, H. Nifenecker - EDP Sciences
- A. Fouillé Électrotechnique à l'usage de l'ingénieur, Dunod
- Heat Transfer A modern Approach , Martin Becker , Plenum Press